

Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère appliquée aux digues

Optimiser l'auscultation des ouvrages

■ Paul-Henri FAURE - Vincent TOURNADRE - Jacques BEILIN - Marc PIERROT-DESEILLIGNY

Confrontée au vieillissement de ses endiguements et à des conditions d'accès parfois dégradées, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), 2^e producteur d'hydroélectricité français, souhaite développer de nouveaux systèmes d'auscultation complémentaires aux capteurs et inspections visuelles déjà déployés sur ses ouvrages. Les développements des drones, de la photographie numérique et des algorithmes de méthodes automatiques de corrélation permettent aujourd'hui de créer des modèles 3D à une résolution infra-décimétrique adaptée à la surveillance des ouvrages. Afin de garantir que cette modélisation soit d'une précision attendue pour les besoins en auscultations des ouvrages en terre (selon le cas, de ± 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 aux digues. Cet article se propose de présenter le projet de recherche et les avancées scientifiques réalisées, et intégrées dans MicMac, la chaîne de traitement photogrammétrique open source de l'IGN.

MOTS-CLÉS

Drone, auscultation, barrage, digue, photogrammétrie

sur une acquisition linéaire. Enfin, nous étudierons l'influence des paramètres sous-jacents au calcul des orientations : détection des points homologues, influence du bruit sur ceux-ci, différents modèles de calibration. Les dernières avancées seront illustrées par l'acquisition réalisée en septembre 2014 sur une portion d'un endiguement CNR.

À partir de ces résultats, nous concluons sur quelques recommandations afin d'améliorer le rendu des acquisitions linéaires.

L'auscultation des digues à 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 sûreté 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 trois composantes : surveillance visuelle ; mesures d'auscultation ; essais et contrôles.

■ Les digues CNR

Les digues 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. Conçues avec les matériaux en place et perméables, ces ouvrages vieillissent et se doivent d'être surveillés de plus en plus finement.

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 km 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 du fait des hauteurs de vols différentes (inférieures à 150 m pour un drone). 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 photogrammétrique, et d'utiliser ces données pour optimiser le suivi métrologique 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.

Afin d'étudier ceci de plus près, nous avons reproduit une acquisition linéaire à l'échelle du 1/20. Cette réduction d'échelle a été nécessaire afin d'acquérir une vérité terrain de grande précision.

Nous présenterons dans un premier temps l'intérêt de la technologie du point de vue du concessionnaire et exploitant du Rhône. À travers notre expérimentation à échelle réduite, nous mettrons en évidence dans une autre partie les phénomènes de courbure de bande et montrerons son importance



■ **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.

■ **Mesures d'auscultation**

Les mesures d'auscultation permettent d'avoir 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. Les digues CNR sont équipées 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.

■ **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.

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 d'exactitude pas assez satisfaisante. Les relevés réalisés à la CNR par LiDAR terrestre ont montré que, pour obtenir une incertitude finale de l'ordre de 3 cm, les opérations de terrain ont nécessité des méthodologies spécifiques requérant plusieurs jours de mesure (stations multiples, mise en place de canevas de rattachement précis...). Les relevés LiDAR aérien ont aussi montré à la CNR les difficultés opérationnelles pour atteindre des précisions proches de 5 cm (hauteurs de vol, nombre de zones de contrôle, redondances des axes...). Face à ces enjeux et devant le développement des drones, la CNR s'est rapprochée de l'IGN pour étudier les capacités de ces systèmes pour de l'auscultation d'ouvrages linéaires tels que les digues.

Projet de recherche : métrologie par photogrammétrie aéroportée légère

■ **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 et 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



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

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 suffisante tant que ce modèle est utilisé comme support de communication.

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 maîtres d'ouvrage pour des systèmes capables d'assurer un suivi de mouvement 3D des sols avec une précision infra-centimétrique.

■ **Réalité et intérêt du centimètre**

Dans le cadre des mesures d'auscultation renforcée 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 modèles physiques ont montré que des signes précurseurs étaient visibles en surface sous la forme de déformations centimétriques (± 2 à 3 cm). 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.

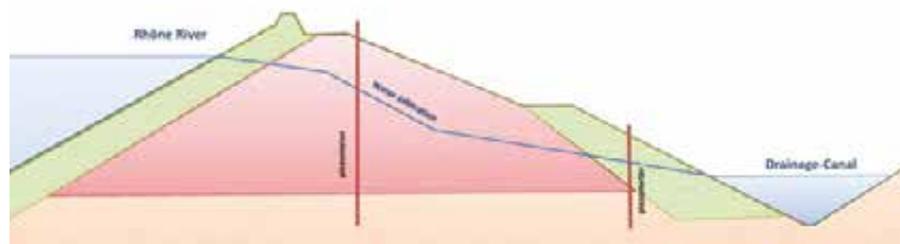


Figure 1. Coupe transversale d'un endiguement CNR



■ 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.

Acquisitions récurrentes

Elles concernent l'auscultation régulière de zones ciblées et localisées (de l'ordre du km) dans le cadre de suivis spécifiques. Pour ce type d'acquisition la précision escomptée est de ± 1 cm afin de pouvoir déceler des déformations "centimétriques" (± 2 cm).

Les acquisitions exceptionnelles

Elles concernent des situations de crise où la CNR souhaite obtenir un état des lieux de linéaires importants (plusieurs dizaines de km). Dans ce cadre la CNR souhaite avoir à disposition un outil rapide dans la mise en place et dans le traitement des données. (Séisme, accès perturbés, etc.). Sur ce type d'acquisition les précisions escomptées sont de l'ordre de ± 3 cm.

■ Objectifs

L'objectif est d'arriver à un système permettant, à partir de prises de vues aériennes légères, de connaître la géométrie des ouvrages de type digues avec une précision centimétriques, 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 structures en terre et les ouvrages béton difficilement accessibles.

Objet scientifique :

- Il s'agit d'analyser, d'améliorer et d'optimiser la précision des modèles 3D utilisant les algorithmes actuels.
- Il s'agit de définir des indicateurs sur la précision de la méthode et de s'assurer que ceux-ci respectent "l'écart maximal toléré" défini par l'opérateur.

Objet technique :

- Il s'agit de développer des méthodologies et un outil opérationnel dans des opérations de surveillance et d'auscultation d'ouvrages génie civil (géométrie de digue, déformation structure béton, détection d'affouillement, etc.).

Analyse scientifique à travers une reproduction à échelle réduite

Les ouvrages que nous sommes amenés à surveiller représentent un linéaire généralement inférieur à 1 000 m, pour moins de 100 m de largeur.

Le laboratoire de métrologie de l'École supérieure des géomètres et topographes (ESGT) propose les conditions idéales pour reproduire une prise de vue linéaire conforme à notre problématique. Il dispose d'un rail sur lequel nous avons fait glisser un appareil photographique sur un chariot. En photographiant le mur faisant face, nous avons donc reproduit notre prise de vue en considérant que le chariot soit notre drone, et que le mur soit notre digue.

Cette simulation est intéressante à plus d'un titre. D'une part, le rail étant "parfaitement" rectiligne, nos prises de vues sont elles aussi alignées, et le calcul des poses devrait donc montrer cela. D'autre part, nous avons mesuré à chaque déclenchement de l'appareil sa position, obtenue par mesure interférométrique qui nous garantit une précision de quelques microns. Cette manipulation nous a également assuré de la linéarité rigoureuse du rail (ou avec des défauts inférieurs au millimètre), sans laquelle nous n'aurions pu effectuer nos mesures. Les rotations de l'appareil pendant la prise de vue ont été évitées par une mise en place minutieuse.

Un jeu de 75 cibles a également été placé sur le mur, afin de reconstituer les points d'appuis. Des méthodes de métrologie ont été utilisées (trépieds lourds, tachéomètres précis à la seconde de degré, 8 à 14 mesures par point...) pour relever ces points, aboutissant à une précision moyenne de 0,25 mm. Cela permet de garantir que nos observations sur modèle réduit sont cohérentes avec les précisions attendues à l'échelle 1/1. Cela est également adapté au pointé visuel dans les images, dont la résolution est de 0,5 mm.

Différents jeux de données ont été acquis lors de cette expérience ; nous nous intéresserons ici à un jeu de 63 clichés, pris tous les 75 cm le long du rail (recouvrement de 80 %), avec le même capteur que nous embarquons sur le drone (Sony RX1).



Figure 3. À gauche, le rail reproduisant le vecteur aérien ; à droite, le mur reproduisant l'ouvrage linéaire à ausculter



Figure 4. Représentation d'un effet de courbure évident

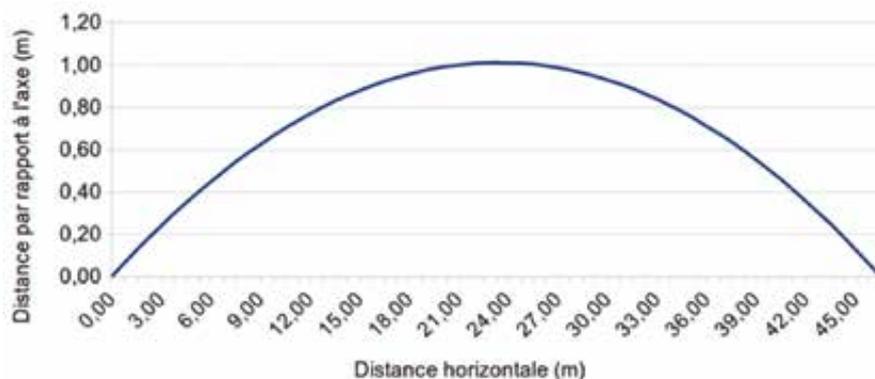


Figure 5. Importance de la dérive le long de l'axe de prise de vue



Figure 6. Polygone de calibration de l'ENSG

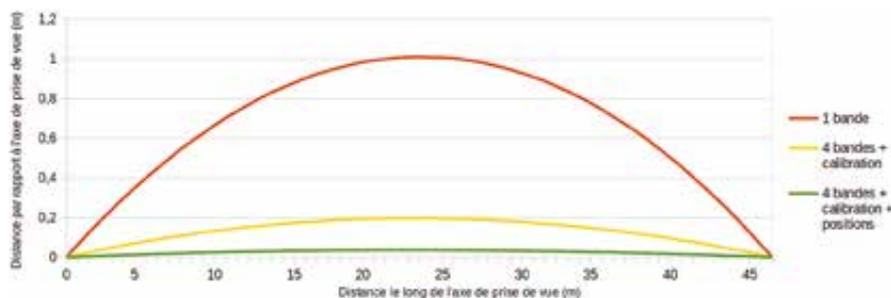


Figure 7. Évolution de la dérive en fonction des données initiales

La photogrammétrie a beaucoup évolué depuis les années 2000, notamment par l'apport de la communauté de la vision par ordinateur. Les algorithmes actuels permettent une reconstruction automatique d'une scène. Cependant, la précision de ces processus est encore mal maîtrisée. Les résultats détaillés ci-dessous ont été générés par la chaîne de calcul MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2006]. La chaîne, développée par l'IGN, permet une grande flexibilité dans les choix de calcul, mais étant open source, elle permet aussi à chacun d'apporter ses propres améliorations.

La Figure 4 illustre le phénomène de dérive de bandes qui intervient particulièrement sur les acquisitions linéaires. Une façon de représenter cette dérive consiste à calculer la distance entre chaque caméra et l'axe défini par la première et la dernière caméras (Figure 5). On observe alors une évolution parabolique des écarts. Ces dérives résultent d'une mauvaise estimation des orientations internes, notamment mis en valeur par [Wu ; James].

■ **Sur l'apport de données initiales précises**

Le calcul présenté ci-dessus a été effectué dans des conditions particulièrement défavorables, afin d'imager le phénomène. À partir d'un jeu d'images acquis sur une seule bande, on calcule des points homologues de manière automatique en utilisant l'algorithme Sift [Lowe]. En ne donnant aucune information ni sur les orientations internes, ni sur les orientations externes, il est compliqué de déterminer des valeurs initiales assez proches de la réalité pour que le logiciel converge vers la bonne solution. L'apport de données précises, par le biais d'une calibration sur polygone (Figure 6), des positions de la caméra mesurées par interférométrie, mais aussi de 3 bandes d'images supplémentaires permettent de limiter cette dérive (Figure 7).

La Figure 7 illustre l'évolution des erreurs résiduelles dans différentes configurations. Lorsqu'on ajoute de nouvelles images, et qu'on donne un fichier calibration, la dérive est moins forte. Lorsqu'on ajoute les positions initiales de chaque caméra (mesures



Tableau 1. Écart moyen absolu des erreurs de reprojection des points d'appuis, entre orientation vraie, et orientation bruitée

Bruit (pixel)	0.5	1	2	3	4	
Résidus (en m)	En X	1,2E-5	3,3E-5	5,6E-5	8,9E-5	1,4E-4
	En Y	5,0E-5	1,0E-4	1,8E-4	2,5E-4	3,9E-4
	En Z	3,2E-5	2,6E-4	2,3E-4	2,6E-4	4,8E-4

interférométriques), sans ajouter de contrainte, on parvient à limiter encore les erreurs.

Les données initiales permettent donc d'améliorer la précision du calcul des orientations. Cependant, même dans la configuration la plus aboutie, les résultats ne permettent pas d'atteindre une précision centimétrique sans point d'appuis.

Avec de telles données, la solution qui minimise les résidus des observations n'est donc pas celle qui limite la dérive. Or les conditions de notre expérience montrent bien que cette dérive devrait être inférieure au millimètre (caméras alignées sur un rail). De plus, les orientations externes étant précises, il faut chercher ailleurs. Ce phénomène peut s'expliquer de deux façons :

- les points homologues sont bruités, la propagation induit une dérive lors du calcul ;
- le fichier de calibration n'est pas adapté ; le modèle d'orientation interne ne caractérise pas correctement les défauts de l'objectif, ou celui-ci a été mal déterminé.

■ Précision des points homologues et dérive

Afin de comprendre l'influence du bruit résultant de la détection automatique des points homologues, nous avons cherché à simuler un jeu de données. À partir d'une boucle de calcul classique générant un Modèle numérique de surface (MNS), nous avons aléatoirement sélectionné des points sur ce MNS, et reprojété ces points dans les couples d'images. Pour coller aux conditions réelles, nous avons limité la multiplicité de ceux-ci et simulé des parties cachées (non détection).

Ces nouvelles données constituent des couples de points homologues que l'on considère parfaits. En effet, le calcul d'aérotriangulation résultant nous donne un résidu moyen de 0 pixel.

Tableau 2. Erreurs de reprojection des points d'appuis associées à différentes hauteurs de vol

Hauteur (m)	30	60	120	30 – 60 - 120	
Résidus moyens (en m)	En X	0,031	0,031	0,027	0,031
	En Y	0,082	0,084	0,083	0,084
	En Z	0,106	0,110	0,110	0,110

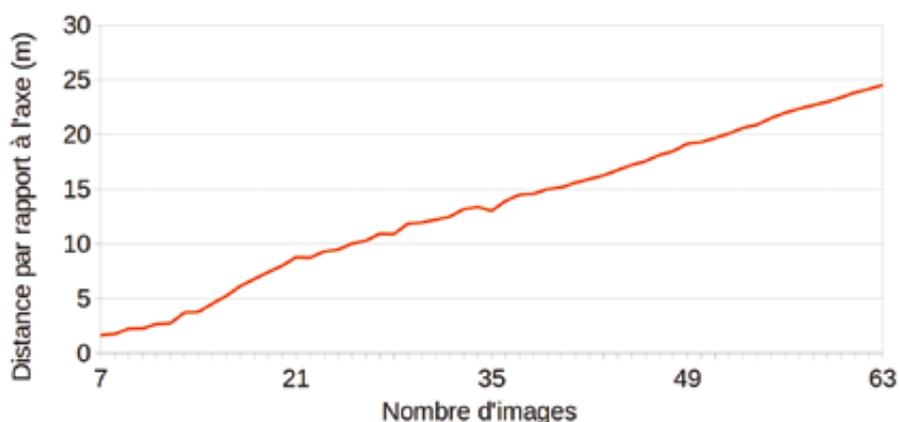


Figure 8. Évolution de la courbure maximale en fonction du nombre d'images

Nous considérons les orientations résultantes comme la vérité terrain, et nous proposons de bruitez chacun de ces points afin d'étudier leur effet sur le calcul suivant.

Nous recalculons alors de nouvelles orientations après avoir ajouté un bruit blanc sur les points homologues, et effectuons une similitude spatiale entre chacune de celles-ci et notre vérité terrain. Le *Tableau 1* montre les résidus de ces simulations, avec un bruit variant de 0,5 à 4 pixels. L'axe X est défini par l'axe du déplacement de la caméra, Z par la profondeur (altitude), et Y par l'axe transversal à l'acquisition.

Logiquement, nous observons que plus les points sont bruités, plus les résidus sont élevés. Ceux-ci sont généralement plus importants sur l'axe Z, mais n'impliquent pas un phénomène de courbure.

L'importance du bruit dans la détermination des points de liaison n'a qu'un effet limité sur le calcul des positions de caméras (même à 4 pixels de bruit, les résidus en Z sont inférieurs au demi-millimètre).

■ Hauteur de vol et dérive

À partir du jeu de données ESGT, nous avons analysé l'évolution de la dérive en fonction du nombre d'images (*Figure 8*). On observe qu'à

partir de 7 images acquises en ligne, on commence à observer une dérive parabolique. Cette dérive va augmenter de façon linéaire, de telle manière que si on double le nombre d'images, on double la dérive résultante.

Nous avons voulu mettre cet enseignement à l'épreuve sur une mission drone, en survolant une portion de digue de 600 m linéaires à différentes résolutions. Un premier jeu de données acquis à une hauteur de vol de 30 m est composé de 417 images, un second à 60 m compte 233 images, et un troisième acquis à 120 m 128 images.

On notera que le jeu de données acquis à 30 m est incomplet ; certaines portions de la digue auraient nécessité un troisième passage pour modéliser entièrement l'ouvrage, alors que les vols à 60 et 120 m permettent de restituer l'ensemble.

Le *Tableau 2* illustre l'évolution des erreurs de reprojection des points d'appuis à travers les différents calculs, en utilisant une procédure de calcul classique. On y constate que jouer sur la hauteur de vol ne permet pas de limiter nos erreurs.

■ Modèles de calibration

L'interface Tapas, incluse dans la suite MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2011], propose différents modèles de calibration. Du RadialBasic à 5 degrés



Tableau 3. Modèles de calibration utilisés

	PPA/PPS	Polynôme	Décentrement
Fraser	Distincts	Degré 7	Oui
FraserBasic	Égaux	Degré 7	Oui
RadialBasic	Égaux	Degré 7	Non
RadialStd	Distincts	Degré 7	Non
RadialExtended	Distincts	Degré 11	Non

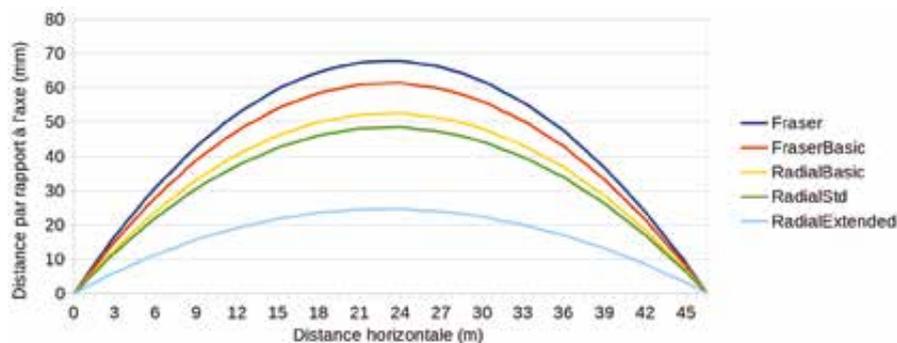


Figure 9. Dérives mesurées en fonction de la modélisation choisie

de liberté au Fraser plus complexe, la question du choix peut se révéler épineuse. Le *Tableau 3* résume les principales caractéristiques de ces modèles.

Nous avons donc calculé cinq jeux de calibration, puis appliqué ces modèles sur nos images. La *Figure 9* nous montre que nous obtenons une nouvelle fois une courbure parabolique avec chacun d'eux.

Cette expérience semble indiquer que pour notre caméra, une correction de décentrement n'est pas nécessaire, que la distinction entre PPA et PPS est adaptée, et qu'un polynôme de correction de degré élevé caractérise au mieux la distorsion. Ce constat nous a permis de créer de nouveaux modèles, qui permettent de limiter encore la dérive, et qui après une compensation spécifique sur 6 points d'appuis, délivrent sur le modèle réduit les précisions souhaitées. Ces derniers développements seront présentés dans une prochaine étude.

■ **Ajout images obliques**

Il semble maintenant que le calcul des orientations internes est le point le plus problématique. Les calibrations effectuées sur des caméras non métriques, embarquées sur des vecteurs produisant des vibrations, manipulés par plusieurs utilisateurs... ne sont pas forcément très stables au cours du

temps. Nous travaillons sur une procédure d'autocalibration, durant laquelle on ajoute les images par groupes, et où l'on contrôle la libération des inconnues par incrément. Cela simplifie la prise en main de l'appareil photographique (qu'on peut utiliser pour d'autres applications), mais permet aussi d'obtenir de meilleurs résultats qu'en utilisant une calibration calculée sur un polygone.

Cette étape est facilitée par l'acquisition d'images obliques. Celles-ci permettent de créer de la profondeur de champ sur une scène relativement plane, et ainsi d'aider à une meilleure détermination des inconnues, notamment dans les coins de l'image.

Nous nous questionnions à l'origine

sur l'intérêt d'inclure des images obliques dans nos acquisitions. La question se posait en fait en sens inverse, tant l'importance de ces clichés semble prépondérante.

Étude de cas

■ **Site de la Palière**

La digue présente un linéaire de 1 000 m pour une largeur moyenne de 60 m. Cette portion d'endiguement est suivie par nivellement depuis sa construction en 1983. En complément du réseau d'auscultation, des repères complémentaires ont été installés, tous les 50 m le long de la digue. Les coordonnées sont déterminées en GPS RTK et nivellement direct.

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

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 par 40 m, offrant une résolution pixelaire d'un centimètre.

■ **Relevés**

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").

Tableau 4. Erreurs de reprojection moyennes absolues sur les points d'appuis

	Images	Verticales	Obliques	Vert. + Obliques
Sans adaptation sur les points d'appuis	EMA (X) (m)	0.039	0.034	0.012
	EMA (Y) (m)	0.118	0.047	0.014
	EMA (Z) (m)	0.185	0.043	0.103
	EMA (XYZ) (m)	0.248	0.080	0.107
Adaptation sur 6 points d'appuis	EMA (X) (m)	0.035	0.034	0.011
	EMA (Y) (m)	0.115	0.042	0.016
	EMA (Z) (m)	0.138	0.035	0.010
	EMA (XYZ) (m)	0.199	0.072	0.024



Figure 10. Vue aérienne de la digue de la Palière

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.

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 de quelques centaines de millions de points en utilisant 20 à 30 points de contrôle semble quelque peu hasardeux.

Tableau 5. Écart 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

■ 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.

Les résultats sur les comparaisons entre le nuage "drone" et les maillages "terrestres" sont décrits dans le Tableau 5 et la Figure 12. Le modèle "drone" utilisant 6 GCP et chaque maillage sol utilisant 5 GCP.

Conclusion

Le projet présenté dans cet article permettra à la CNR d'acquérir des moyens et des méthodes ciblées pour la surveillance de demain. CNR s'est associée à un référent européen dans la mesure topographique (IGN) pour mettre en œuvre un système innovant pour ses besoins propres d'auscultation des endiguements.

Même si les techniques photogrammétriques semblent faciles d'accès et d'utilisation avec les nouveaux systèmes clefs en main, ce projet montre qu'il faut rester extrêmement vigilant quant à leur mise en œuvre pour maîtriser le niveau d'incertitude final, de surcroît pour une utilisation en auscultation et analyse comportementale. De même, la donnée surfacique ne constitue bien souvent

1 GCP : Ground Control Point ou point d'appui



Figure 11. Exemple de zone de placette, avec nivellement des GCP et prise de vue photogrammétrique

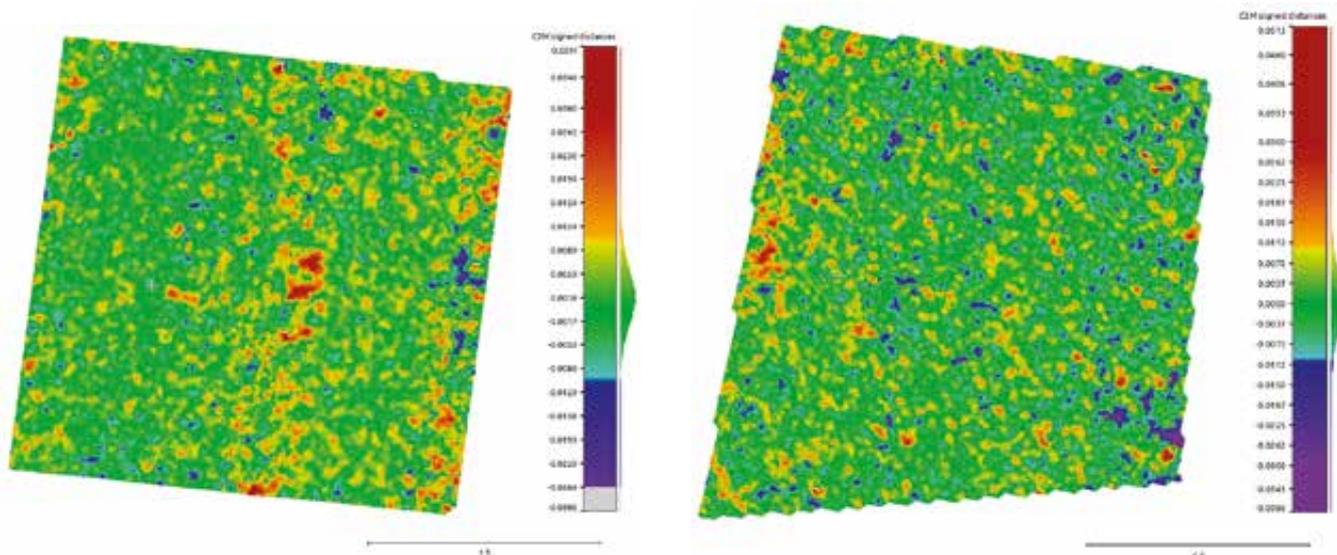


Figure 12. Écart entre les modèles terrain et le modèle drone



qu'un complément aux informations ponctuelles des techniques classiques, et n'est réellement pertinente que dans certains cas.

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 haute précision sur de grands linéaires) seront utilisables par d'autres concessionnaires ou prestataires sur des ouvrages présentant la même géométrie. Les applications sont nombreuses : les conduites forcées, les couronnements et les parements des barrages ou les voies ferrées peuvent faire l'objet de relevés géométriques de précision.

Compte tenu de la miniaturisation des capteurs (caméra métrique, GNSS miniature, centrale inertielle...) et du développement fulgurant des drones, les techniques LiDAR et photogrammétrique présentent aujourd'hui un potentiel majeur pour l'optimisation du suivi géométrique des ouvrages.

Les données générées par ces acquisitions représentent des volumes de données colossaux nécessitant des ressources informatiques très importantes. Leur essor est donc aussi lié à l'amélioration des temps de traitements. Enfin, les efforts de développements doivent également se poursuivre pour l'optimisation d'algorithmes spécifiques de détection de changement entre nuages de points. ●

Remerciements

José CALI – Enseignant-Chercheur – ESGT

Service des Activités Aériennes – IGN
Equipes Mesures de la CNR

Contacts

Paul-Henri FAURE

C.N.R - CACOH
Compagnie Nationale du Rhône
p.faure@cnr.tm.fr

Vincent TOURNADRE

Jacques BEILIN

Marc PIERROT-DESEILLIGNY

IGN-ENSG, Institut national de l'information géographique et forestière

Références

David G. Lowe. 2004. *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. Int. J. Comput. Vision 60, 2 (November 2004), 91-110.

Pierrot-Deseilligny, M., Cléry, I., 2011. *APERIO, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of a set of images*. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, 2-4 March 2011, Trento, Italy.

Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006. *A multiresolution and optimization-based imagematching approach : An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereomagey*. IAPRS vol XXXVI-1/W41, February 2006, Ankara, Turkey.

Wu, C., *Critical Configurations For Radial Distortion Self-Calibration*, CVPR, 2014.

James, M.R., Robson, S., *Systematic vertical error in UAV-derived topographic models : origins and solutions*, Earth. Surf. Process. Landforms 39, 2014

ABSTRACT

Keywords: UAV, drone, Monitoring, Dam, Photogrammetry, dyke, embankment

Considering the ageing and the possibly hard access to its 400 kilometers of embankments, the Compagnie Nationale du Rhône (CNR), second hydroelectric energy producer in France, aims to develop new monitoring procedures to complement the sensors and visual inspections already spread out on its structures. Recent developments on drones, digital photography, and multi-images correspondances algorithms have brought the possibility to create high resolution 3D models, using lighth aerial means. To meet the objective of an unprecedented accuracy (depending on the case, ± 1 cm to ± 3 cm) while minimising the amount of Ground Control Points (GCP), and thus reducing the amount of work, CNR and the Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) have set up a partnership leading to a common research project. A PhD work studying metrology from lighth aerial photogrammetry emphasises that cooperation.