

Utilisation des drones pour la surveillance des ouvrages de production d'EDF dans le domaine du génie civil

■ Rémy BOUDON - Philippe REBUT - Julien MONNERIE - Nicolas JANVIER - Michel TROUILLET - Florian MAURIS - Patrice SCHARFF
Jean-Pierre ROCHE - Didier BOLDO - Arnaud DURAND

Cet article présente les études en cours, menées par le service topographie de la DTG, unité de mesures et d'expertises au sein de la DPIH (Direction production et ingénierie hydraulique) d'EDF, sur l'utilisation des drones pour la réalisation des mesures sur les ouvrages de production d'électricité.

MOTS-CLÉS

Drone, UAV, Lidar, barrage, digue, ouvrages hydro-électriques, glissement de terrain, auscultation photogrammétrique



Figure 1. Situation de la zone relevée

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. Un projet d'étude de ces technologies a débuté en 2012 afin de proposer de nouveaux outils intégrés (imagerie, mesures, traitement et capitalisation des données) permettant une surveillance globale et précise de milieux environnementaux et de structures situés dans des zones parfois inaccessibles par les outils actuels.

Les opportunités d'utilisation sont les suivantes (liste non exhaustive) :

- Inspection visuelle, surveillance :
 - visite des conduites forcées, vérification de la mise en sécurité d'organes, vannes,
 - inspections des barrages, digues, aéro-réfrigérants, cheminées d'équilibre, ouvrages isolés,
 - suivi d'évolution des milieux (herbiers, sédimentation d'îlots...), hydro-morphologie, reconnaissance en rivière, cartographie des laisses de crues,
 - surveillance de zones particulières inaccessibles : glissements de terrain, failles...
 - niveaux d'eau en rivière.
- Topographie, cartographie, reconstruction 3D :

- photogrammétrique numérique automatique par corrélation d'images,
- Lidar embarqué.
- Mesures, prélèvements et télé-relevé :
 - Récolte de données : manteau neigeux, thermométrie, hygrométrie, modélisation des matières en suspension...
 - Analyses thermiques et chimiques dans les panaches : polluants, gaz, particules...
 - Thermographie infrarouge : transformateurs, fuites, thermique de surface des plans d'eau.

Le but est soit d'atteindre des zones inaccessibles par les moyens actuels, soit de remplacer des techniques actuelles par des moyens plus rapides, plus sûrs, moins polluants et moins coûteux.

Dans cet article nous nous limiterons à la présentation des études en cours et des perspectives dans le domaine de la topographie, de la cartographie et de la reconstruction 3D. Ces études ont porté sur la réalisation de plans topographiques, le suivi de terrassements et la surveillance d'ouvrages par relevé "surfacique".

Réalisation de plans topographiques

■ Tests sur le canal d'une usine hydroélectrique

Un test sur l'utilisation des drones pour la réalisation de plans topogra-

phiques a été réalisé en 2013 sur le canal d'amenée à proximité d'une usine hydroélectrique (figure 1) sur une zone qui avait déjà été relevée par lever terrestre (profils), par photogrammétrique aérienne à basse altitude et par Lidar aérien.

Cette zone s'étend sur 32 ha et une longueur de 1.6 km. L'objectif de cette expérimentation était d'estimer la précision des données topographiques acquises par ce type de système, l'étude s'est articulée autour de deux axes :

- l'acquisition des prises de vues,
- l'exploitation des données.

La société Delair-Tech a été retenue pour réaliser les prises de vues, la prestation photogrammétrique (calibration du capteur, stéréopréparation, aérotriangulation et restitution) a été confiée à la société CEMAP.

Le drone utilisé par la société Delair-Tech est le modèle DT-18 (figure 2) composé de :

- un mini-drone électrique pouvant embarquer une charge utile maximale de 2 kg, sa longueur est de 1,18 m pour 1,75 m d'envergure ; il peut parcourir une distance maximale de 100 km, ou rester en l'air deux heures avec une vitesse de croisière de 50 km/h,



Figure 2. Le drone Delair-Tech DT 18



- une charge utile de prise de vues intégrant une caméra industrielle (capteur global shutter CCD 2444 x 2048 pixels, optique avec une distance focale de 12 mm) ainsi que l'ensemble des composants électroniques nécessaires au déclenchement et au stockage des prises de vues. La limitation actuelle du système est le temps d'écriture de l'image sur la carte SD, 1,6 seconde, ce qui n'autorise que la prise d'une photographie toutes les 2 secondes,
- une station au sol est en permanence en communication avec le drone. Le plan de vol est transcrit dans le logiciel de programmation et de suivi de vol, ce logiciel permet à la fois de définir au préalable la trajectoire à respecter par le drone mais aussi de la modifier en temps réel.

Préalablement à la prise de vues, des points de calage au sol, environ 57, ont été matérialisés et mesurés par méthode GNSS différentiel. Ce sont soit des points durs comme des angles de murs ou des regards, soit des cibles ou des marques de peinture. Un pivot a été rattaché à 5 stations du RGP en une session de 7 heures, les autres points ont été mesurés à partir de ce pivot, l'incertitude moyenne de détermination est de l'ordre de 2 cm.

Le vol a été réalisé selon les paramètres suivants :

- Hauteur de vol : 150 m (scénario S2+),
- Taille de l'image au sol : 105 x 88 m,
- Taille du pixel au sol : 5 cm,
- 4 bandes de vol.

Deux passages ont été réalisés après avoir réajusté les paramètres de la caméra. Après tri final, 563 clichés ont été retenus.

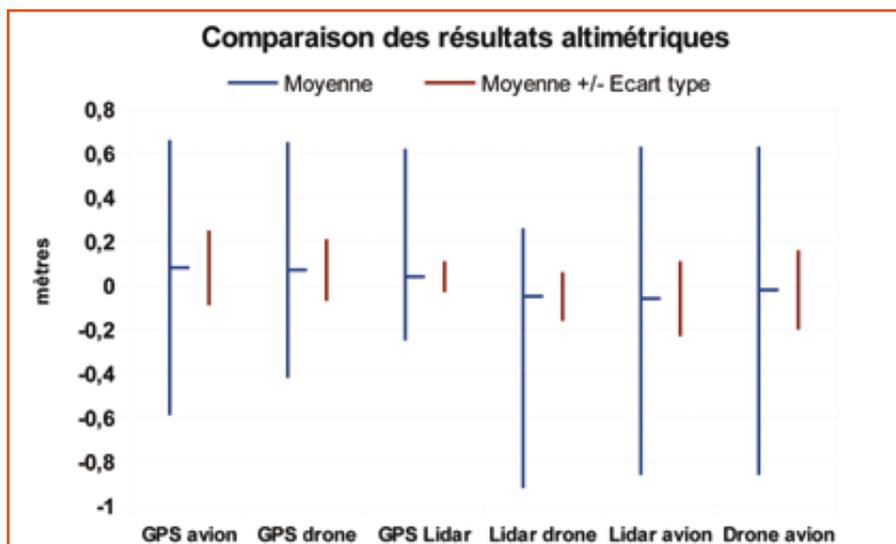
La calibration de la caméra a été effectuée après l'acquisition des prises

Calculs d'aérotriangulation

Nombre de points d'appui	Nombre de clichés	EMQ planimétrique (m)	EMQ altimétrique (m)
57	230	0.01	0.05
57	115	0.02	0.07
39	230	0.01	0.06
19	230	0.02	0.06
19	115	0.02	0.09
9	230	0.02	0.09
9	115	0.04	0.16

de vues sur un site approprié par la société CEMAP. En revanche, la stabilité de la caméra durant le transport reste inconnue. Plusieurs calculs d'aérotriangulation ont été effectués en faisant varier le nombre de points d'appui et le nombre de clichés utilisés. La restitution est effectuée à partir du calcul avec 57 points d'appui et 230 clichés, les produits suivants ont été livrés :

- MNT (modèle numérique de terrain) avec un pas de 1 m,
 - MNS ou MNE (modèle numérique de surface ou d'élévation) avec un pas de 10 cm,
 - profils en long et en travers,
 - orthophotoplans avec une taille de pixel au sol de 5 cm.
- Les résultats ont été analysés en comparant les résultats avec ceux obtenus par les autres méthodes. Les



Comparaisons des résultats altimétriques (valeurs en mètres)

Comparaison	GPS - Avion	GPS - Drone	GPS - Lidar	Lidar - Drone	Lidar - Avion	Drone - Avion
Moyenne	0.08	0.07	0.04	-0.05	-0.06	-0.02
Écart-type	0.17	0.14	0.07	0.11	0.17	0.18
Maximum	0.66	0.65	0.62	0.26	0.63	0.63
Minimum	-0.59	-0.42	-0.25	-0.92	-0.86	-0.86

Synthèse des résultats

Méthodes	Plan topographique	MNT	Orthophotographie
	Précision à 1σ plani / alti	Précision altimétrique à 1σ	Qualité visuelle
Lidar	-	± 5 cm / GNSS	-
Avion	± 15 cm / ± 10 cm	± 10 cm / Lidar	Moyenne (argentique)
Drone	± 15 cm / ± 10 cm	± 10 cm / Lidar	Bonne



Orthophoto avion



Orthophoto drone

Figure 3. Comparaison des orthophotos

profils en travers ont permis de comparer les quatre méthodes : lever terrestre par GPS, photogrammétrie aérienne, Lidar, photogrammétrie avec drone. Le tableau page précédente présente les résultats issus des comparaisons altimétriques entre les différentes méthodes de relevés, le relevé au sol par GPS étant la référence.

Il faut considérer ces résultats avec retenue car la densité des MNT est différente selon les méthodes, pour l'avion les points ont été interpolés sur le plan photogrammétrique, pour le Lidar la densité est de 25 cm, pour le drone elle est de 1 m. L'exactitude du relevé par Lidar est la meilleure : sa moyenne est inférieure à 5 cm tandis que celle du drone est de 7 cm et celle de l'avion est de 8 cm.

Une autre analyse a été effectuée en comparant les MNT issus des relevés par LIDAR, drone et avion.

Les moyennes des écarts sont cohérentes avec celles calculées sur les profils en travers :

- Lidar – drone : environ 5 cm,
- Lidar – avion : environ 10 cm,
- Avion – drone : environ 5 cm.

Globalement les écarts entre les méthodes sont similaires soit une précision à 1σ de ± 10 cm, le tableau page précédente synthétise ces comparaisons.

Le terme de précision est entendu comme l'intervalle d'incertitude (probabilité à 68 % en altimétrie et à 39 % en planimétrie), les valeurs



Figure 4. Zone du relevé et plan de vol



Figure 5. Prise de vues

ci-dessus reflètent uniquement les tests réalisés sur ce canal.

Les orthophotos sont de meilleure qualité avec le drone en raison d'un vol à plus basse altitude et à une période plus favorable (figure 3).

Sur le plan économique et sur ce cas concret, le prix de ces méthodes ramené à l'hectare est très proche pour le Lidar et la photogrammétrie aérienne et plus élevé pour le drone. Le Lidar et la photogrammétrie aérienne sont des techniques éprouvées et exploitées en production. Le coût plus élevé du drone s'explique par le caractère expérimental de la prestation, il faut aussi noter que la prise de vues par drone nécessite plus de points de calage au sol qu'une prise de vues par avion.

En conclusion de ce test on peut retenir que la photogrammétrie par drone peut fournir des MNT ou MNE avec une précision d'une dizaine de centimètres sur des zones de taille moyenne, trop étendues pour du lever au sol et pas assez importantes pour



Figure 6. Le drone Gatewing X 100

mettre en œuvre une photogrammétrie aérienne ou un relevé par Lidar.

■ Réalisation d'un plan topographique

Pour des besoins de délimitation du domaine concédé d'une usine hydro-électrique un plan topographique à l'échelle du 1/1000 couvrant une zone de 32 ha (800 x 400 m) (figure 4) a été réalisé en 2014 à l'aide d'une prise de vues aériennes effectuée par un drone. Il ne s'agit pas d'une expérimentation mais d'un relevé topographique opérationnel.

La prestation a été confiée à la société CEMAP qui a réalisé la stéréopréparation et la restitution photogrammétrique. CEMAP a fourni l'appareil photo calibré qui est intégré dans la nacelle du drone mis en œuvre par une société spécialisée. Ce mode de fonctionnement a été efficace, chacun restant dans son domaine de compétence. En raison de la météo (vent, pluie) la prise de vues a été reportée





deux fois, ce qui a amené un changement de prestataire: AIRDRONE puis ACL Process (figure 5).

Il faut noter que le survol du poste électrique haute tension de RTE n'a pas été possible, aucun drone n'est autorisé à survoler ce type d'installation.

Cette prestation a été satisfaisante et montre le caractère opérationnel de la réalisation de plans par photogrammétrie à partir de prises de vues effectuées par un drone. Elle a aussi montré que le coût de cette méthode est similaire à la prise de vues par avion et inférieur à celui d'un lever au sol pour ce type de plan et de surface.

Suivi de chantier de terrassement

En 2012, le site de construction d'une centrale nucléaire par une filiale d'EDF en Angleterre s'est doté d'un drone à voilure fixe, Trimble Gatewing X100 équipé (figure 6) d'une caméra Ricoh GRD IV, pour réaliser des prises de vues aériennes du chantier à des fins de communication.

Dans le prolongement de cette activité il a été envisagé d'utiliser ce système pour établir des plans par photogrammétrie pour le suivi des terrassements. Pour évaluer la précision que l'on peut obtenir avec ce matériel on a effectué des comparaisons de MNT obtenues par photogrammétrie aérienne par avion, par lever GNSS au sol et à partir des photos réalisées avec le drone.

Les clichés ont été réalisés avec le drone selon 3 bandes en un vol avec une hauteur de 100 m et un autre vol avec une hauteur de 150 m, 32 points de calage au sol (points de canevas, sondages géotechniques, cibles) ont été mesurés par GNSS. Les données ont été traitées par le service topographique d'EDF avec le logiciel de photogrammétrie PIX4D pour obtenir des MNT.

Une première comparaison a été effectuée entre le MNT obtenu par photogrammétrie aérienne et plusieurs petites zones relevées au sol par GNSS, les écarts observés sont de ± 7 cm à 1σ ce qui valide la précision attendue sur le MNT issu du plan photogrammétrique. La comparaison suivante (figure 7) a été faite entre le MNT issu de la prise

de vues aérienne (hauteur de vol 600 m et pixel au sol de 4 cm) et celui issu de la prise de vues par le drone (hauteur de vol 150 m et pixel au sol de 5 cm), la distribution des écarts obtenus est excentrée d'environ 10 cm, ce qui peut s'expliquer par des dates de relevés très espacées et une pousse de la végétation entre les deux acquisitions. Même avec tous les points de calage pris en compte dans le calcul, un biais global subsiste avec un effet de vague dont 75 % des écarts altimétriques sont répartis entre - 25 et + 25 cm.

Cette étude a une nouvelle fois montré la nécessité de porter une attention particulière au nombre de points de calage au sol, à la qualité des prises de vues et au calibrage de l'appareil photo. Elle a également mis en avant la difficulté d'obtenir en photogrammétrie la surface du sol et non pas le dessus de la végétation. Une autre limitation est apparue avec les traitements informatiques qui se sont révélés extrêmement longs en temps de calcul et gourmands en performance machine. L'intérêt de l'acquisition par drone sur un chantier de terrassement sera de permettre un suivi de l'avancement des travaux avec des prises de vues fréquentes sur des zones de travaux ou sur l'ensemble du site. Sur des chantiers similaires le recours à la photogrammétrie aérienne était précieux pour suivre l'évolution des travaux et archiver des états des lieux, mais limité en raison de sa difficulté de mise en œuvre (déplacement d'un avion) et de son coût. On ne pourra

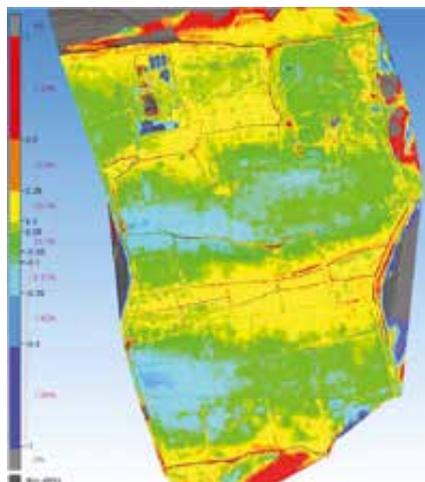


Figure 7. Comparaison MNT drone et avion

cependant envisager l'utilisation de ces relevés pour réaliser des métrés de terrassement dans un cadre de relations contractuelles entre le maître d'œuvre et les entreprises que lorsque tous les paramètres auront été maîtrisés. Ils seront complémentaires aux moyens de topographie classique (GNSS, Tachéomètre, Scan Laser) compte tenu de l'aléa météo.

Surveillance d'ouvrages

Le suivi de l'évolution des boursouffures du parement aval d'un barrage construit en pierres appareillées est effectué par topographie sur des cibles ponctuelles et par un relevé "surfaccique" de l'ensemble du parement par lasergrammétrie terrestre avec une précision centimétrique. Ce barrage est situé à une altitude de 2050 m, a une longueur en crête de 123 m et une hauteur de 20 m.

Le relevé par lasergrammétrie effectué en 2013 (figure 8) a servi de référence pour une expérimentation de relevé photogrammétrique par drone. L'objectif était d'obtenir la meilleure précision possible sur la réalisation d'un MNT à partir d'une prise de vues par drone en minimisant le nombre de points de calage au sol.

La société SINTEGRA a été retenue pour l'acquisition des photos par drone (scénario S1) et la fourniture d'un MNT. La prise de vues a été réalisée avec



Figure 8 Le scanner laser Riegler



Figure 9. Le drone DJI



Figure 10. Cibles de recalage

un drone DJI à voilure tournante et 6 hélices (figure 9), l'autonomie de 10 minutes n'est plus que de 5 minutes à 2000 m d'altitude. Le capteur était un Canon EOS M 18 millions de pixels avec une focale de 50 mm.

Le premier vol a échoué en raison de la densité de l'air moins importante en altitude, la portance est réduite de 20 %. Une deuxième mission a été effectuée avec un système allégé et des hélices avec un pas plus important. Le deuxième vol a été effectué selon 4 axes de prises de vues obliques (axes quasi perpendiculaires au parement du barrage), 111 photos ont été retenues, et 6 axes de prises de vues verticales, 206 photos ont été retenues. La taille du pixel sur le barrage était de 5 mm, le recouvrement de 80 % entre clichés. Pour le recalage des clichés, 11 cibles ont été posées sur le barrage et 4 sur les piliers topographiques à l'aval du barrage (figure 10).

Le traitement a été fait par la société SINTEGRA. La caméra n'étant pas métrique, sa calibration a été faite sur le jeu de données, le MNT obtenu présentant un effet de "bombé" une autre calibration de la caméra a été réalisée sur un banc d'étalonnage. Le logiciel

MIC MAC développé par l'IGN a été utilisé pour ce traitement selon les trois phases suivantes : liaison par autocorrélation, aérotriangulation et extraction du nuage de points. La corrélation automatique a bien fonctionné dans ce cas très favorable, compte tenu de la texture du parement et de l'homogénéité de la zone.

EDF a fait appel aux compétences du SERTIT (Service Régional de Traitement d'Images et de Télédétection) pour travailler sur le traitement de ces données. L'écart moyen obtenu en comparant le MNT obtenu par le drone et celui obtenu par lasergrammétrie servant de référence est de 1,7 cm, avec une erreur moyenne quadratique de 1,5 cm et des écarts maximums allant jusqu'à 3 cm (figure 11).

Cette expérimentation a permis de mettre en avant plusieurs problématiques : sensibilité au vent et à l'ensoleillement, vol en altitude, redondance par rapport au risque de défaillance du système, calibration de la caméra, temps de traitements informatiques importants...

La précision atteinte pour cette application est insuffisante par rapport à la lasergrammétrie terrestre qui assure

une précision centimétrique et permet de détecter des évolutions sur les boursoffures du parement de ce barrage. L'accès à des précisions centimétriques semble possible mais contraignant dans l'état actuel des techniques : nombre de points d'appui, qualité et stabilité de la caméra, présence de végétation sur d'autres types d'ouvrages (digue, glissement de terrain...).

Perspectives

À la suite de ces tests prometteurs, la réalisation de plans topographiques à partir d'une prise de vues aériennes par drones est opérationnelle. Pour la surveillance d'ouvrages le test effectué a montré les limites actuelles de l'utilisation des drones. Le service topographie d'EDF - DTG poursuit aujourd'hui ses études sur l'utilisation des drones pour la surveillance d'ouvrages selon les axes détaillés ci-dessous.

■ Choix de sites de tests

L'objectif était de faire un inventaire en collaboration avec les autres services d'EDF des différents types d'ouvrages sur lesquels la technologie de relevé par drone présente un gain vis-à-vis du linéaire à surveiller : digues, canaux, berges... ; cet inventaire a servi à sélectionner deux ouvrages types sur lesquels les expérimentations futures seront menées. Les paramètres pris en compte dans ce choix sont :

- la facilité d'accès,
- site devant être représentatif du maximum de cas rencontrés sur les ouvrages EDF,
- hétérogénéité des matériaux rencontrés : végétation, béton, rochers,
- cinétique des défauts (pour un glissement),
- taille de l'emprise de l'étude,
- situation géographique,
- historique des désordres observés sur le site.

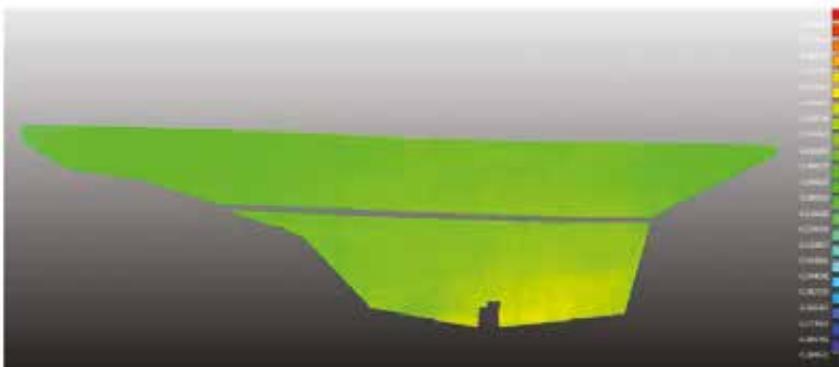


Figure 11. Comparaison MNT photogrammétrie par drone et lasergrammétrie



Figure 12. Digue d'un canal



Figure 13. Glissement de terrain

La digue d'un canal et un glissement de terrain ont été retenus (figures 12 et 13).

■ **Test de nouveaux matériels : caméras calibrées, Lidar**

Les appareils photos utilisés aujourd'hui sur les drones ne répondent pas aux exigences des caméras métriques traditionnellement utilisées pour la photogrammétrie (stabilité géométrique, vitesse d'acquisition...). La démarche a consisté à lister les caméras photogrammétriques qui pourraient être embarquées à bord d'un drone et qui amélioreraient et fiabiliseraient la précision finale des relevés.

Deux modèles de caméras photogrammétriques spécifiques aux drones ont été identifiées, il s'agit de la PHASE ONE IXU sortie cet été et du prototype de l'AR CAMLIGHT de l'IGN. Des expérimentations sont d'ores et déjà à l'étude. En complément de la photogrammétrie, la technique Lidar embarquée sur drone est suivie de près pour les applications d'auscultation. L'inventaire sur les sites d'EDF a montré que tous les ouvrages comportaient au moins une zone enherbée. L'intérêt du Lidar est de pouvoir récupérer les derniers retours du signal qui traverse la végétation et qui s'approche donc au mieux de la surface nue du sol. Le Lidar permettrait de mesurer directement la surface du sol et non pas le dessus de l'herbe comme la photogrammétrie le fait. Il existe de nombreux Lidar aéroportés pour les avions, mais aucun ne peut être directement transposé dans un drone à cause du volume trop important, d'un

poids trop élevé, d'une consommation électrique élevée...

Après étude du marché deux systèmes spécifiques pour les drones sont en cours de commercialisation, mais seul le Riegl VUX-1, apparu cette année, a une précision suffisante pour nos applications d'auscultation. Nous avons pu participer à l'expérimentation réalisée pour la SNCF directement avec le fournisseur RIEGL et leur autogyre. Caractéristiques : 500 000 mesures/seconde, poids environ 4 kg, précision annoncée 25 mm. Les données de cet essai sont en cours de traitement.

■ **Travail sur les algorithmes de traitement de données avec le SERTIT**

Suite à la coopération réussie en 2013 avec le SERTIT, il a été mis en place une convention de partenariat pour les expérimentations et les développements futurs. Cette convention est globale et dépasse le champ de la topographie (inspection de conduites, herbiers...). Les sujets prévus pour 2014 en topographie dans le cadre de ce partenariat et avec l'appui de la direction R&D d'EDF, concernent le développement d'algorithmes de détection de changement spécifiques et l'appui pour des expérimentations drone en photogrammétrie et Lidar sur les sites test.

Les relevés par drone présenteraient une avancée notable s'il était possible de limiter au maximum ou de s'affranchir des cibles topographiques, des mesures au sol et du besoin d'un géoréférencement précis d'une manière générale (limite du GNSS pour certains sites encaissés...). Les développements EDF - SERTIT se concentrent ainsi sur des algorithmes de détection parfaitement adaptés aux phénomènes physiques à détecter (fontis, boursofflure...) à partir de relevés grossièrement recalés entre eux. Les nuages de points 3D pouvant être issus d'un relevé par photogrammétrie comme d'un Lidar embarqué sur un drone. Un capteur Lidar spécifique est également à l'étude.

Un premier algorithme avec différents paramétrages a été testé sur les campagnes de mesures réalisées sur le barrage (paragraphe 3). Les résultats sont très prometteurs. Les développements vont se poursuivre en 2015 avec

notamment un projet de fin d'études d'ingénieur sur le sujet.

Conclusion

Le développement fulgurant des drones et la miniaturisation des capteurs (caméras métriques, GNSS miniature, centrales inertielle...) permettent de réaliser des relevés à partir de points de vue jusque-là difficilement accessibles. Les techniques Lidar et photogrammétrie présentent aujourd'hui un potentiel majeur en topographie.

Toutefois, si ces techniques semblent faciles d'accès, l'expérience 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 d'ouvrages. En effet, chacun des paramètres de la chaîne d'acquisition et de traitement a une influence sur le résultat final. De même, la donnée surfacique ne constitue bien souvent qu'un complément aux informations ponctuelles des techniques classiques, et n'est réellement pertinente que dans certains cas.

En outre, les données surfaciques génèrent 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 adapté à la surveillance d'ouvrages. ●

Contacts

- Rémy BOUDON - remy.boudon@edf.fr
- Philippe REBUT - philippe-1.rebut@edf.fr
- Didier BOLDO - didier.boldo@edf.fr
- Julien MONNERIE, Nicolas JANVIER, Michel TROUILLET, Florian MAURIS, Patrice SCHARFF, Jean-Pierre ROCHE - EDF, Arnaud DURAND - SERTIT

ABSTRACT

This article presents the current studies, conducted by EDF Survey Department about the use of drones (UAV) to perform measurements on power generation structures.



scanner Riegl VUX-1 AR CAMLIGHT de l'IGN