

Inspection des ouvrages d'art par drone. Bilan et perspectives des travaux du LCPC

François DERKX*

Université Paris-Est, LCPC, MI, Paris, France

Jean-Luc SORIN

LCPC, MI, Nantes, France

■ RÉSUMÉ

Nécessaire pour garantir le niveau de service et la sécurité des usagers, l'inspection des ouvrages d'art est réalisée très majoritairement de façon visuelle sur l'ensemble de la structure et doit être exécutée en assurant la sécurité des intervenants. C'est pour répondre à ces conditions que des passerelles et des nacelles motorisées ont été développées, en particulier pour observer les zones difficilement accessibles. Or ces équipements sont parfois difficiles, voire impossibles d'utilisation ; c'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux développements de systèmes de vision embarqués sur des drones. Après avoir validé le concept de drone par une expérimentation sur un site réel au moyen d'un aéromodèle d'hélicoptère équipé d'une caméra, nous avons acquis notre propre drone afin de disposer d'une plate-forme pour tester différents dispositifs de vision et d'instrumentation. L'enjeu est de rendre possible les prises d'images qui, une fois traitées, donneront des informations qualitatives et quantitatives des dégradations observées. Après un rappel sur l'organisation de la maintenance des ouvrages, cet article développe l'intérêt d'utiliser des drones pour l'inspection des ouvrages et autres activités d'auscultation et de surveillance, montre le drone acquis par le LCPC et présente des résultats obtenus au cours de deux expérimentations sur des sites réels. Il donne également un aperçu des recherches en cours et de celles à entreprendre pour mener à bien ce projet.

[Structural inspection using unmanned aerial vehicles.
Assessment and perspectives on the LCPC work program](#)

■ ABSTRACT

As a prerequisite to guaranteeing level of service and user safety, structural inspection techniques rely to a great extent on visual assessments that cover the entire structure and that must be performed so as to ensure the safety of inspection personnel. Under these conditions, powered walkways and platforms were created, in particular for the purpose of observing inaccessible zones. Such facilities sometimes prove difficult or even impossible to use ; for this reason, we have focused on developing onboard vision systems for installation on Unmanned Aerial Vehicles. After validating the drone concept by means of in situ experimentation using a camera-mounted model helicopter, we acquired our own drone to offer a means for testing various vision and instrumentation devices. The key to this endeavor is to be able to capture images, which once processed can yield both qualitative and quantitative information on observed degradations. Following a review of structural maintenance operations, this article will discuss the benefit of using Unmanned Aerial Vehicles in structural inspection tasks and other diagnostic and monitoring activities, in addition to presenting the drone acquired by LCPC and providing results obtained during the two experimental programs conducted at actual inspection sites. The article will also indicate the status of current and upcoming research applicable to this project.

* **AUTEUR À CONTACTER :**

François DERKX
francois.derx@lcpc.fr

SURVEILLANCE ET ENTRETIEN DES OUVRAGES D'ART

■ Ouvrages concernés

Rien qu'en France, il existe près de 22 000 grands ouvrages d'art sur le réseau routier national et environ 6 000 ouvrages sur le réseau d'autoroutes concédées.

Qu'il soit géré par L'État, les départements, les villes ou les sociétés d'autoroute ce patrimoine considérable représente des enjeux économiques importants. Aussi pour maintenir le niveau de service d'un ouvrage d'art, garantir la sécurité des utilisateurs et optimiser les travaux de maintenance le gestionnaire doit réaliser avec précision le diagnostic et connaître la pathologie réelle de la structure.

Les ouvrages d'art de l'État font l'objet d'actions de surveillance systématiques [1] et sont maintenus en accord avec l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA) d'octobre 1979, qui a été révisée en décembre 1995 suite à la première campagne IQOA (Image Qualité Ouvrage d'art). Cette instruction précise notamment les objectifs de la surveillance ainsi que ses modalités d'organisation et formalise également le contenu et l'organisation des opérations d'entretien. Elle définit ainsi trois niveaux de surveillance, que nous détaillons dans les paragraphes suivants.

■ Visites de routine

Les visites dites de routine sont des opérations d'inspection menées en continu par les personnels du gestionnaire lorsqu'ils circulent sur les routes. Leurs observations permettent de relever tous les défauts majeurs ou mineurs tels que barrières de sécurité endommagées, drainages obstrués...

■ Visites annuelles

Les visites annuelles sont réalisées par des techniciens qui ont pour objectif la détection des désordres visibles, à partir du sol, de toutes les parties accessibles d'un pont. Tous les trois ans, cette visite annuelle est une visite d'évaluation dénommée visite IQOA ; elle permet de repérer l'apparition de nouveaux désordres parmi plusieurs dizaines de défauts référencés et éventuellement de suivre l'évolution des désordres repérés lors d'une des précédentes visites. Ces visites d'évaluation donnent lieu à une classification de l'ouvrage selon la méthode IQOA.

■ Inspection détaillée

Ces inspections sont réalisées selon l'état de la structure : tous les ans pour les ouvrages dont l'état est alarmant, tous les trois ans pour les ouvrages sensibles, tous les six ans pour les ouvrages normaux et enfin tous les neuf ans pour les ouvrages robustes.

L'objectif de ces inspections est de rechercher la totalité des désordres sur l'ensemble de la structure, jusqu'aux fissures de 0,1 mm pour les ponts métalliques ou en béton précontraint, de 0,4 à 0,5 mm pour les ponts en maçonnerie et de 0,1 à 0,3 mm pour les ponts en béton armé. Ce sont ces inspections qui nécessitent, pour inspecter les zones inaccessibles, des matériels [2] importants, chers et difficiles d'emploi, tels que nacelles et passerelles automotrices (figure 1).

figure 1
Exemple de passerelle
automotrice.



■ Remarques

Au-delà de ces trois niveaux d'inspection, en cas de problèmes particuliers importants, un ouvrage peut être placé sous surveillance renforcée [3] avec mise en place si besoin d'une instrumentation, ou sous haute surveillance avec fermeture de l'ouvrage dès que se déclenchent les alarmes fondées sur un système de surveillance et dans le cas où il existerait un doute sur la sécurité à court terme.

INTÉRÊT DES DRONES

Avec la construction au cours des dernières décennies de structures de plus en plus hautes et de plus en plus grandes, les investigations sont devenues plus compliquées à réaliser. Pour répondre aux nouveaux besoins en matière d'inspection des ouvrages d'art, il est envisagé d'améliorer, voire de transformer profondément les conditions opérationnelles d'inspection décrites ci-dessus et d'automatiser certaines tâches à l'aide de dispositifs de vision embarqués sur un engin volant de type drone.

Les drones encore appelés UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ne sont pas un concept nouveau [4]. Ce sont des aéronefs évolués, pilotables à distance en mode semi-automatique avec des commandes de *haut niveau*, ou entièrement autonomes, assurant dans ce cas des missions programmées. Ils peuvent emporter différentes charges utiles pour effectuer des tâches spécifiques. Leur durée de vol dépend de leur motorisation (électrique ou thermique), de leur capacité à embarquer l'énergie nécessaire (batterie ou essence) et de leur charge utile.

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées s'est fixé une orientation pour évaluer les potentialités offertes par ces engins [5-8], très développés dans le domaine militaire, pour des applications civiles et notamment dans le domaine du génie civil et des ouvrages d'art. L'automatisation d'une inspection d'ouvrages d'art devrait diminuer le coût global des interventions, faciliter le suivi à long terme et accroître les connaissances sur la pathologie des ouvrages. Les gains attendus sont la réduction de la logistique nécessaire du fait que l'on évite l'utilisation des nacelles et des passerelles et par conséquent la diminution de la gêne aux usagers, la diminution du nombre d'intervenants qui n'auront plus à opérer dans les zones à risque et/ou difficiles d'accès. Une inspection automatique présenterait également les avantages d'intégrer la gestion des prises de vues (traçabilité) et de permettre un traitement indépendant du jugement de l'observateur.

■ Apport des drones à l'ingénierie du génie civil

Ce projet intéresse également les organismes comme EDF pour le contrôle des tours aéroréfrigérantes des centrales nucléaires, des pylônes à haute tension et des barrages hydroélectriques. Il peut également servir au contrôle des édifices classés aux monuments historiques et sur lesquels les inspections classiques ne peuvent pas être réalisées.

Hors génie civil, ce concept peut également trouver des utilisations pour les problèmes liés à l'environnement. Nous pouvons citer par exemple l'analyse de la pollution atmosphérique et le suivi de l'évolution de nuages toxiques, la mesure des émissions de gaz à la sortie des cheminées, l'inspection des emplacements souillés par des éléments radioactifs, le suivi de la pollution maritime, la surveillance des feux de forêts, la mesure des mouvements de la terre, la surveillance du trafic routier [9.10]...

VALIDATION DU CONCEPT

Pour valider le concept d'utilisation d'un drone pour l'inspection des ouvrages, nous avons mené une expérimentation [11] sur le viaduc de Saint-Cloud en 2001. Cet ouvrage a été choisi pour sa morphologie, son implantation en zone urbaine, l'importance du trafic supporté et pour l'opportunité qu'il offrait de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux préalablement obtenus lors d'une inspection détaillée normale.

■ Réglementation

En France, il n'y a pas de réglementation formelle concernant spécifiquement les drones civils ; ils sont considérés comme des avions et sont donc ainsi soumis aux directives et autorisation de la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile). Pour pouvoir réaliser cet essai, nous avons donc été obligés de demander une autorisation auprès de la préfecture des Hauts-de-Seine. Une difficulté supplémentaire est apparue du fait que ce viaduc est situé à proximité d'un hélicoptère et cette autorisation nous a été accordée seulement après que la préfecture a recueilli l'avis des diverses autorités responsables. L'ensemble de l'instruction a pris approximativement dix semaines. Nous avons découvert à cette occasion les effets de contraintes légales qui auraient pu constituer un frein important à l'exploitation des systèmes de drone si l'arrêté du 1er août 2007 n'avait pas été mis en place. En substance, cet arrêté stipule que tout aéronef évoluant occasionnellement dans un espace aérien libre et restant en vue du pilote est dispensé de demande d'autorisation.

■ Moyens utilisés

L'expérimentation de Saint-Cloud a été réalisée à l'aide d'un aéromodèle d'hélicoptère radiocommandé dédié aux prises de vues cinématographiques. Cet hélicoptère (**figure 2**) piloté à vue, d'une longueur totale de 1,95 m avec un rotor de 1,80 m était équipé d'un moteur thermique deux temps ; sa masse à vide était de 10 kg et sa capacité de charge était de 2 kg. Il était équipé d'une caméra numérique Tri-CCD de 710 kilopixels avec un zoom optique $\times 10$. Les images ont été à la fois enregistrées à bord de l'hélicoptère sur une cassette au format mini-DV et transmises en station sol, grâce à un transmetteur 2,4 GHz, pour leur visualisation en temps réel.



figure 2
*Vues de l'aéromodèle
d'hélicoptère.*

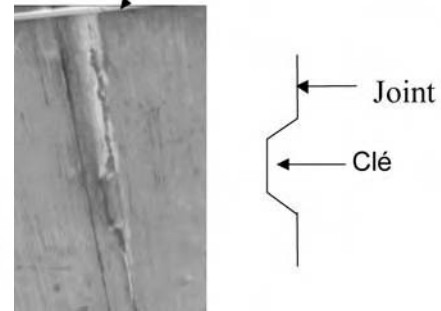
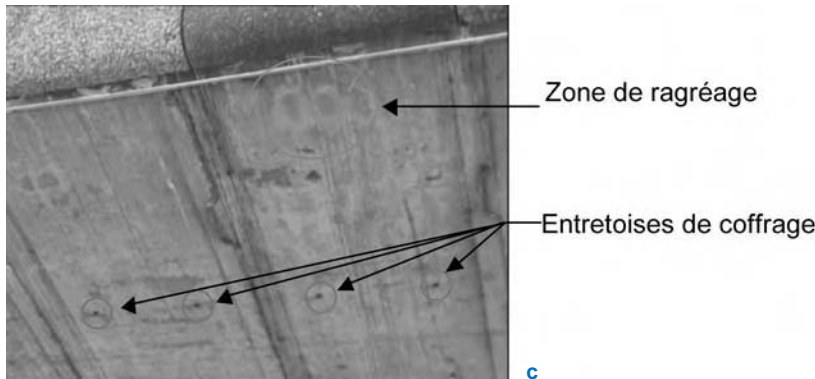
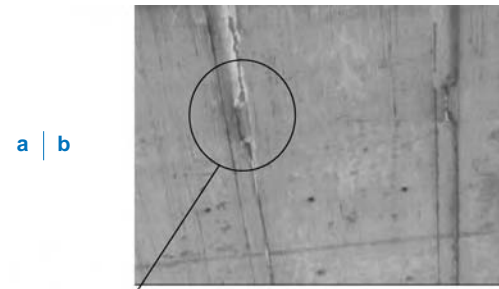
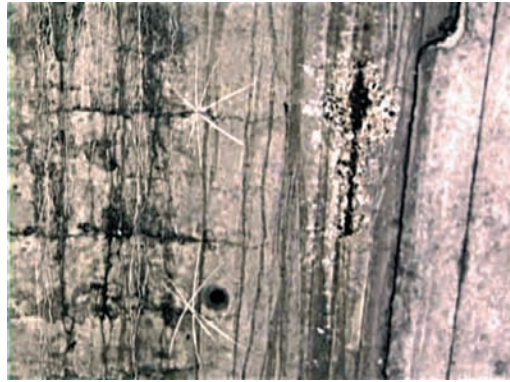
■ Résultats

Un inspecteur d'ouvrage a analysé quelques images extraites de la vidéo enregistrée à bord de l'hélicoptère. Il a pu retrouver, à la manière d'une inspection normale, des désordres se rapportant à des problèmes de pathologies précédemment identifiés. Les **figures 3a à 3c** montrent quelques exemples de ces désordres.

■ Conclusion

Si cet essai a permis de conclure sur la validité du concept d'inspection par drone, il a montré par ailleurs que la qualité des images devait être améliorée, que le pilotage à vue limitait les performances du vol, que la localisation des images sur l'ouvrage était une condition nécessaire et que la réglementation relative aux vols de drones était une contrainte importante dans la mise en place de ce type d'inspection.

figure 3
a : éclatement de béton avec armature verticale apparente corrodée, vraisemblablement dû à une insuffisance d'enrobage
b : visualisation de deux clés d'assemblage des voussoirs
c : exemples de défauts relevés.



PRÉSENTATION DE NOTRE DRONE

Après avoir réalisé un état de l'art sur les drones capables de vol stationnaire et écarté des matériels certes intéressants, mais dont certaines caractéristiques (notamment la charge d'emport et/ou l'autonomie), ou le degré de maturité ne permettaient pas d'envisager un intérêt immédiat en tant que démonstrateur, nous avons choisi le matériel *Copter 1B* développé par la Société Survey-Copter.

Ce matériel [12] comprend un hélicoptère équipé d'un auto-pilote et d'une tourelle gyrostabilisée portant une caméra vidéo et un appareil photo, ainsi qu'une station sol composée d'un pupitre de commande, d'un ordinateur de contrôle et de programmation et d'une source d'énergie électrique.

Cet équipement, basé sur le site du LCPC de Nantes, est opérationnel et bénéficie d'une autorisation exceptionnelle de vol au-dessus de ce site, délivrée par la préfecture de Loire-Atlantique.

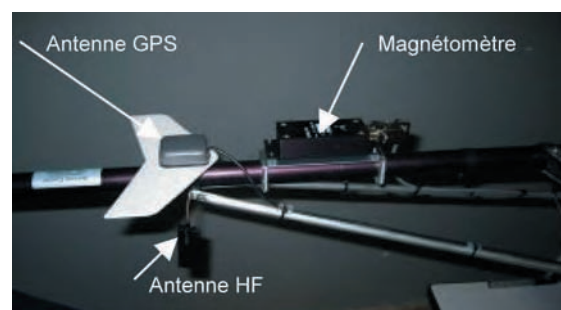
L'HÉLICOPTÈRE

L'hélicoptère (figure 4) est doté d'un moteur thermique deux temps. Le diamètre du rotor est de 1,80 m, la charge à vide de 8,5 kg, la charge d'emport de 5 kg et l'autonomie de vol est de l'ordre de 30 à 40 min. Il est équipé (figure 5) d'une antenne GPS et d'un magnétomètre raccordés à l'auto-

figure 4
Vue du drone.



figure 5
Détail de l'instrumentation.



pilote, d'une antenne et d'un module HF à évansion de fréquences de 5.8 GHz et de 200 mW de puissance pour les transmissions des signaux de contrôle et des images vidéo.

■ L'auto-pilote

L'auto-pilote WePilot1000 produit par la société We-Control est une interface de commande de vol (**figure 6**) permettant de piloter l'hélicoptère en mode assisté, c'est-à-dire avec des commandes intuitives de haut niveau, ou en mode entièrement automatique par programmation de missions. Grâce à l'auto-pilote, la prise en main du drone est quasi immédiate, réduisant de ce fait la formation des opérateurs au minimum, et les tâches pénibles de stabilisation du pilotage classique sont abandonnées au profit du contrôle de missions. L'adaptation de cet auto-pilote sur un hélicoptère exige l'enregistrement préalable des données d'un vol manuel qui sont ensuite exploitées pour synthétiser un contrôleur robuste.

L'auto-pilote se compose d'un processeur de commande de vol de 32 bits et d'une EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) de 8 MB avec un système informatique intégré, d'une centrale inertielle à six degrés de liberté (3 gyroscopes et 3 accéléromètres d'étendue de mesure respective $\pm 100 \text{ degré} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\pm 2 \times g$), d'un GPS, d'un magnétomètre et d'un capteur piézorésistif de mesure de pression d'étendue de mesure de 300 à 1 100 mbar. Il fonctionne (**figure 7**) par fusion de données des diverses mesures à partir de filtres de Kalman étendus et fournit la stabilisation de l'altitude, de la vitesse de commande et de la position en envoyant un signal sur les différents actionneurs.

figure 6
Intégration
de l'auto-pilote.

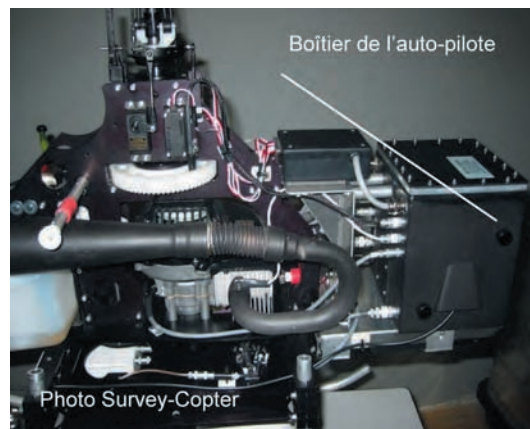
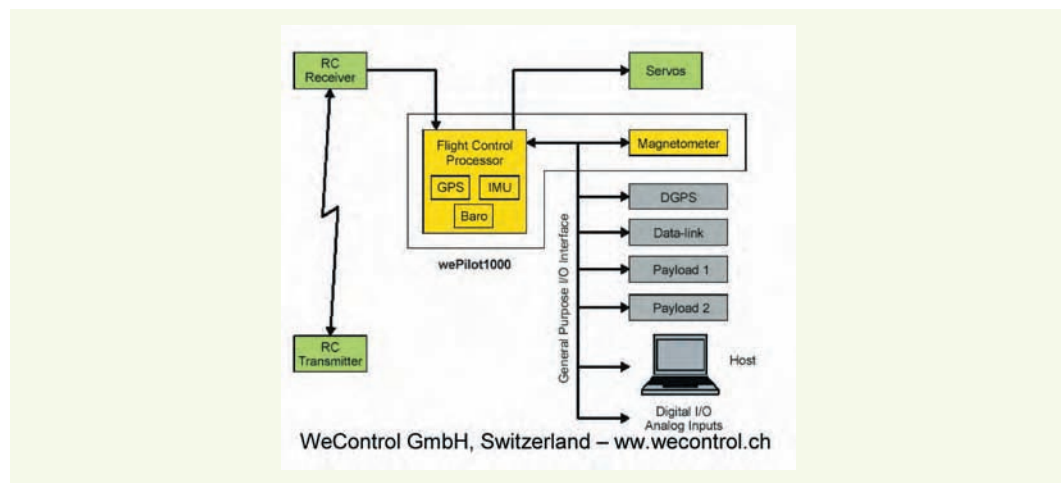


figure 7
Schéma de principe
de l'auto-pilote.



■ La tourelle gyrostabilisée

Cette tourelle (**figure 8**) est fixée sous l'hélicoptère et autorise les mouvements suivant l'axe vertical (angle de lacet ou Yaw) et un axe orthogonal (angle de tangage Pitch). Les deux axes sont gyrostabilisés ce qui permet de conserver l'axe de visée toujours dans la même direction, quels que soient les mouvements indésirables du drone.

figure 8
La tourelle gyrostabilisée.



Cette tourelle permet d'embarquer différents équipements. Actuellement sont installés un appareil photo Nikon de 8 mégapixels et une caméra Sony de 800 kilopixels, mais il est prévu d'embarquer plus tard d'autres instrumentations telles que laser mètre, radar anti-collision, etc.

■ La station au sol

La station au sol se compose d'un pupitre de contrôle couplé à un PC.

› La valise pupitre de commande

La valise pupitre de commande (**figure 9**) regroupe les différentes commandes. Sur la partie gauche celles de la tourelle et de la caméra, sur la partie droite celles de l'hélicoptère avec le joystick de commande, enfin sur la partie supérieure droite se trouvent les connecteurs de raccordement sur le PC, sur le boîtier HF et sur le boîtier d'énergie électrique.

figure 9
Le pupitre de commande.

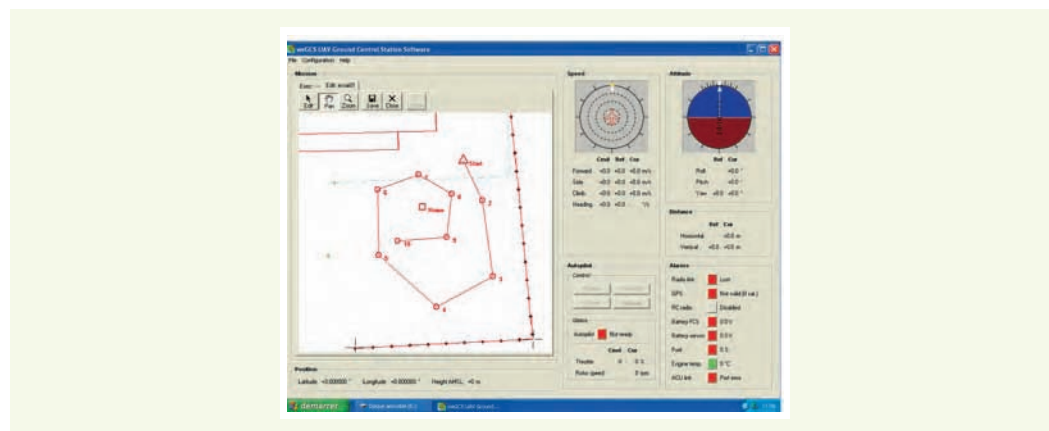


› Le tableau de bord PC

Le PC associé permet de configurer une mission en entrant des points *de passage* ou *stop* sur une carte préenregistrée (**figure 10**) et géoréférencée par quatre points repérés par leurs coordonnées GPS respectives. Les points de passages ou de stop sont ensuite définis directement sur la carte où leurs coordonnées GPS sont connues et il suffit de compléter pour chaque point l'altitude et la vitesse de passage. Deux points spécifiques supplémentaires sont nécessaires : un point *home* correspondant au point de retour automatique du drone en cas de problème et un point *départ* situé à proximité du point de décollage du drone.

Par ailleurs, l'écran présente un certain nombre de fenêtres permettant d'afficher en temps réel les informations utiles à la mission en cours, les paramètres de vol du drone et les alarmes éventuelles.

figure 10
Écran principal.



ESSAIS SUR SITES RÉELS

L'objectif des essais décrits ci-après était de mettre à l'épreuve notre drone, en lui faisant réaliser des inspections d'ouvrages de génie civil existants, mais hors service, pour évaluer sa capacité opérationnelle. Il s'agissait notamment de :

- tester les circuits administratifs pour l'autorisation du vol (réglementation, sécurité, etc.) ;
- évaluer la qualité des images obtenues dans un but d'inspection ;
- juger la capacité du drone à se positionner et à suivre un programme défini.

■ Essai sur le pont de Tonny-Charente

Inauguré en 1842, Tonny-Charente est un des plus vieux ponts suspendus d'Europe. Son tablier s'élève à 23 m au-dessus de la Charente et sa longueur est de 206 m. Il est supporté par trois piles de pierres calcaires et se prolonge par un ouvrage en maçonnerie de 407 m de long constitué de 51 arcades ogivales. Après plusieurs années de service, le pont s'affaissant, il fut soumis en 1883 à une épreuve de chargement avec du sable et... le tablier lâcha. Après avoir été reconstruit à l'aide de nouvelles techniques, il fut réouvert à la circulation en 1885 et ses capacités furent doublées en 1934. Aujourd'hui fermé à toute circulation, il est classé aux Monuments Historiques et attend sa restauration (réfection du tablier, des câbles et de la maçonnerie).

> Objectifs et conditions de l'essai

Le viaduc de Tonny-Charente, proposé comme site d'expérimentation par le Laboratoire Régional de Bordeaux qui en a la charge, offrait l'avantage pratique d'être assez proche du LCPC de Nantes et l'intérêt de présenter deux parties distinctes : une partie métallique et un viaduc d'accès en maçonnerie.

Il a été décidé de visualiser les parties métalliques de l'ouvrage, notamment les têtes de piles afin d'en vérifier la corrosion, les dernières arches du viaduc d'accès en maçonnerie, ainsi que les déchaussements des pierres de taille des quais environnants.

Les essais se sont déroulés sous conditions météorologiques favorables, en mode programmé avec reprise manuelle.

> Résultats

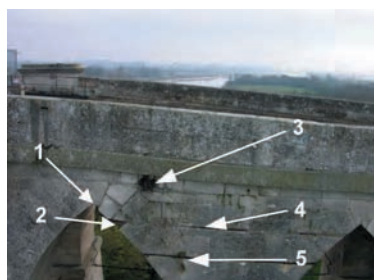
Les commentaires associés à la [figure 11](#) ont été faits à partir de plusieurs prises de vue à l'aide de l'appareil photo sous différents angles et en agrandissant certaines parties pour mieux voir les détails. La photo ci-après de la tête de pylône a été prise du côté aval, côté exposé au vent d'ouest provenant de la mer qui est seulement à quelques kilomètres. On voit très nettement sur le haut du pylône (repère 1) la présence d'une corrosion importante avec décollement du revêtement de protection de surface. Le goujon à gauche (repère 2) présente également une corrosion importante ainsi que les vis de la mordache (repère 3) et l'attache (repère 4). On voit le câble (repère 5) effiloché. L'attache câble porteur/suspente (repère 6) par contre ne présente pas de défaut apparent.

Sur la **photo 12**, on observe un décrochement de la voûte (repère 1), une pierre manquante (repère 2), une obstruction partielle de la grille d'évacuation des eaux pluviales (repère 3). On voit très nettement l'évolution des joints : bons sur la partie haute à gauche et se détériorant sur la partie droite (repère 4). On remarque également la présence de végétation (repère 5) pouvant provoquer une dégradation possible des joints.

figure 11
Vue de la tête de pylône
Zoom sur le repère 5.



figure 12
Vue d'une arche.



■ Essai sur pylônes EDF

Cet essai a été réalisé en partenariat avec EDF R&D en préliminaire à l'inspection d'ouvrages de production (barrage, centrale nucléaire, etc.). Nous avons choisi de réaliser l'évaluation sur deux pylônes architecturaux de grande hauteur, respectivement 72 m (**figure 13**) et 42 m (**figure 14**), sans câble électrique, situés à l'entrée du site d'EDF R&D des Renardières au lieu-dit Montelièvre et proches de deux lignes électriques haute et basse tension (**figure 15**).

Ce lieu d'essais est un espace entièrement clos à la limite de la CTR (Control Terminal Region) et dans la zone dite de la TMA d'Île-de-France (Terminal Area) du fait de la présence d'un aéroport à 4,5 km. Cette localisation particulière a un peu compliqué notre demande d'autorisation que nous avons néanmoins réussi à obtenir.

› Plan de prévention

En application du Décret du 20 février 1992 complétant le Code du Travail, un plan de prévention a été mis en place par EDF R&D, prévoyant l'ensemble des consignes de sécurité à respecter pour les essais ainsi que les horaires des essais.

› Relevés GPS

La définition des plans de vol du drone nécessitant un géoréférencement de l'ouvrage et de la zone d'intervention, un relevé de points de calibration de carte (**figure 16**) a été effectué au préalable à l'aide d'un GPS différentiel de manière à pouvoir programmer ces plans de vol.

› Plan de vol et programmation des missions

Les **figures 17** et **18** montrent des exemples des missions qui ont été programmées autour des pylônes *Fougère* et *Roseau* pour pouvoir monter à une altitude suffisante et faire du *travelling* le long des bras des pylônes.

figure 13
 Pylône de type Fougère
 Conception : I. Ritchie
 (architecte), K. Gustafon
 (BE) RFR.



figure 14
 Pylône de type Roseau
 Conception : M. Mimram
 (architecte), M. Mimram
 (BE) Ingénierie SA.



figure 15
 Lieu des essais et
 implantation des pylônes
 matérialisés sur la figure
 par les deux points noirs.

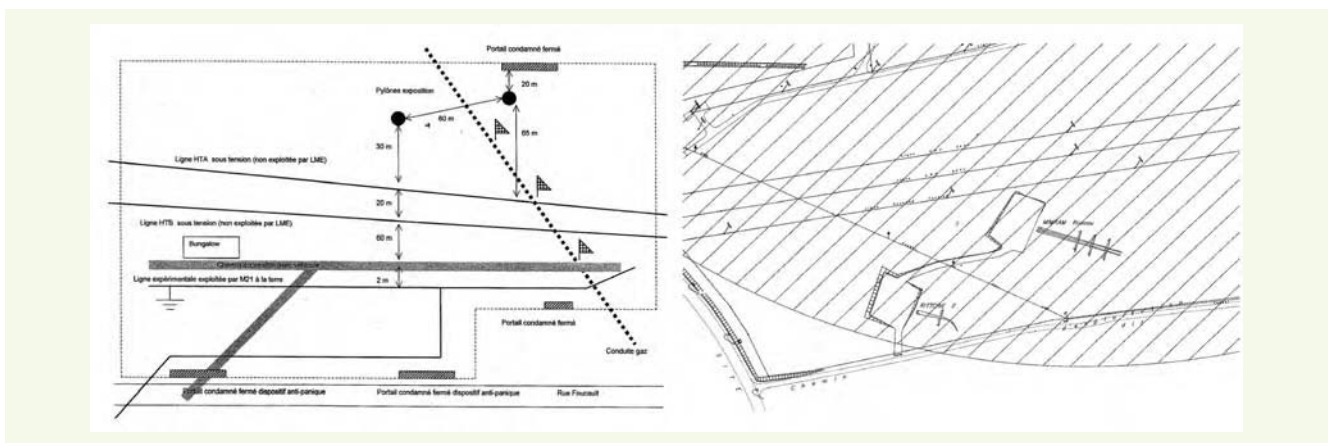


figure 16
Relevé des points GPS du lieu d'intervention.

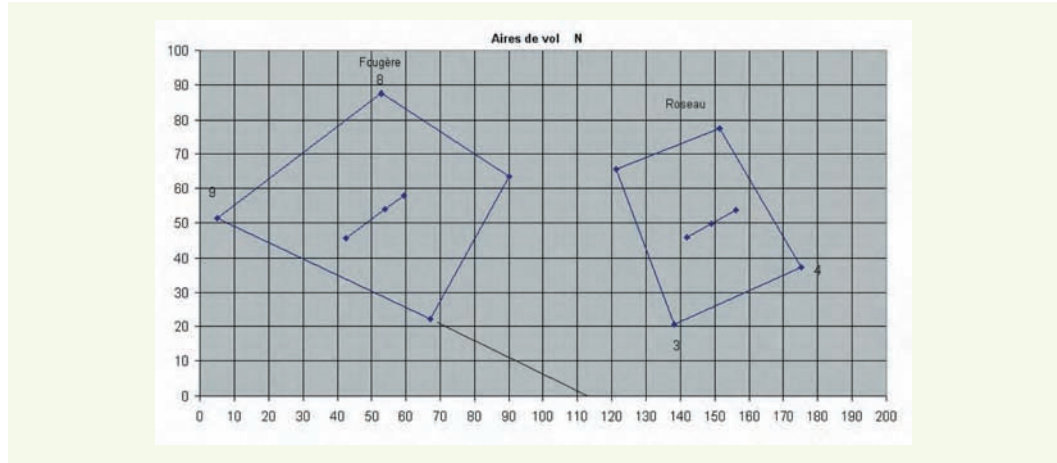


figure 17
Mission autour du pylône Fougère.

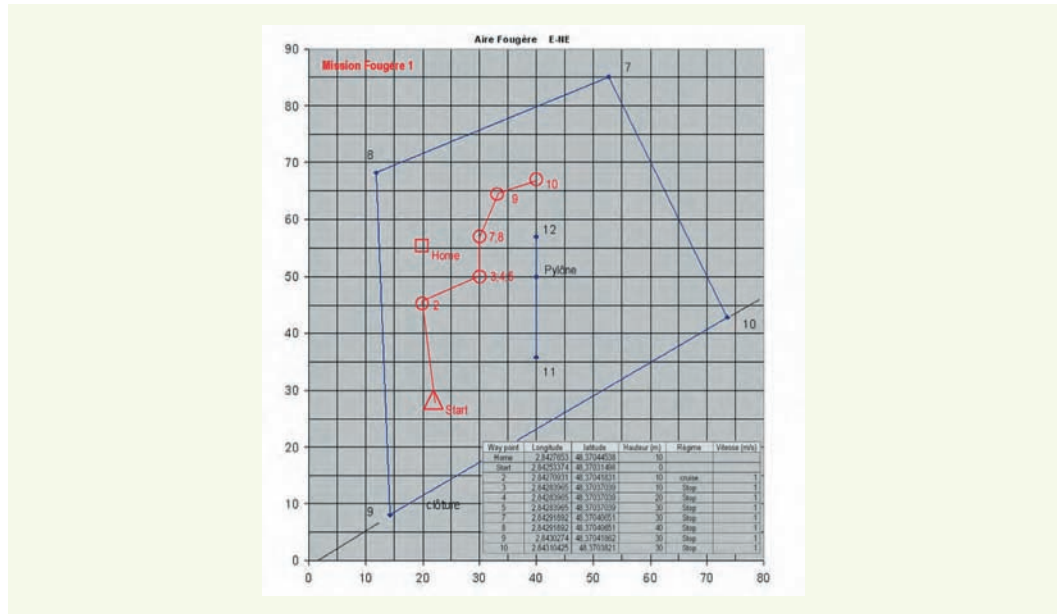
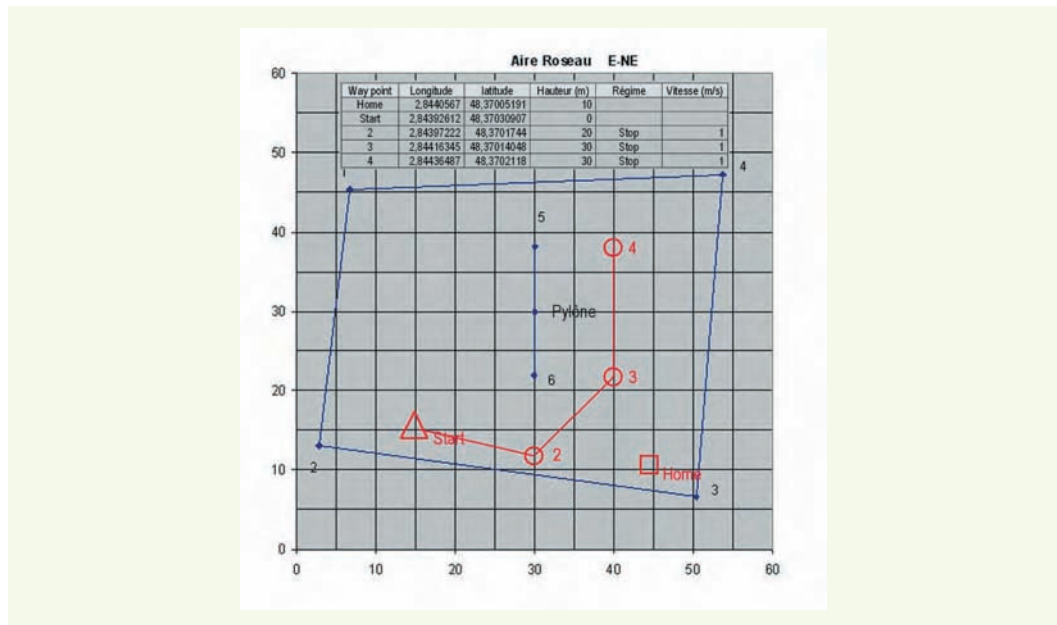


figure 18
Mission autour du pylône Roseau.



> Programme d'essai

Le programme d'essai prévoyait de réaliser sur les deux pylônes une visualisation de quelques éléments d'intérêt comme par exemple les isolateurs, les jonctions fût-bras support de lignes, des isolateurs et des bras porteurs.

Nous avons réalisé sur chacun des deux pylônes les essais en mode automatique à partir des missions programmées. Seule l'orientation du drone a été ajustée manuellement sur les points *stop* des missions.

Les images vidéo prises depuis la tourelle gyrostabilisée, transmises grâce à un canal spécifique à 2,4 GHz, étaient enregistrées au sol sur un mini-DV, tandis que les photographies étaient stockées dans l'appareil photo.

> Résultats sur le pylône Fougère

Les **figures 19** et **20** montrent deux photos de très grande qualité sur lesquelles tous les détails sont parfaitement visibles. Les pylônes étant neufs, aucune anomalie n'apparaît. Il paraît cependant évident que la qualité de ces images permettrait de relever le moindre défaut, comme par exemple des dépôts sur les isolateurs ou des traces de corrosion sur les bras, sur les têtes de boulons, etc.

figure 19
Vue de l'isolateur.



figure 20
*Vue de l'intersection
fût-bras.*



> Conclusion

Nous avons pu positionner correctement le drone aux endroits désirés et obtenir des images de qualité sur lesquelles les niveaux de détail sont satisfaisants. Néanmoins, des flous apparaissent sur les images acquises à une distance de l'ouvrage d'une dizaine de mètres avec un zoom important.

Bien que l'exécution du plan de vol soit automatique, nous sommes restés dans une configuration d'essai avec vol à vue pour pouvoir reprendre la main sur le drone en cas de besoin. Pour des essais

sur un ouvrage très grand, il faudra pouvoir passer à des essais où le vol à vue ne sera plus possible d'où la nécessité de disposer d'un GPS différentiel pour assurer un positionnement plus précis (idem pour l'altimètre).

MESURES DE VIBRATIONS

■ Présentation

L'objectif de ces mesures était de connaître les mouvements vibratoires indésirables subis par le système de prises de vue en conditions de vol. En effet la majeure partie de ces mouvements trouvent leurs causes dans le principe même de fonctionnement d'un hélicoptère qui repose sur des éléments en rotation.

Afin de savoir dans quelle mesure ces mouvements induits contribuent à la dégradation des images, nous avons fait des mesures accélérométriques au moyen d'un accéléromètre (figure 21) fixé sur l'appareil photo. Les essais ont été réalisés au LCPC de Nantes par temps calme, le drone étant en vol stationnaire à une altitude de 10 m.

En étape préliminaire nous nous sommes limités à mesurer les accélérations suivant un axe vertical, car nous avons observé que la composante principale des flous de bougé se faisait suivant cet axe. Ces mesures ont été réalisées pour trois distances focales distinctes correspondant à : zoom rentré, zoom en position médiane et plein zoom.

Pour la mesure des accélérations, la chaîne de mesure était composée d'un accéléromètre piézoélectrique et d'une carte d'interfaçage (figure 22). Cette dernière assurait le conditionnement du signal

figure 21

Accéléromètre fixé sur le sabot du flash.



figure 22

Carte d'interfaçage.



et sa transmission en TCP-IP (Transmission Control Protocol-Internet Protocol) sans fil WiFi (radio sécurisée haut débit).

■ Résultats

L'analyse spectrale (**figures 23 et 24**) des signaux acquis a permis d'identifier certains modes de vibration, d'en calculer les amplitudes (sous Matlab) et de pouvoir ainsi corréler ces résultats avec les flous de bougé observés sur les images acquises.

En particulier des fréquences émergentes apparaissent qui sont vraisemblablement dues au moteur et au rotor principal ainsi qu'aux modes de la tourelle. Des mesures complémentaires devant être effectuées prochainement en ajoutant d'autres accéléromètres permettront de confirmer cette hypothèse.

figure 23
Spectre du signal de l'accéléromètre.

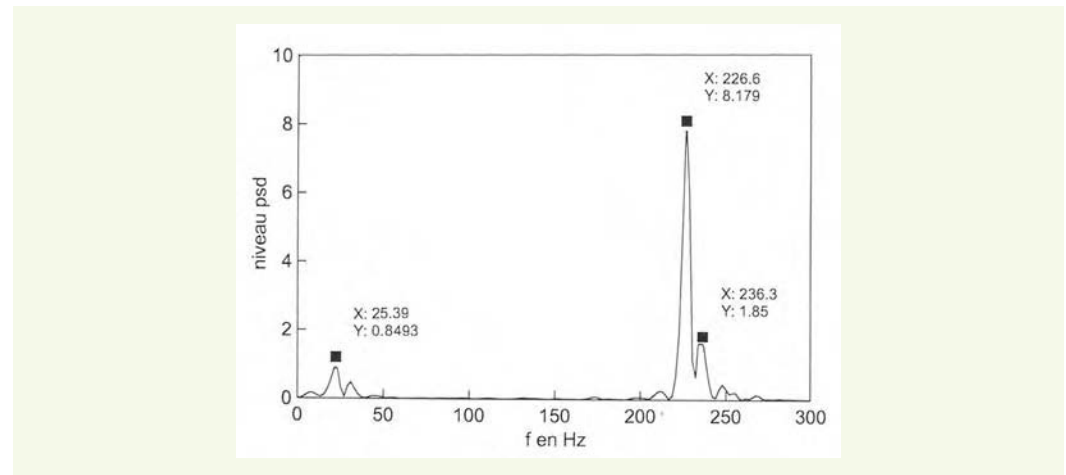
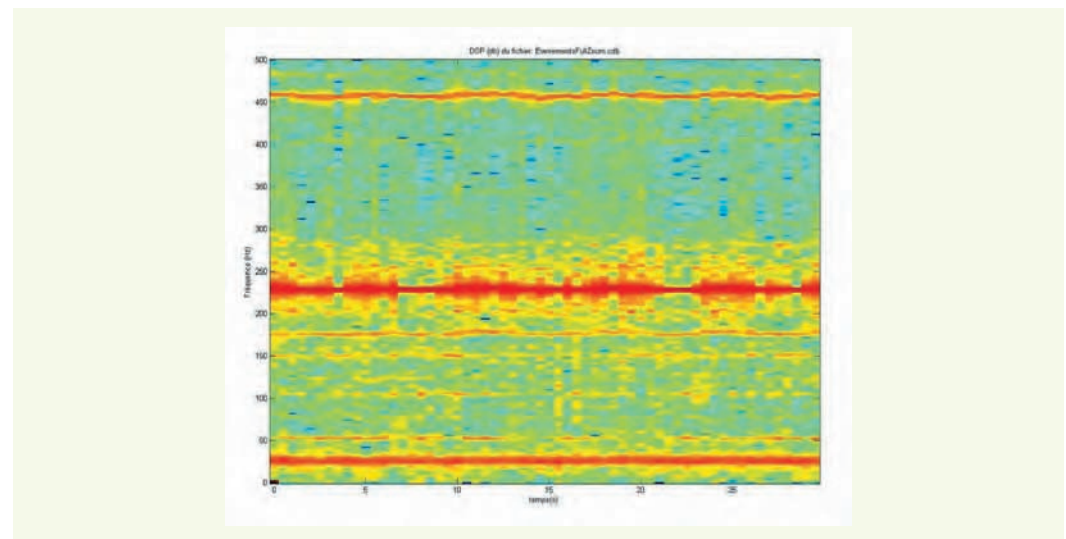


figure 24
Spectre de puissance temps fréquence.



■ Flous de bougés

Pour évaluer les effets de la vibration sur le flou de bougé, nous avons photographié à 10 m une étoile représentée sur une cible test avec des branches de 10 cm de long et des traits de 1 mm d'épaisseur. Le zoom était au maximum dans les deux cas de prises de vue que ce soit au sol (drone moteur arrêté, posé sur un piédestal) (**figure 25**) ou en vol (**figure 26**). Le flou de bougé mesuré est de 4,3 mm.

figure 25
Cible photographiée
au sol.

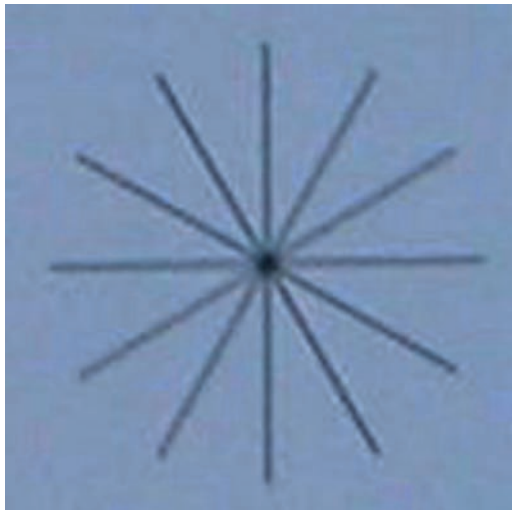
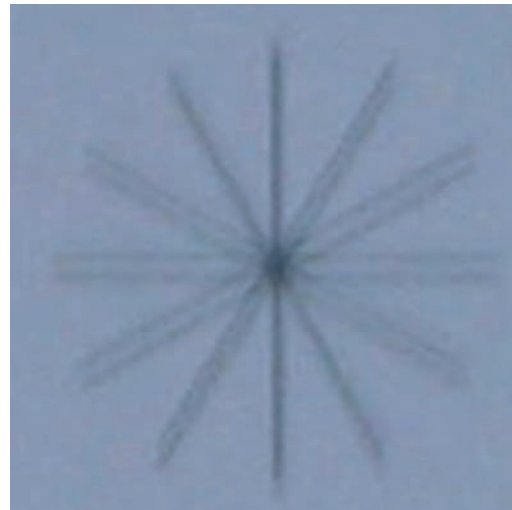


figure 26
Cible photographiée
en vol.



GÉORÉFÉRENCEMENT DES IMAGES : MESURES DE LA DISTANCE DU DRONE À L'OUVRAGE

La localisation des images sur l'ouvrage d'art est indispensable. Elle peut se faire soit à partir de points singuliers relevés sur l'ouvrage soit à partir des données fournies par les capteurs du drone (trois angles d'Euler, géolocalisation GPS). Le premier cas nécessite d'importants traitements d'image, aussi avons-nous retenu la deuxième solution, qui est plus accessible et plus générale.

Pour mettre en œuvre cette solution il est nécessaire d'acquérir la distance à l'ouvrage du dispositif de prises de vue. Pour cela il est prévu d'embarquer un télémètre laser de chantier en cours d'adaptations mécanique et électronique.

L'étendue de mesure de ce télémètre est comprise entre 30 et 100 m suivant la nature, la couleur de la cible et la luminosité ambiante ; la précision de la mesure est de ± 2 mm max.

Toutes les données permettant de connaître le positionnement seront enregistrées dans un fichier associé à chaque image.

Toute la difficulté réside dans l'obtention de mesures suffisamment précises pour pouvoir positionner sur les ouvrages béton les désordres à mieux que 50 cm pour les *grandes pièces* sur lesquelles il n'y a pas de contrainte particulière et à 15 cm pour des défauts relevés en zones dites *sensibles* comme par exemple les bossages, les petites dalles d'appui et les zones de reprise ou d'ancrage de précontrainte.

RELEVÉ DES BRUITS OCCASIONNÉS PAR LE DRONE

Afin de connaître les nuisances sonores occasionnées par le fonctionnement du drone nous avons mené une campagne d'essais en champ ouvert au-dessus d'une prairie. Des relevés ont été effectués au moyen d'un sonomètre pour différentes distances entre le drone et le microphone. Les altitudes du drone pour ces essais étaient de 10 m et de 20 m, tandis que les distances au sol évoluaient progressivement de 0 m (à la verticale du microphone) à 10 m, puis 20, 50 et 100 m. La **figure 27** montre deux cas extrêmes : le graphe du haut, qui correspond au cas où le drone est à la verticale du microphone et à une altitude de 10 m, fait apparaître un niveau sonore moyen de 72 dB ; les fluctuations sont dues à la rotation en continu du drone sur son axe de lacet. À titre de comparaison, signalons qu'une voiture à la même distance produit une émission de 76 dB (sur une chaussée classique). L'émission sonore relevée pour la distance maximale du drone n'est plus que de 50 dB, comme on le voit sur la deuxième partie du spectre du graphe du bas. Sur la première partie de ce spectre, le niveau maximal atteint 74 dB ; mais ce niveau est le fait d'un avion de ligne au décollage sur l'aéroport voisin distant d'environ 2 km.



figure 27
Niveau de bruit vs temps
et spectre à 100 m.

En conclusion, bien que le niveau de bruit soit acceptable, une réduction du niveau de bruit dans le haut du spectre serait néanmoins souhaitable pour des raisons de furtivité. En effet, il faut éviter d’attirer l’attention des usagers de la route pendant une opération d’inspection.

RECHERCHES À ENTREPRENDRE

■ Dispositif de vision

Si nous voulons à long terme pouvoir supplanter l’œil humain, il est nécessaire de développer des systèmes de vision en adéquation avec les défauts à détecter. Nous examinerons l’apport et la contribution potentielle de la stéréovision, de la vision infrarouge et des systèmes 3D. En outre, nous examinerons l’utilité d’embarquer des éclairages pour pallier si nécessaire le manque de lumière naturelle et nous chercherons de nouvelles sources d’excitation pour obtenir des signatures spécifiques correspondant aux défauts observés et recherchés.

■ Mesure de déformation

Pour atteindre des mesures de déformation et savoir si la fissure est active c’est-à-dire si ses lèvres se déplacent lors d’un chargement de la structure nous examinerons l’utilisation de la shearographie.

■ Traitement d’image

Les flous de bougé dus aux déplacements du drone et/ou aux vibrations devront être limités au maximum par une bonne suspension de la tourelle et par des prises de photos rapides sous réserve d’avoir de bonnes conditions d’éclairage.

En complément, les techniques de traitement d’image pourront encore améliorer la qualité des photos et permettre à terme la reconstitution des défauts, leur identification à l’aide d’une base de données et leur quantification.

■ Localisation

Pour une inspection précise, il est indispensable de localiser le défaut sur la structure. Actuellement notre drone est localisé par son GPS standard. Nous examinerons comment la fusion de données d'un GPS différentiel, d'une centrale inertielle et des images prises par la caméra peut aider à localiser les images sur l'ouvrage [13.14]. Nous réfléchissons également à obtenir cette localisation à partir de cibles fixées sur l'ouvrage ou à partir de singularités de l'ouvrage.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'expérimentation initiale de 2001 menée sur le viaduc de Saint-Cloud a bien amorcé la faisabilité du concept d'inspection par drone, qui, par la suite, a été confirmé par d'autres essais réalisés avec notre propre drone instrumenté. Les images obtenues lors des essais donnent des résultats intéressants en termes de détection qualitative de désordres mais ne permettent pas encore de vraiment quantifier ceux-ci ni de les localiser avec la précision demandée par les inspecteurs d'ouvrages. Ces essais nous ont également permis d'explorer le champ opérationnel du drone *in-situ*, que ce soit du point de vue des conditions aérologiques de vol, des autorisations d'opérer dans l'espace aérien à partir de terrains publics ou privés ou enfin sur les aspects de sécurité des intervenants.

Même si la solution drone apparaît en bonne adéquation avec le besoin, un travail très important reste à fournir. Dans un premier temps, il convient d'améliorer les conditions de prises de vue, ce qui suppose de régler certains problèmes vibratoires et de mouvements, sources de flous, ainsi que de trouver des traitements d'images efficaces. Il s'agit alors de rechercher, pour chaque situation particulière, la position optimale du *curseur* des compromis. Par ailleurs, les images fournies ne contenant pas forcément l'intégralité du ou des défauts observés, il conviendra de se doter d'outils plus ou moins automatisés pour assurer la continuité de la zone d'intérêt. Pour ce faire et revenir éventuellement sur un point préoccupant, il est nécessaire d'associer à toutes les images acquises des informations de position et de temps.

Ultérieurement pourraient être embarqués d'autres moyens d'imagerie pour *voir autrement*, tels que la shearographie par exemple.

Tous ces travaux en perspective nous amènent à continuer d'équiper notre plate-forme drone d'une instrumentation associant micro-électronique et micro-informatique, qui devrait permettre d'intégrer avec souplesse et rapidité les différents développements en cours et à venir.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur Berthelot et la Société Verti-Services pour l'utilisation de leur hélicoptère, pour la vidéo, Messieurs Ringot et Delahousse du LCPC pour les photos prises lors des expérimentations sur les Viaducs de Saint-Cloud et Tonnay-Charente, Monsieur Renaudin du Laboratoire régional de Strasbourg pour ses commentaires avisés, ainsi que Monsieur Buloz, chef de subdivision aérodromes à Athis-Mons pour l'autorisation de vol en Île-de-France. Nous remercions également Monsieur C. Digue, responsable du site EDF R&D des Renardières, pour les autorisations de vol sans lesquelles nous n'aurions pu réaliser nos essais. Ont contribué à ces travaux, Louis-Marie Cottineau, Jean-Pierre Desroche, Jean Dumoulin, Alain Fleury, Laurent Lemarchand du LCPC de Nantes et Érick Merliot du LCPC de Paris.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art 1^{ère} partie et 2^{ème} partie : Fascicule 01 Dossier d'ouvrage, Fascicule 02 Généralités sur la surveillance, Fascicule 03 Auscultation, Surveillance. Renforcée, Haute surveillance, LCPC-SETRA
- 2 THEILLOUT J.-N., Les passerelles automotrices de visite d'ouvrages d'art, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 97, 1978, pp. 159-169.
- 3 GODART B., La surveillance renforcée et la haute surveillance des ouvrages d'art en France, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 227, 2000, pp. 63-70.
- 4 MATHURIN R., Contribution au développement d'une plate-forme mobile d'instrumentation, Rapport DGA, Contrat ERE n°9960054/A000, 2000, non publié.
- 5 COTTINEAU L.-M., DERKX F., LEGEAY V., MATHURIN R., PHILIPPOT B., SORIN J.-L. (1999) PMI- cahier des Charges fonctionnel. Document interne du LCPC.
- 6 DERKX F., SORIN J.-L., LEGEAY V., 2002, Auscultation des ouvrages d'art à l'aide d'une plate-forme mobile d'instrumentation, journées OA des LPC, Nantes France, 15-17 mai 2002.
- 7 DERKX F., DUMOULIN J., SORIN J.-L., LEGEAY V., Inspection des ouvrages d'art : intérêt des drones, *Revue Essais Industriels*, 24, 2003, pp. 23-27.
- 8 DERKX F., DUMOULIN J., SORIN J.-L., LEGEAY V., Concept de Plate-forme Mobile Instrumentée pour l'inspection des ouvrages d'art, *Journées Micro-Drones 2^{ème} édition*, Toulouse, 18-20 septembre 2002, pages.
- 9 SORIN J.-L., DERKX F., FLOCH E., LE CAM V., LESAGE Y., Surveillance du trafic routier par drones, *Document interne du LCPC du CETE de l'Ouest*, 2003, non publié.
- 10 METNI N., DERKX F., SORIN J.-L., The Current Use of UAV for Civil Applications : Bridge Inspection and Traffic surveillance, 4th Unmanned Vehicle System, *UVS Tech 2004*, Bruxelles, Belgique, 29 novembre-1^{er} décembre.
- 11 DERKX F., DUMOULIN J., SORIN J.-L., LEGEAY V., Inspection des ouvrages d'art : intérêt des drones, *Journées Scientifiques de l'Ingénieur*, pp 481-486 *Journées des Sciences de l'Ingénieur* 2003 - Dourdan 9-11/12/03.
- 12 DERKX F., J., SORIN J.-L., Présentation du drone et des premières instrumentations, *Journées Ouvrages d'art*, Lyon France, 12-13 avril 2005, 9 pages.
- 13 METNI N., HAMEL T., DERKX F., A UAV for bridges' inspection : visual servoing control law with orientation limits, 6 pages, 5th IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, IAV 2004, Lisboa, Portugal, 5-7 July 2004.
- 14 METNI N., HAMEL T., DERKX F., A UAV for bridges' inspection : visual servoing control law with orientation limits, *4^{ème} Journées Micro-Drones*, Toulouse, 14-17 septembre 2004.