DOI 10.1051/lhb/2016039 La Houille Blanche, n° 4, 2016, p. 48-56

Maitrise de la sureté des ouvrages. Retour d'expérience sur l'utilisation des drones pour l'inspection des ouvrages hydrauliques d'EDF

Jean-Pierre ROCHE[1], Mélanie TRON[2], Florian MAURIS[3]

[1] *EDF-CIH – Savoie Technolac, 73373 Le Bourget-du-lac – jean-pierre.roche@edf.fr*
[2] *EDF-CIH – 37, Rue Diderot, 38000 Grenoble – melanie.tron@edf.fr*
[3] *EDF-DTG – 21 avenue de l'Europe, 38000 Grenoble – florian.mauris@edf.fr*

RÉSUMÉ. – L'utilisation de drones pour l'inspection des ouvrages hydrauliques, souvent situés dans des zones difficiles d'accès, présente un potentiel fort et des expérimentations sont menées depuis plusieurs années à ce sujet par EDF-DPIH (Division Production Ingénierie Hydraulique).
Cet article présente un retour d'expérience d'inspection par drone de deux grands ouvrages hydrauliques : un barrage et une conduite forcée.
Des comparaisons entre capteurs aériens et subaquatiques illustrent les résultats. Des pistes d'améliorations par capteurs d'imagerie acoustique, infrarouge thermique à radiométrie constante ou encore par la mise en œuvre de modes opératoires plus complexes sont présentés.

Mots-clés : examen, béton, barrage, drone, ROV, conduite forcée

Feedback on the use of drones at EDF's hydraulic works

ABSTRACT. – UAVs can be useful in replace human beings in remote or dangerous locations. Electricité de France (EDF) has been launching several experiments for hydraulic works over the past few years, which are described in this article, in particular, the current and future use of pilotless drones. Like underwater robots (ROV, remote operating vehicles) now used for almost every dam survey, EDF aims at surveying dams and penstocks more and more often using UAVs.
This article presents the state of the art of the use of drones by EDF to inspect hydraulic structures. Comparisons between airborne and underwater sensors illustrate the results. Utilization of acoustic imaging sensors, thermal infrared with constant radiometry or by the implementation of more complex operating modes are also presented.

Key-words: survey, concrete, dam, UAV, penstock

I. INTRODUCTION

L'arrivée à maturité de trois types de technologies dans le domaine des drones : le développement des porteurs et de leur pilotage, la miniaturisation des capteurs et le traitement automatique des données ont amené EDF à étudier ces nouveaux outils pour la réalisation de mesures sur les ouvrages de production.

L'utilisation de drones pour l'inspection des ouvrages hydrauliques, souvent situés dans des zones difficiles d'accès, présente un potentiel fort et des expérimentations sont menées depuis plusieurs années à ce sujet par EDF-DPIH (Division Production Ingénierie Hydraulique).

Cet article présente un retour d'expérience d'inspection par drone de deux grands ouvrages hydrauliques : un barrage et une conduite forcée.

II. EXAMENS DE BARRAGES

II.1. Contexte

Le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 impose, pour les barrages de classe A (h supérieure ou égale à 20 m), de réaliser, tous les dix ans, un examen dit « Examen Technique Complet » ou ETC qui a pour but de faire un bilan de l'état des parties de l'ouvrage habituellement immergées ou inaccessibles. L'ensemble des informations recueillies permet d'alimenter les Revues de Sûreté des ouvrages. Ces ETC se substituent aux visites décennales.

Afin de réduire les impacts négatifs liés à une vidange permettant la visite des parties d'ouvrages habituellement immergées ou inaccessibles, EDF propose à son autorité de tutelle d'examiner les ouvrages en eau par moyens subaquatiques lors des inspections décennales. Les ouvrages faisant l'objet d'un tel examen sont généralement les parements amont des barrages et les ouvrages de prise d'eau et de vidange de fond. L'examen du parement amont immergé du barrage de la Gittaz et de la prise d'eau de la galerie d'amenée vers Roselend réalisés dans ce cadre est présenté ci-après (§ II.3).

Les examens des parties visibles mais non accessibles sans moyens spéciaux et non immergées sont également réalisés lors des ETCs. Les ouvrages examinés sont les parements amont émergés, les parements aval, les ouvrages annexes… Ces examens peuvent être réalisés par cordistes ou nacelles en vision directe de façon classique ou par l'utilisation de moyens mécanisés : barque avec mât télescopique et moyen de prise de vue, système filoguidé…

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2016039

Depuis quelques années, EDF réalise certains de ces examens par drone. L'examen par drone du parement amont du barrage de la Gittaz est le premier réalisé dans le cadre de la dernière réglementation (arrêtés du 11/04/2012). Cet examen et ses résultats sont présentés ci après (§ II.2).

II.2. Examen aérien de parement de barrage par drone

II.2.1. Généralités

Le barrage de la Gittaz est un barrage poids arqué (180 m de rayon de courbure), de 66 m de hauteur et 164m de couronnement, calé à la cote 1 564 m NGF et construit entre 1963 et 1967.

L'examen du parement amont du barrage de la Gittaz a été réalisé en juin 2014 dans le cadre de l'Examen technique complet de l'ouvrage. Cet examen d'une semaine a été confié à la société DIADES suite à un appel d'offres et a été réalisé en scénario S1 (« opération en vue du télépilote, se déroulant hors zone peuplée à une distance horizontale maximale de 100m du télépilote », drone limité à 25 kg, altitude de vol maximale de 150m) suivant la réglementation de la DGAC de 2012.

II.2.2. Méthodologie d'examen

L'examen a été réalisé au moyen d'un drone quadri-rotor de 1,30 m d'envergure, équipé d'un appareil photo numérique de 20 MPx monté sur un berceau réglable. Des télémètres permettent de garantir une distance maitrisée et uniforme tout au long de l'examen et de connaitre la position du drone par rapport au parement.

Les vols se sont déroulés majoritairement en matinée pour causes météorologiques (orages et / ou vent l'après midi). Le prestataire a réalisé plus de 30 vols, d'une durée moyenne de 18 mn permettant la capture de plus de 5 000 photos et la couverture de près de 4 000 m² de parement.

Des vols ont également été conduits afin de réaliser des clichés Infra Rouge et des vidéos Haute Définition.

L'examen a été réalisé à partir du couronnement, à vue, sur des génératrices verticales, tous les 3 m. Le déclenchement des prises de vue s'est fait de façon automatique complété par quelques déclenchements manuels.

II.2.3. Méthodologie d'analyse et de restitution

A l'issue de l'examen terrain, un modèle 3D est réalisé par aérotriangulation des images acquises et retraitées préalablement. Cette technique (réalisée par DIADES via le logiciel ACUT 3D) permet de replacer les photos les unes par rapport aux autres et de définir précisément leur emplacement en cas de localisation GPS peu précise.

Puis, l'ensemble des photos est analysé par le logiciel DIAMAP© développé par DIADES afin de détecter semi-automatiquement les différentes pathologies (fissures, dégradation béton, traces d'humidité, de calcite, aciers apparents…).

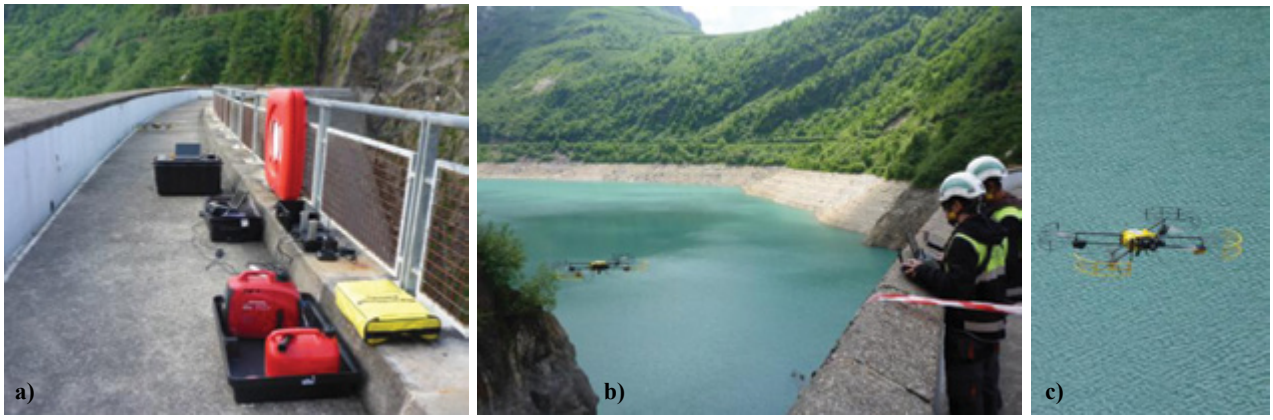

Figure 1 : *a) Installation de chantier b) Examen depuis le couronnement c) Drone Novadem U130.*

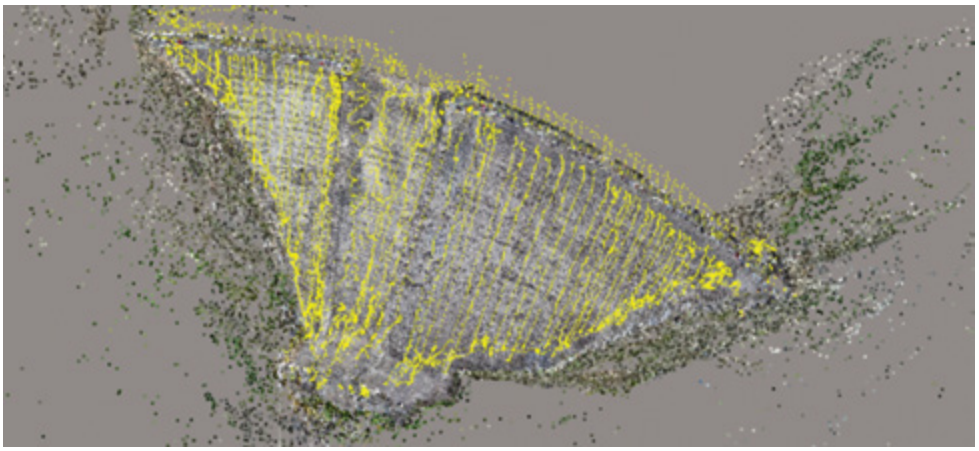

Figure 2 : *Aérotriangulation du parement aval - Modèle 3D.*

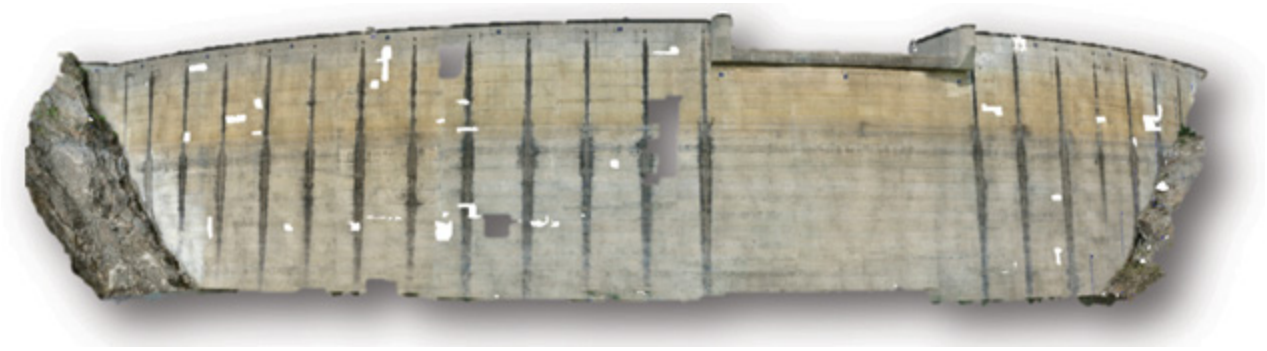

Figure 3 : *Modèle 3D du parement amont.*

Ensuite, les photos présentant des pathologies sont déversées dans un logiciel qui les positionne et permet la projection des défauts sur plan, avant de réaliser les métrés.

Le plan de repérage des défauts a été établi en plaquant la texture photo, ce qui permet de localiser plus facilement les défauts sur le terrain.

II.2.4. Conclusions et perspectives

L'examen a mis en évidence que les défauts observés ne présentent pas d'importance majeure vis-à-vis de la pérennité de la structure et par conséquent que le parement amont du barrage de la Gittaz présente un bon état général.

L'utilisation de drones pour l'examen des parements des barrages est réalisée de façon ponctuelle depuis plusieurs années au CIH. D'autres techniques d'examen par moyens spéciaux sont également utilisées, permettant la réalisation de prises de vues et un traitement d'image afin d'obtenir le même type de restitution (barque avec mât télescopique, système filoguidé…).

Ce type d'examen et de restitution permet la réalisation de levés de défauts exhaustifs, objectifs, précis et de qualité,

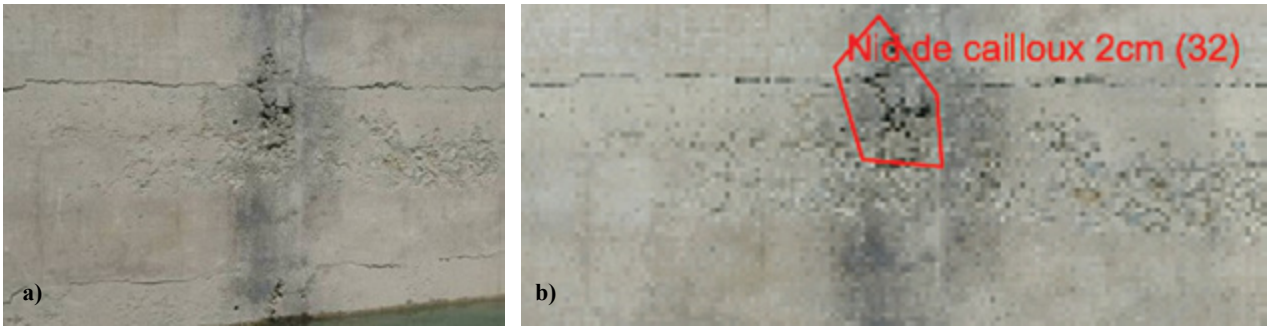

Figure 4 : *a) Photo brute b) Zoom sur extrait de plan PDF avec détection automatique du défaut et texture de fond.*

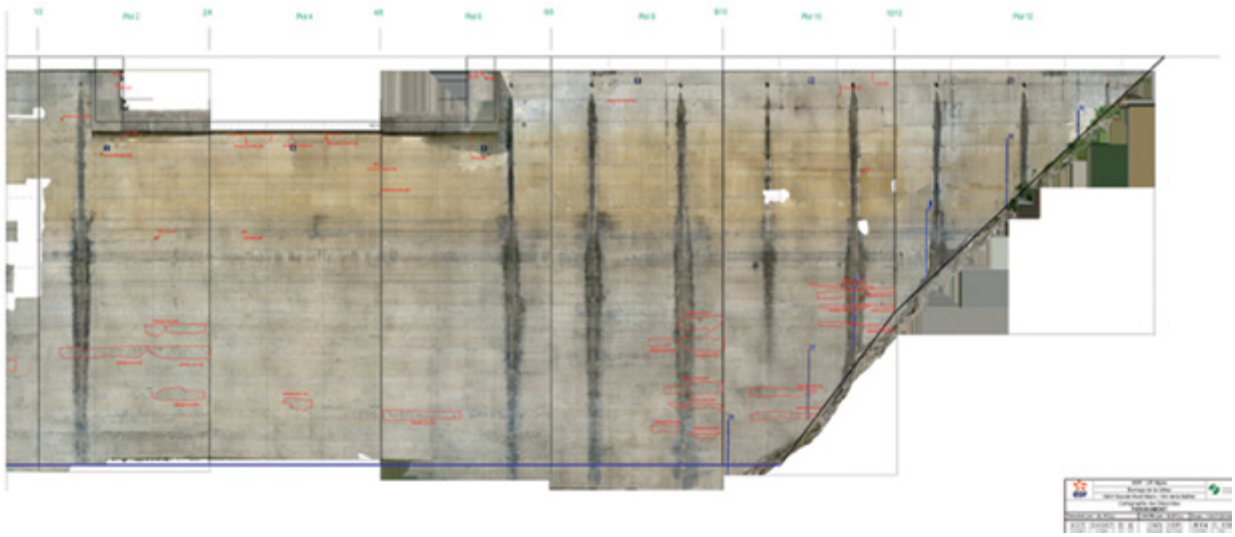

Figure 5 : *Restitution sur plan Autocad® avec texture de fond.*

dans de bonnes conditions de sécurité. Ces levés permettent de faire un état des lieux de l'état de l'ouvrage et servent de support au suivi de l'évolution des pathologies éventuelles.

Parmi ces moyens d'examen, le drone présente une rapidité de déploiement et de mise en œuvre significative mais son utilisation reste conditionnée suivant certains seuils par les contraintes climatiques (vent, pluie, …).

D'autre part, il faut retenir que dans ce type d'examen, le drone n'est qu'un vecteur de prise de vues, la compétence clé pour ce type de prestation restant la capacité et les modes de traitement des images acquises.

Enfin, la plus-value d'utilisation de ces outils (moyen de prise de vue, détection automatique de défauts, restitution) sera définitivement acquise lorsqu'une définition précise et homogène des défauts à observer sur les ouvrages et de leur format de restitution aura été établie, afin d'obtenir des restitutions homogènes entre les différentes techniques d'examen.

II.3. Examen subaquatique de parement de barrage par ROV

II.3.1. Généralités

Depuis les années 2000, EDF propose à son autorité de tutelle d'examiner les parties immergées au moyen de robots subaquatiques (Remote Operating Vehicles ou ROVs) lors des inspections décennales ou plus récemment lors des Examens Techniques Complets.

Ces opérations sont déclenchées à l'issue d'un test de visibilité confirmant que l'examen pourra se dérouler dans de bonnes conditions de visibilité.

De nouvelles techniques d'examen par imagerie acoustique existent et permettent la réalisation de certains examens malgré des conditions de visibilité médiocre. Cependant, l'utilisation de ces techniques est encore peu répandue sur les ouvrages hydrauliques et nécessite encore des actions de développement et d'analyse afin de définir les pathologies observables et les modalités d'observation par ces techniques.

L'examen de la partie immergée du parement amont du barrage de la Gittaz a été réalisé par ROV en septembre 2014, dans d'excellentes conditions de visibilité. Cet examen d'une semaine a été confié à la société JIFMAR, titulaire d'un marché cadre pour les examens subaquatiques.

II.3.2. Méthodologie d'examen

L'examen a été réalisé par un ROV Seaeye Falcon (de dimensions L = 1 000 mm, l = 600 mm, h = 500 mmm de 50 kg sans lest) équipé d'une caméra couleur haute sensibilité, un sonar de navigation 360° de portée 150 m, un capteur de pression permettant l'estimation de la cote d'examen, un transpondeur acoustique pour le positionnement, des projecteurs, un système de laser permettant l'estimation de la taille des défauts observés, un ombilical de 500 m permettant de véhiculer la puissance, les données, la vidéo, …

Le positionnement du robot se fait par un module acoustique qui interroge une balise préalablement positionnée en amont du parement.

Le parement est balayé verticalement le long des joints de plots et de lignes fictives entre joints de plots et

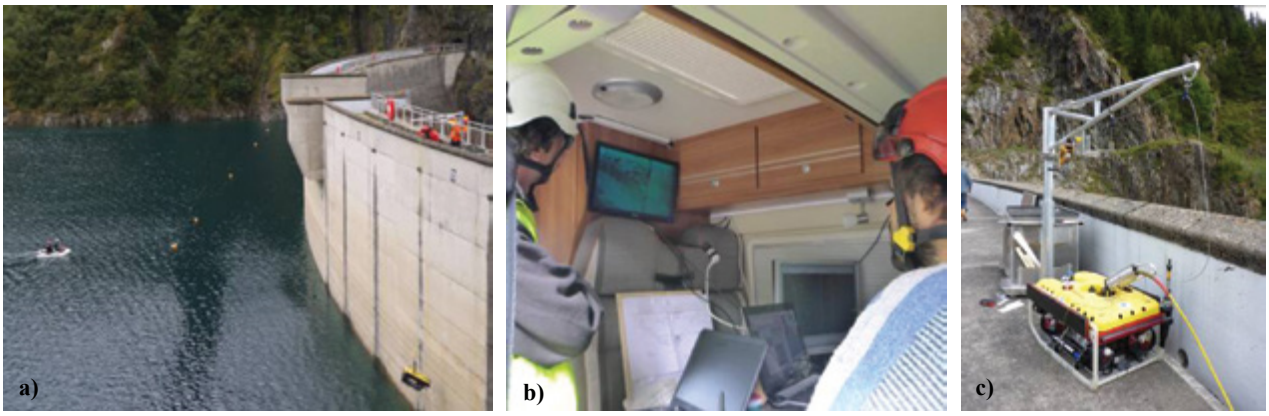

Figure 6 : *a) Mise à l'eau du ROV, repositionnement balise acoustique, b) écrans de visualisation et de positionnement c) ROV Falcon Seaeye.*

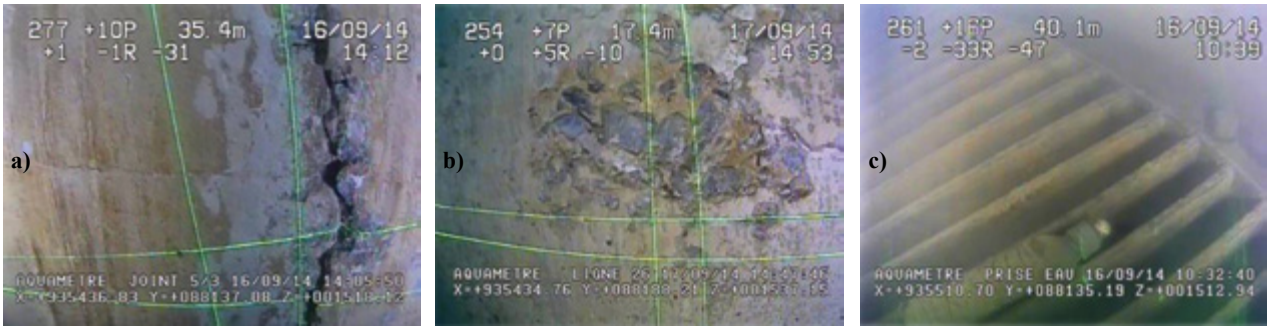

Figure 7 : *Prises de vues lors de l'examen subaquatique a) Arrêtes de joint irrégulières (défaut de construction) b) Nid de cailloux c) Grilles de la prise d'eau.*

horizontalement afin de suivre certaines reprises de bétonnage. Le niveau d'envasement est mesuré et le contact béton/rocher examiné. Les structures de la prise d'eau et de la vidange de fond font l'objet d'un examen de l'état des structures GC et de l'état des grilles (encombrement, état…).

II.3.3. Méthodologie d'analyse et de restitution

La vidéo est transmise en temps réel au poste de pilotage et d'examen.

Un spécialiste Génie Civil EDF-CIH est présent sur le site pendant toute la durée de l'examen pour déceler, visualiser, identifier, enregistrer tous les défauts et autres points qu'il juge intéressants.

L'ensemble du parcours fait l'objet d'un enregistrement vidéo à partir duquel une synthèse vidéo est réalisée. Le rapport définitif est établi à partir du suivi in-situ, des prises de vues et de la vidéo.

Les constatations effectuées sont reportées sur un plan Autocad®.

II.3.4. Conclusions et perspectives

L'examen a mis en évidence que les défauts observés ne présentent pas d'importance majeure vis-à-vis de la pérennité de la structure et ne présentent pas d'évolution depuis le précédent examen subaquatique, et que par conséquent le parement amont immergé du barrage de la Gittaz présente un bon état général.

Les examens subaquatiques sont réalisés depuis plus de 10 ans lors des inspections décennales des ouvrages, ce qui permet de s'affranchir des impacts négatifs liés à une vidange de retenue. Cette technique est aujourd'hui éprouvée mais reste dépendante des conditions de visibilité, des compétences du pilote et de la qualité du matériel. Elle reste également conditionnée par la présence sur place d'un spécialiste Génie-Civil EDF-CIH pendant toute la durée de l'examen. Grâce au profondimètre et au système de positionnement utilisé, les différentes observations peuvent cependant être localisées avec précision.

Un développement des techniques d'imagerie acoustique appliquées aux examens de barrage permettra peut-être, à terme, de s'affranchir des conditions de visibilité pour l'examen des structures immergées.

II.4. Comparaison des techniques d'examen

L'examen du parement amont émergé a pu être réalisé à cote suffisamment basse et l'examen du parement immergé a cote suffisamment haute pour permettre le recouvrement requis mais également la comparaison des techniques d'examen.

Il apparait que, dans de bonnes conditions de visibilité, l'image acquise par la caméra du ROV permet de mieux rendre compte du relief. L'image acquise au moyen du drone, perpendiculaire au parement présente une excellente qualité et résolution. D'un point de vue précision de la localisation, on note des écarts de 20cm à 1m entre les deux techniques. Enfin les images issues du modèle 3D réalisé à partir de l'examen par drone sont complémentaires aux prises de vues et permettent d'apporter également une notion de relief aux désordres observés.

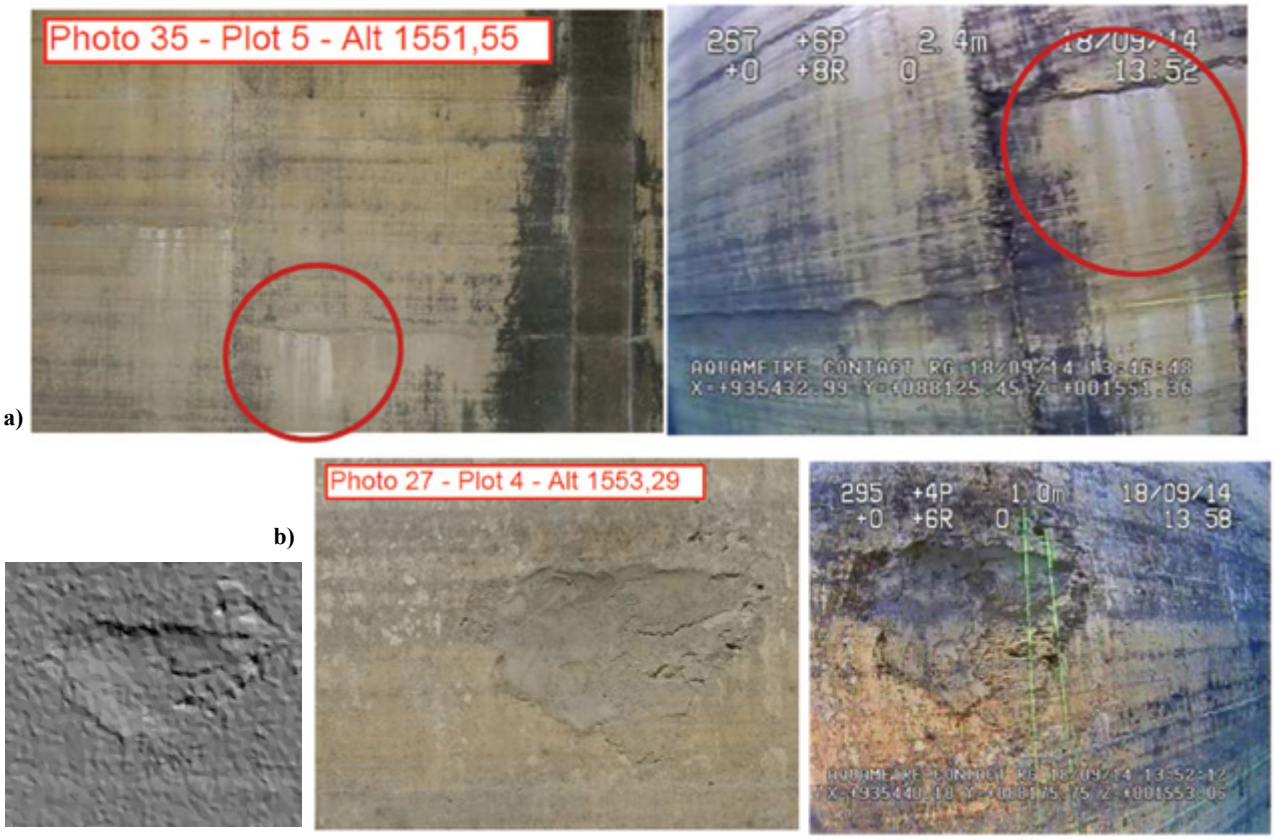

Figure 8 : *Comparaison techniques d'examen a) Coulure de calcite observée depuis le drone a gauche et depuis le ROV à droite b) Restitution ragréage à partir d'un extrait du modèle 3D, ragréage observé depuis le drone et depuis le ROV à droite.*

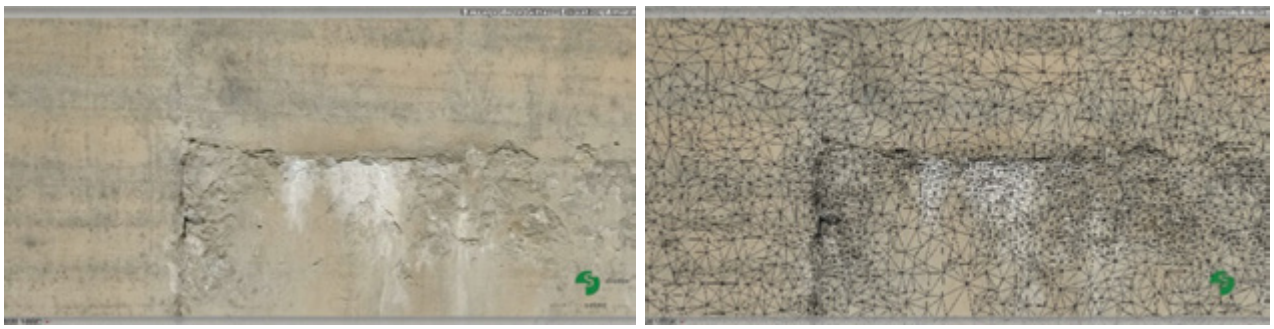

Figure 9 : *Coulure de calcite : restitution 3D avec et sans maillage.*

Enfin, l'examen par visionneuse du modèle 3D de restitution des images acquises par drones permet un examen et une caractérisation exhaustifs des défauts.

II.5. Conclusion sur les examens de barrage

Les examens de barrage réalisés en particulier lors des Examens Techniques Complets, peuvent s'appuyer aujourd'hui sur plusieurs moyens et méthodes d'examen, complémentaires et fonction du milieu et des conditions d'observation : examen visuel direct, examen subaquatique, examen par moyens spéciaux tel que les drones.

Ces techniques témoignent de la volonté d'innovation et de progrès dans ce domaine, dans le but de rendre les examens les plus fiables possibles, dans les meilleures conditions de sécurité, afin de garantir une bonne maîtrise de la sûreté des ouvrages.

Cependant, ces techniques présentent une certaine hétérogénéité de restitution sur laquelle une réflexion est en cours. En effet, la détection semi-automatique de défauts permet un relevé précis et exhaustif mais ne permet pas d'apprécier directement l'état du matériau et de la structure. Les examens directs (par un spécialiste) et subaquatiques, restent, pour leur part conditionnés par la sensibilité et le professionnalisme du spécialiste réalisant l'examen.

Enfin d'un point de vue technique, des améliorations sont à engager sur les techniques d'imagerie acoustique en ce qui concerne les examens subaquatiques et les conditions d'opérabilité des drones pour les examens des parties émergées.

Les examens de barrage peuvent donc aujourd'hui s'appuyer sur ces techniques mais restent soumis à l'analyse impérative de l'ensemble des restitutions par un spécialiste qui détient une bonne connaissance du site et de l'ouvrage.

III. EXAMEN DE CONDUITES FORCÉES

III.1. Contexte

Afin d'alimenter l'Examen Technique Complet de la conduite forcée d'Eylie, l'inspection de cet ouvrage a été réalisée par drone.

Ouvrage le plus escarpé du Groupement d'Usines du Couserans (09), la conduite forcée d'Eylie est longue d'environ 2 km et présente une hauteur de chute d'environ 1 000 m. **L'inspection de cette conduite représente le déplacement le plus dangereux du GU du Couserans.** La conduite présente deux parties distinctes, en crête de la vanne de tête au massif M6, puis en tranchée forestière du massif M6 à l'usine.

III.2. Prestation

III.2.1. Méthodologie d'inspection

La prestation, confiée à l'entreprise **INFOTRON**, a été réalisée du 11 au 13 aout 2014. D'autres expérimentations ont été réalisées avant cette date par la société **Air Marine** (été 2013 & 2014). Le traitement des images a été réalisé

Figure 10 : *Levé topographique de la conduite (à gauche) en crête et tronçon de conduite en tranchée forestière (à droite).*

Figure 11 : *Drone au départ à l'usine devant la tranchée (à gauche) et au départ depuis le versant opposé (à droite).*

par le **SERTIT**, dans le cadre de son partenariat avec EDF pour traiter des prises de vues par drones.

L'inspection présentée ici a été réalisée au moyen d'un drone **contrarotatif** de 20 kg et d'1.80 m de diamètre rotor, équipé d'un appareil photo réflex de 16 millions de pixels. Les vols ont été réalisés à hauteur constante de 50 m de la conduite. Des essais complémentaires de prises de vues ont été réalisés, en infrarouge thermique à titre exploratoire avec le drone et en photos latérales à pied dans la tranchée forestière.

Pour cet essai exploratoire et dans un souci de garder le drone à vue de sa station sol, l'inspection de la conduite a été scindée en 2 parties avec 2 points de décollage pour le drone : le premier à l'usine et le deuxième sur le versant opposé (à quelques centaines de mètres de l'usine) accessible depuis une route.

La Direction Générale de l'Aviation Civile a été consultée pour cet essai et a donné son accord pour sa réalisation.

III.2.2. Restitution

A partir des photos prises par le drone, **une orthoimage en vue de dessus ainsi qu'un modèle numérique de surface ont été réalisés sur toute la conduite.**

La bonne qualité du rendu de l'orthoimage permet ainsi de visualiser l'intégralité de la conduite et n'a pas nécessité d'évolution en montagne dans cette zone dangereuse. Le rendu est illustré par les extraits suivants.

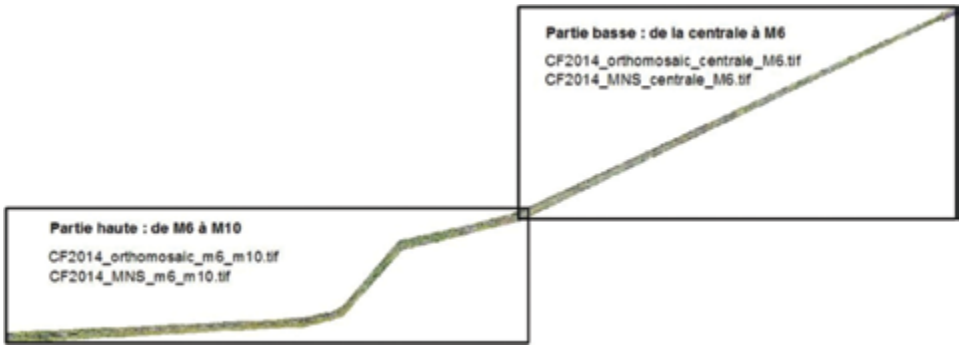

Figure 12 : *Tableau d'assemblage de l'orthoimage et du MNS.*

Figure 13 : *Extrait de l'orthoimage sur la partie haute de la conduite.*

Figure 14 : *Extraits de l'orthoimage au niveau du massif M6 et dans la tranchée forestière.*

III.3. Traitements exploratoires

Les photos latérales prises à pied permettent de produire **une scène 3D contenant la vue latérale de la conduite en très bonne définition.**

Les prises de vue par drone en infrarouge ont été réalisées avec un capteur dont les valeurs radiométriques ne sont pas constantes dans le temps pour un même point au sol. L'orthoimage thermique en vue de dessus n'est donc pas réalisable à partir de cette acquisition.

III.4. Conclusion

• L'inspection visuelle d'une conduite forcée, longue et fortement dénivelée, est réalisable au moyen d'un drone tout en limitant l'exposition des agents dans les zones à risques.
• Les livrables de cet essai montrent le potentiel de cette technologie pour enrichir le diagnostic réalisé sur la conduite, en complément des moyens traditionnels.
• Les livrables obtenus à ce jour sont une orthoimage en vue de dessus de bonne qualité, associée à son modèle numérique

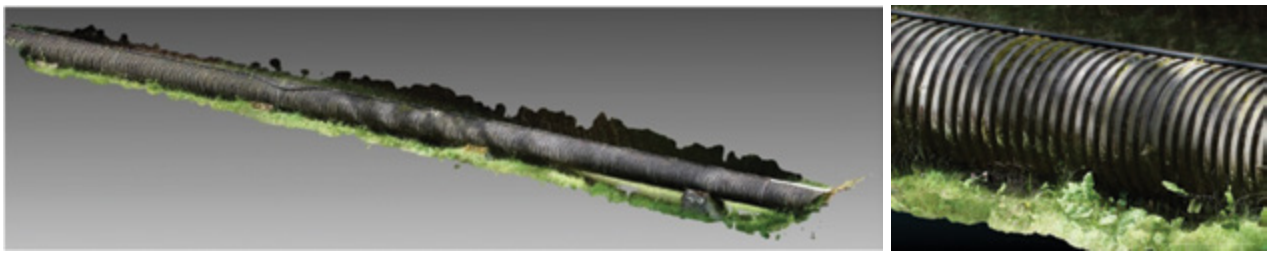

Figure 15 : *Modèle 3D latéral de la conduite.*

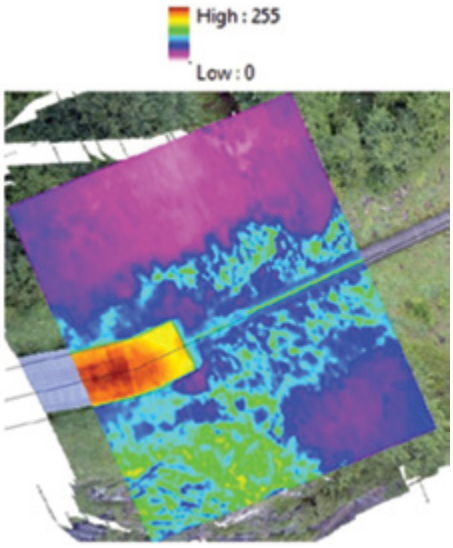

Figure 16 : *Aperçu du produit infrarouge massif et conduite en composition colorée.*

de surface. La détection de désordres potentiels sur la face supérieure de la conduite est donc réalisable.

III.5. Perspectives

• Moyennant l'emploi d'un drone s'approchant plus près au dessus et de chaque coté de la conduite, il serait possible de produire un modèle 3D présentant toute la circonférence visible de l'ouvrage, en très bonne définition.
• Moyennant l'emploi d'une caméra thermique adaptée, il serait possible de réaliser une orthoimage thermique en vue de dessus de la conduite, permettant de détecter ses fuites ainsi que d'éventuelles venues d'eau par le terrain.
• Moyennant un meilleur lien télécom entre le drone et sa station sol, assorti d'une dérogation de la DGAC, il serait possible d'inspecter toute la conduite en 1 unique vol opéré depuis l'usine.

IV. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le développement fulgurant des drones et la miniaturisation des capteurs permettent de réaliser des relevés à partir de points de vue jusque-là difficilement accessibles.

Ce type d'examen et de restitution permet la réalisation de levés de défauts exhaustifs, objectifs, précis et de qualité, dans de bonnes conditions de sécurité. Ces levés permettent de faire un état des lieux de l'état de l'ouvrage et servent de support au suivi de l'évolution des pathologies éventuelles.

Cependant, la plus value d'utilisation de ces outils (moyen de prise de vue, détection automatique de défauts, restitution) sera définitivement acquise lorsqu'une définition précise et homogène des défauts à observer sur les ouvrages et de leur format de restitution aura été établie, afin d'obtenir des restitutions homogènes entre les différentes techniques d'examen.

Enfin, si ces techniques semblent faciles d'accès, l'expérience montre qu'il faut rester extrêmement vigilant quant à leur mise en œuvre pour maitriser le niveau d'incertitude final. En effet, chacun des paramètres de la chaine d'acquisition et de traitement a une influence sur le résultat final.

EDF se positionne comme utilisateur pionner des systèmes de drones. Ces nouvelles techniques présentent aujourd'hui un potentiel majeur pour l'inspection des ouvrages hydrauliques d'EDF.

V. REMERCIEMENTS

Remerciements au SERTIT, centre de transfert technologie à Strasbourg, pour son appui sur le traitement des données acquises par systèmes de drones.

Remerciements à Louis Guingot et Christophe Poirier, respectivement Responsable Génie Civil à EDF et Architecte Réseaux & Sécurité , qui ont impulsé les premières inspections de conduites forcées par systèmes de drones.

Remerciements aux exploitants d'EDF qui ont rendu possible les tests et examens présentés dans cet article.

Enfin, remerciements aux opérateurs de drones (Diades, Infotron et Air Marine) qui ont participé aux essais et examens en collaboration avec les équipes EDF.

VI. REFERENCES ET CITATIONS

L. Guingot, C. Poirier, Jp. Roche & F. Mauris (2013) — The Use Of Pilotless Drones At Edf's Hydraulic Works. *The International Journal Of Hydropower & Dams.* **octobre**