



HAL
open science

La télédétection LiDAR hélicoptérée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection

P. Meriaux, L. Auriiau, J. Maurin, A. Boulay, S. Lacombe, S. Marmu

► To cite this version:

P. Meriaux, L. Auriiau, J. Maurin, A. Boulay, S. Lacombe, et al.. La télédétection LiDAR hélicoptérée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection. Colloque National Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Jun 2013, Aix-en-Provence, France. 9 p. hal-01511164

HAL Id: hal-01511164

<https://hal.science/hal-01511164v1>

Submitted on 20 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La télédétection LiDAR hélicoptérée haute résolution, un outil efficace pour étudier la topographie et contribuer au diagnostic des digues de protection

High resolution helicopter-borne LiDAR: an efficient remote sensing technique for topographical survey and ageing assessment of flood dikes

P. Mériaux¹, L. Auriou¹, J. Maurin², A. Boulay², S. Lacombe³, S. Marmu³

¹ Irstea, Unité de Recherche « Ouvrages hydrauliques », Aix-en-Provence, patrice.meriaux@irstea.fr, lucie.auriou@irstea.fr

² DREAL Centre, Service Loire et Bassin Loire-Bretagne, Orléans, prenom.nom@developpement-durable.gouv.fr

³ FUGRO-GEOID, Montpellier, s.lacombe@fugro.com, s.marmu@fugro.com

Résumé

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection "active" qui repose sur la mesure de distances entre une source laser et la surface terrestre. Embarqué sur un hélicoptère, un système de cartographie haute résolution d'infrastructures linéaires comme FLI-MAP (Fast Laser Imaging and Mapping on Airborne Platform, ©FUGRO) peut fournir, pour une largeur de corridor d'une centaine de mètres, et pour une hauteur de vol de 150 m, une densité de points de 80 pts/m², avec une précision altimétrique (Z) de 0,03 m et planimétrique (X,Y) de 0,05 m en bonnes conditions de surface. Le rendement in situ d'un tel système d'acquisition LiDAR est de 80 à 100 km de digues survolées par jour, ce qui rend cette technique adaptée aux situations d'urgence (pendant ou après une crue majeure, par exemple).

Couplée à la prise de photos et de vidéos aériennes à haute définition, la technologie permet d'étudier avec précision toutes les irrégularités de surface ou autres indices visuels susceptibles d'être autant de désordres dans la digue elle-même : par exemple, un affaissement ou la présence d'un fontis sur la crête peut être le résultat d'une érosion interne ou d'un effondrement karstique. Dans le cas des digues végétalisées, l'exploitation des données LiDAR haute densité obtenues permet d'étudier et cartographier la végétation arborée, qui est une source de dangers pour la digue, mais aussi de caractériser les structures cachées par le couvert végétal et inaccessibles aux photos aériennes. Des visites de terrain demeurent, bien sûr, indispensables pour compléter la reconnaissance visuelle tout comme des reconnaissances géotechniques afin d'identifier des singularités possibles dans le corps de digue ou dans sa fondation.

Le présent article propose et décrit une méthodologie pertinente d'exploitation des données de télédétection LiDAR collectées en « condition sèche » pour contribuer au diagnostic d'une digue de protection contre les inondations.

Abstract

LiDAR (Light Detection And Ranging) is an active remote sensing technique that provides georeferenced distance measurements between an airborne platform and the surface. Embedded in an helicopter, a high-resolution corridor mapping system like FLI-MAP (Fast Laser Imaging and Mapping on Airborne Platform, © FUGRO) can provide, over a one hundred meters wide corridor, at a fly height of 150 m, a point density of 80 pts/m², with an absolute height accuracy (Z) of 0.03 m and (X,Y) accuracy of about 0.05 m. Such LiDAR system is able to acquire data on dike structures of up to 80 km per day, which makes this technique particularly efficient during emergency situations (during and after a major flood, for example). The high-resolution digital images and videos allow studying with accuracy all surface singularities which are often clues of disorders in the dike itself: for example a subsidence or a sinkhole on the crest may result from internal erosion or karst collapse. Moreover, in case of wooded dikes, LiDAR data make possible to study and map woody vegetation near or onto the dike which is a major risk factor for dikes, but also to characterize structures hidden by vegetation cover and invisible by aerial photographs. Such singularities, once pre-identified on the images are, of course, to be confirmed by field visits, but the contribution of high resolution LiDAR data is to improve the completeness of these visual clues. Geophysical survey or geotechnical testing will then characterize possible extension of surface singularities in the dike body or in the foundation. Our paper proposes and describes a relevant methodology to exploit these remote sensing data collected during "dry condition", for levee safety assessments.

Introduction

Le LiDAR : une technologie efficiente de télédétection

La télédétection en général

La télédétection désigne, dans son acception la plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure

n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance (par exemple depuis un aéronef, un engin spatial, un satellite ou encore un bateau) de n'importe quel type d'instrument permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement. On fait souvent appel à des instruments tels qu'appareils photographiques, lasers, radars, sonars, sismographes ou gravimètres.

LiDAR

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection « active » avec émission de lumière (rayon laser) à partir d'un émetteur/récepteur (rayon laser). Une partie de la lumière est diffusée ou absorbée par le milieu visé, l'autre est rétrodiffusée en direction de la source du rayonnement. La technique est basée sur la mesure de distances entre la source laser et l'objet ou le milieu étudié (typiquement la surface terrestre). Le signal est émis par un laser monté sur une plate-forme aéroportée (hélicoptère ou avion) ou terrestre. La longueur d'onde du signal est comprise, selon les applications, entre 500 nm (ex : LiDAR bathymétrique) et 1550 nm, soit en proche Infra-Rouge (ex : Airborne Laser Scanning).

La technique LiDAR est d'abord un outil de levé topographique mais est utilisée plus largement avec succès dans des applications territoriales très diverses : par exemple pour étudier les vallées fluviales [1], les arbres et forêts [2] ou les processus de déforestation [3], la stabilité des versants [4] ou les processus d'érosion [5], les ouvrages ou infrastructures linéaires (voies de transport, de chemin de fer, lignes électriques, digues [10]).

C'est en particulier dans les zones de montagne, délicates à survoler à basse altitude par avion, que l'on a commencé à remplacer celui-ci par l'hélicoptère pour embarquer le système LiDAR. A altitude de survol égale, l'hélicoptère présente, en outre, l'avantage de pouvoir voler plus lentement que l'avion, ce qui permet d'obtenir des densités élevées de points au sol (> 50 points/m²). A contrario, lors des vols à basse altitude et à haute densité de points, la fauchée (i.e. largeur de la bande ou du corridor mesuré au sol) est étroite et, si nécessaire, il faut prévoir plusieurs allers et retours contigus pour couvrir une surface donnée selon la hauteur de vol : ceci fait que la technique LiDAR hélicoptérée est particulièrement bien adaptée au levé ou au suivi d'infrastructures linéaires tels que les digues ou les berges de rivière [6], ou la végétation arborée présente sur celles-ci [7].

Système FLI-MAP 400

Le FLI-MAP 400 de FUGRO est un système d'acquisition topographique par hélicoptère, qui intègre le LiDAR, des récepteurs GPS et une centrale inertielle, ainsi que des appareils de photographie aérienne haute résolution et des caméras vidéos.

Les données issues des GPS différentiels (antennes GPS embarquées et stations GPS au sol) et les mesures de la centrale inertielle sont traitées pour déterminer la trajectoire précise de l'hélicoptère. Les données de calibration des

capteurs et leurs paramètres de montage (axes de visée et bras de levier) permettent de connaître la position de chaque capteur, particulièrement le laser, à tout moment. Par conséquent, en combinant les mesures laser avec la position (GPS) et « l'attitude » de l'hélicoptère (IMU), les coordonnées de chaque point relevé sur la surface terrestre peuvent être calculées et collectées en nuage de points laser bruts.

Le rayon laser est émis selon trois angles de balayage : 7° vers l'avant, position verticale, 7° vers l'arrière, ce qui permet de déterminer la forme et la position d'objets très minces et grands et d'améliorer la visibilité de la zone survolée. Le faisceau laser peut en effet atteindre des éléments du sol partiellement recouverts (par exemple par la végétation), ce qui est impossible avec un laser à direction uniquement verticale (cf. Figure 1).

La fréquence du scanner laser du système FLI-MAP est de 250 kHz. La densité de points relevés qui en résulte dépend à la fois de la hauteur de vol et de la vitesse de l'hélicoptère lors de l'acquisition ; elle est supérieure à 80 points par mètre carré pour une hauteur de vol de 150 m, à une vitesse de 60km/h. Avec une telle densité de points, on est assuré qu'une partie des faisceaux laser traverse le couvert végétal et atteint la surface terrestre pour explorer la topographie sous la canopée. De plus, le système inclut aussi la technologie des « multiples retours » (ou « multiples échos ») du laser qui peut enregistrer jusqu'à quatre réflexions pour chaque impulsion laser émise, ce qui améliore par la suite l'interprétation, même dans des zones de végétation dense. Les données du premier écho représenteront par exemple les sommets de végétation alors que celles du dernier écho représenteront le sol sous cette même végétation (Figure 1).

Le scanner laser est associé à un appareil photo en vue vers l'avant et à deux caméras à côté en vue verticale (16 Mpixels), ainsi que deux caméras orientées respectivement vers l'avant et à la verticale. En complément du nuage de points laser, des photographies haute résolution et des vidéos sont donc fournies et exploitables pour aider à identifier les objets.

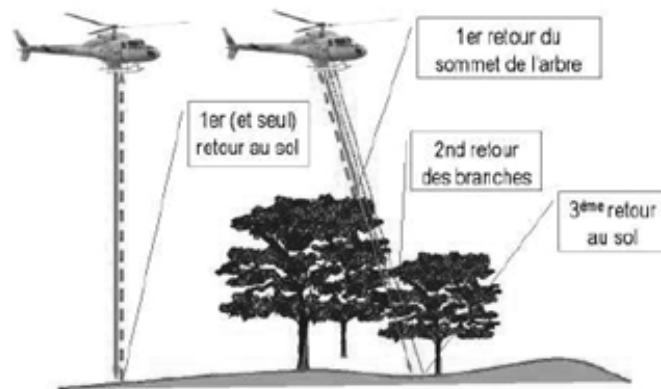


FIGURE 1. ILLUSTRATION DE L'ANGLE DE BALAYAGE AVANT ET PRINCIPE DES MULTIPLES RETOURS DU LASER

Le vol d'acquisition doit être fait dans des conditions météorologiques correctes en basse altitude pour permettre l'évolution de l'hélicoptère (vent < 80 km/h, absence de brouillard) et la qualité de l'imagerie aérienne.

Difficultés inhérentes au diagnostic des digues de protection situées en zone urbaine

Dans les villes inondables riveraines d'un cours d'eau, la volonté de réserver le maximum d'emprise pour le développement urbain a généralement conduit les hommes à construire les digues de protection contre les crues en bordure immédiate de la rivière. Les digues sont alors protégées côté cours d'eau par un mur ou un revêtement en maçonnerie de pierres ou en béton, fondé sur un rideau de pieux ou de palplanches. Ce type d'ouvrage, de fait souvent composite (remblai-maçonnerie), est classiquement soumis à quatre principaux mécanismes pathologiques : érosion interne, surverse, glissement de talus ou érosion externe du talus côté rivière ou affouillement [8] ; la structure rigide côté cours d'eau est elle-même exposée à des mécanismes particuliers de rupture (ex : effondrement, renversement, etc.) ou de dégradation (ex : affaissement, fissuration, usure, érosion, etc.) qui altèrent sa fonction de protection.

Il arrive que certains quartiers des villes riveraines de cours d'eau se soient installés, à l'abri des inondations, en pied de coteau ou sur une zone haute topographique du lit majeur (on qualifie une telle zone de « tertre » dans la vallée de la Loire). Au droit de ces zones, la digue est alors souvent remplacée par un mur de quai qui, s'il reste soumis à des mécanismes pathologiques propres (renversement côté rivière à la décrue, érosion ou fissuration du parement, sous-cavage ou sous-tirage de fines en fondation, etc.), ne fonctionne plus comme un ouvrage retenant de l'eau mais comme un ouvrage de protection ou de soutènement de la berge et des infrastructures qu'elle supporte (route, ouvrages portuaires, bâtiments, etc.). La difficulté dans le diagnostic de tels ouvrages hydrauliques en zone urbaine réside dans le fait que la densité de l'habitat et des constructions ne permet pas de voir facilement si on a affaire à une digue sensu stricto, de structure composite, ou à un « simple » mur de quai. Par ailleurs, les secteurs de raccordement entre la digue et le mur de quai – situés à l'amont et à l'aval de la (des) zone(s) haute(s) topographique(s) et pas toujours aisés à repérer, constituent autant de points de faiblesse structurels vis-à-vis des mécanismes pathologiques, notamment vis-à-vis de l'érosion interne : il s'agit en effet de secteurs - que nous qualifierons d'interfaces ou de transition [9] - dont l'aménagement est la plupart du temps très ancien et pour lesquels on ne dispose pas de plans précis de construction.

Objectifs du projet européen FloodProBE

Le projet de recherche européen FloodProBE 2010-2013 porte sur l'amélioration des techniques et aménagements de protection contre les crues en contexte urbain. Une de ses

tâches concerne spécifiquement le développement d'outils ou méthodes efficaces de diagnostic des digues urbaines.

Face aux difficultés particulières présentées par de telles digues à structure composite (cf. paragraphe ci-dessus), la technologie de télédétection laser hélicoptée à très haute résolution a été identifiée comme porteuse pour contribuer à leur diagnostic (topographie détaillée, caractérisation des structures encastrées et de la végétation, ...). Utilisée depuis plusieurs années aux USA et aux Pays-Bas, cette technologie d'acquisition LiDAR est encore très peu développée en France et dans de nombreux pays d'Europe. Aussi, les équipes françaises contribuant au projet ont proposé qu'elle soit déployée sur un des sites-pilotes du projet et qu'une méthodologie pertinente d'exploitation des données ainsi acquises soit élaborée à partir de ce cas réel d'application. Ce sont les résultats de ce travail que nous présentons dans la suite de cet article.

Acquisition LiDAR sur les digues du site pilote « FloodProBE » du Val d'Orléans

Choix et description du site pilote

Le site pilote français, choisi pour la réalisation et l'exploitation à titre expérimental d'un levé LiDAR hélicopté sur les digues et ouvrages associés est le Val d'Orléans. Les enjeux de ce val comptent parmi les plus importants de la Loire avec plusieurs quartiers ou bourgs de l'agglomération d'Orléans implantés en zone inondable du fleuve (65 000 habitants).

Deux types de digues se distinguent sur la rive gauche du val d'Orléans :

- les digues en remblai ou « levées » (Figure 2), dans les zones rurales et suburbaines (50 km), soit en contact avec le lit mineur (10 km), soit plus ou moins éloignées de celui-ci (40 km) avec la présence d'un « franc-bord » correspondant à la zone comprise entre le lit mineur et la levée. Par rapport à des digues classiques, les levées de la Loire présentent la particularité d'être généralement dotées d'une « banquette » en crête, tantôt côté fleuve, tantôt côté val (et parfois même des deux côtés) et d'un tapis drainant en pied de talus côté val ;

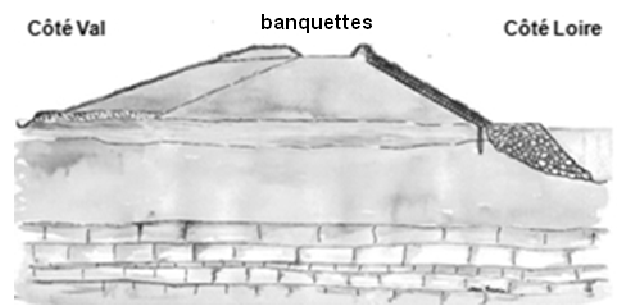


FIGURE 2. COUPE TRANSVERSALE D'UNE DIGUE-TYPIQUE EN REMBLAI (« LEVEE »), EN ZONE RURALE OU SUB-URBAINE SUR LE VAL D'ORLEANS

- de murs ou quais maçonnés (Figure 3) ou mixtes remblai-maçonnerie dans les zones urbaines (4 km), surmontés ou non de parapets ou murets et comprenant ou non de nombreux ouvrages singuliers (portes, cales conduites, pertuis batardables).

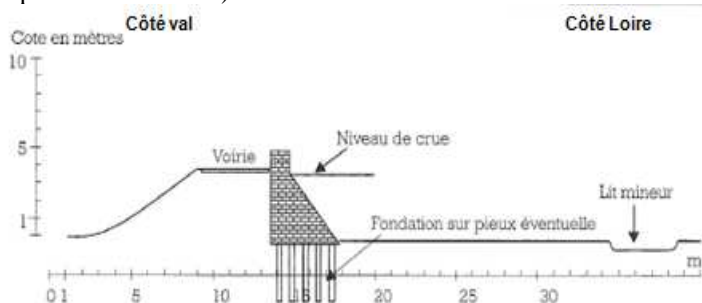


FIGURE 3. COUPE TRANSVERSALE D'UNE DIGUE-TYPE MIXTE REMBLAI-MAÇONNERIE EN ZONE URBAINE SUR LE VAL D'ORLEANS

Préparation de la mission et acquisition LiDAR

La méthodologie étudiée pour exploiter les données LiDAR et l'imagerie haute résolution concerne l'évaluation de la sécurité des digues en condition « sèche » (i.e. c'est-à-dire hors période de crue, avec un talus côté Loire de la levée émergé et donc en principe bien visible). Afin de remplir les objectifs d'un tel diagnostic, les instructions de vol ont été d'acquérir les données en saison automnale (arbres sans feuille) et par temps sec pour ne pas être en épisode de crue.

Les 17 et 18 novembre 2010, 70 km de digues du Val d'Orléans (dont 60 km en rive gauche et 4 km en milieu urbain) et 6,5 km du remblai ferroviaire Orléans-Vierzon ont été survolés par le système LiDAR FLI-MAP 400 sur un corridor de 105 m de largeur, axé en général sur l'emprise de la partie en remblai des ouvrages.

Ces paramètres de vol permettent d'obtenir au final une précision de 5 cm en planimétrie et de 3 cm en altimétrie pour les points levés, en conditions de surface favorables.

Ensemble des données obtenues

Les livrables de la mission FLI-MAP comprennent l'élaboration et la fourniture de modèles numériques d'élévation et de terrain, de la mosaïque d'images géoréférencées et orthorectifiées haute résolution et de vidéos, concernant les levées et ouvrages associés présents dans les corridors survolés, ainsi que, sur quelques tronçons remarquables de digue, d'un jeu de plans topographiques à l'échelle 1/500° et des profils en long ou en travers. L'ensemble des données topographiques est élaboré dans le système RGF 93 projection LAMBERT 93. Le système de référence altimétrique associé est le NGF IGN 69 (dite altitude « normale »).

La densité de points laser bruts supérieure à 80 points par mètre carré permet de matérialiser tous les éléments topographiques visibles et identifiables par une

représentation supérieure à 1 mm à l'échelle d'un plan de 1/500°.

Les photos aériennes sont prises avec un taux de recouvrement de 50 %. La taille des pixels est de 25 mm au sol. La configuration de l'appareil photo en visée frontale oblique permet une visualisation en perspective du terrain, très utile pour les chefs de projet désirant analyser des objets spécifiques que la vision verticale pourrait « écraser ». A partir des photos aériennes verticales brutes et des données laser, une mosaïque de photos géoréférencées et orthorectifiées des levées et quais, ainsi que du remblai ferroviaire de la ligne Orléans-Vierzon, a été établie.

Les vidéos géoréférencées des levées et quais, ainsi que du remblai ferroviaire, ont été établies. De la même façon que les photos frontales, les vidéos obliques permettent de repérer et d'évaluer les objets en perspective.

Le modèle numérique d'élévation (MNE ou MNS) contient les informations essentiellement issues des premiers échos du laser, c'est-à-dire l'enveloppe « végétation et bâti » (Figure 4). Les éléments tels que les voitures et les personnes sont filtrés. La topographie sub-aquatique n'apparaît pas non plus sur le MNS car le type de laser mis en œuvre dans le système FLI-MAP ne traverse pas l'eau.

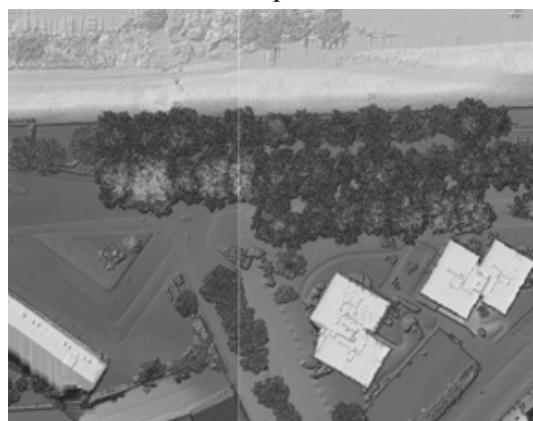


FIGURE 4. MODELE NUMERIQUE D'ELEVATION (MNE) COMPRENANT LA TOPOGRAPHIE, LA VEGETATION ET LE BATI

Pour les besoins de l'expérimentation FloodProBE, d'autres produits MNS ont été créés : un MNS sans végétation, pour ne faire apparaître que le bâti ; et à l'inverse un MNS sans bâti pour ne laisser que la végétation. Ceci permet de mieux analyser tour à tour le bâti et la végétation sous SIG. Il a été décidé de retenir pour les trois produits MNS un pas de grille de 0,10 mètre.

Le modèle numérique de terrain (MNT) contient des données laser filtrées, laissant apparaître la topographie uniquement. Il comprend les digues et le remblai ferroviaire et tous les éléments constitutifs ou ouvrages hydrauliques associés (parapets, banquettes, ballast). Les données enregistrées par laser sont filtrées afin d'enlever les éléments n'appartenant pas à la topographie du sol ou aux ouvrages hydrauliques, tels que la végétation, les bâtiments hors digue, les voitures,

etc. Comme pour le MNS, la taille des mailles de la grille retenue est de 0,10 mètre.

Enfin, sur une sélection de quelques tronçons caractéristiques de digue du linéaire survolé et pour satisfaire des besoins de la DREAL Centre, gestionnaire des ouvrages, des profils en long de la crête et des pieds amont et aval du remblai, des profils en travers et des plans topographiques ont été élaborés.

Méthodologie d'exploitation des données LiDAR et images pour contribuer au diagnostic des digues

Le diagnostic d'un ouvrage de génie civil vise à évaluer l'état (i.e. son aptitude à remplir ses fonctions) de l'ouvrage et sa capacité à résister à tous les mécanismes pathologiques de vieillissement, dégradation, défaillance ou rupture susceptibles de l'affecter, et à définir et prioriser les mesures nécessaires pour améliorer ou pérenniser cet état : auscultation, maintenance, réparation, confortement, etc. La réglementation française (décret du 11/12/2007) s'est largement inspirée de la définition précédente pour spécifier le diagnostic dit "de sûreté" d'un ouvrage hydraulique.

Les quatre principaux mécanismes de dégradation ou de rupture des digues rappelés ci-dessus sont reliés, de manière plus ou moins directe, à des éléments topographiques relatifs à la digue (Tableau 1).

L'acquisition, puis l'analyse, d'une topographie précise et complète de la digue et de son environnement vont donc pouvoir contribuer efficacement à la qualité et à la pertinence de son diagnostic approfondi.

Sur le Val d'Orléans, trois zones caractéristiques ont été étudiées plus particulièrement, ce qui a permis d'élaborer une méthodologie d'utilisation des données provenant d'une acquisition LiDAR et d'imageries aériennes dans le cadre du diagnostic des digues urbaines ou suburbaines.

Exploitation des vidéos et des photos aériennes pour un premier zonage de la digue

Tout d'abord, la visualisation des vidéos en vue oblique et verticale permet de repérer un certain nombre d'éléments clés de constitution ou d'état de la digue : les différentes natures d'ouvrage (remblai ou maçonnerie), la végétation arborée, les bâtiments encastrés ou les zones de rapprochement ou de contact « pied de levée – cours d'eau ».

L'avantage d'utiliser les vidéos réside dans la rapidité de visualisation du secteur entier à analyser.

La vue oblique (vidéos et photos) permet à la fois d'anticiper le linéaire "futur" (avant passage du vol à la verticale) et d'avoir une vue en perspective, pour mieux apprécier la hauteur de la végétation ou du bâti.

Les photos aériennes sont géoréférencées et orthorectifiées. Concernant la végétation, le fort développement du houppier des arbres ne permet pas toujours de voir si certaines souches

poussent sur le bas du talus sensu stricto ou au-delà de celui-ci. Un zoom permet, cependant, de mieux distinguer le type d'arbres.

Sur les photos aériennes, il est assez facile de repérer d'anciennes brèches probables : en effet, si la fosse d'érosion n'a pas été remblayée après l'accident, il subsiste une mare d'eau au delà du pied côté val de la digue ou, le cas échéant, une dépression pseudo-circulaire, visible sur le MNT. De plus, la réparation de la brèche a pu être faite dans l'urgence, avec des matériaux de moins bonne qualité que le reste du système de digues. Une enquête spécifique est alors à faire dans ces zones-là.

Croisement avec les données historiques

En parallèle de l'exploitation des images aériennes, il est nécessaire de travailler sur les données historiques.

Repérage des brèches

Dans le Val d'Orléans, des fonds de cartes anciennes datés de 1850 comportent des informations relatives aux crues de 1856 et 1866 : la localisation des brèches, les parties de levées submergées, les limites géographiques des inondations et l'emplacement des repères de crue. Ces cartes constituent une mine précieuse d'informations pour les gestionnaires de digue. En effet, l'expérience montre qu'une brèche se crée souvent à l'emplacement d'une brèche antérieure ayant déjà affecté la digue.

Repérage des zones confortées

Les principaux ouvrages de confortement qui ont été ou sont mis en œuvre sur les levées de la Loire sont : (i) l'épaississement côté val par recharge, sur tapis drainant, (ii) l'épaississement côté fleuve par recharge étanche, avec revêtement de protection (enrochement, maçonnerie) fondé sur parafouille, (iii) la création d'un écran étanche depuis la crête par battage d'un rideau de palplanches d'où coulage d'une paroi moulée bentonite-ciment.

Il convient de rechercher les plans topographiques antérieurs où sont indiquées certaines zones de travaux. Le problème majeur est que ces plans sont souvent des plans d'avant-projet ou de projet – et non d'exécution – et ne sont, en général, pas mis à jour.

Dans le cas du Val d'Orléans, les levées étant domaniales, les services d'Etat (DDT, DREAL ou CETE) possèdent des plans comportant des informations sur les zones confortées des digues. La situation devrait encore s'améliorer d'ici quelques années pour l'ensemble de la Loire moyenne avec le développement du "SIRS Digues" – outil logiciel SIG dédié aux digues dont les services locaux se sont dotés et qui est en cours de saisie.

Lorsque l'on ne possède pas de plans topographiques anciens, on peut éventuellement utiliser les photos aériennes haute résolution pour repérer les zones confortées. Mais les ouvrages de confortement « interne », du type palplanches par exemple, ne seront pas visibles en principe.

TABLEAU 1. LIENS ENTRE TOPOGRAPHIE ET MECANISMES DE DEGRADATION OU RUPTURE DES DIGUES

Eléments Topographiques		
Mécanismes	Singularités topographiques aggravantes Effets sur la topographie	
Erosion interne	<ul style="list-style-type: none"> - étroitesse du profil en travers de la digue (rapport hauteur / largeur d'emprise à la base trop fort) - ouvrages traversants en service ou abandonnés dans le corps de digue ou sa fondation : se repérant par leurs entonnements, leurs vannes, leurs regards de visite ou les stations de pompage attenantes - structures encastrées - secteurs d'interface ou de transition entre deux types de digue de constitution différente - présence d'arbres [6], [7] 	<ul style="list-style-type: none"> - fontis - affaissement en crête ou sur le talus - présence éventuelle d'ouvrages provisoires de calfeutrage de fuites (ex : monticules de sacs de sable) - sand-boils (ou « volcans de sable ») en pied de talus côté terre, après une crue
Surverse	<ul style="list-style-type: none"> - points ou zones basses sur le profil en long de la crête de digue - singularités sur la crête de digue - resserrement du lit majeur endigué (rehaussant la ligne d'eau en crue) 	<ul style="list-style-type: none"> - érosion de la crête, du talus ou du pied de digue côté val (si surverse avérée) - présence d'ouvrages provisoires de rehausse ou de bouchure en crête
Glissement de talus	<ul style="list-style-type: none"> - raideur du talus - étroitesse du profil en travers de la digue 	<ul style="list-style-type: none"> - irrégularités du talus, ventre ou loupe de glissement - basculement de mur, fissure et/ou affaissement en bordure de crête
Tassement de la fondation ou du remblai	/	<ul style="list-style-type: none"> - affaissement généralisé en crête
Erosion externe	<ul style="list-style-type: none"> - raideur du talus côté rivière - absence d'un ouvrage de protection côté rivière - irrégularités, présence de structures saillantes sur le parement 	<ul style="list-style-type: none"> - anse d'érosion (disparition de la végétation) - glissement du talus (se reporter ci-dessus) - sous-cavages (visibles qu'en topographie subaquatique ou par l'intermédiaire d'une acquisition LiDAR en basses eaux)
Brèche avérée (historique)	/	<ul style="list-style-type: none"> - dépression ou mare au pied côté val de la digue (ancienne fosse d'érosion de la brèche)

Comparaison avec des photos aériennes antérieures

De nombreuses campagnes d'acquisition de photos aériennes ont eu lieu sur le Val d'Orléans. Dans notre cas, ces photos antérieures ne sont pas très utiles pour étudier les évolutions de détail du lit car leur résolution est plus faible que celle des livrables de l'acquisition LiDAR et des photos aériennes hélicoptérées et car cette dernière est centrée sur la digue et ne comprend pas le lit majeur (i.e. l'ensemble du Val).

Entre 1955 et 2002, on ne détecte pas d'évolution majeure du tracé en plan du lit mineur de la Loire ; des érosions de berge ont sûrement dû évoluer localement mais elles sont trop petites pour être visibles et évaluées à partir de ces photos aériennes classiques.

De telles évolutions du lit à proximité des digues pourront toutefois être analysées dans le futur en répétant des campagnes photographiques et LiDAR haute résolution [10],

semblables à la mission de novembre 2010.

Plan topographique

Le plan topographique au 1/500e est le document de base pour se repérer sur le terrain. Il constitue alors le support des observations visuelles. Lors des études de reconnaissance, il sert à implanter les sondages géophysiques et géotechniques, avant - puis après - leur réalisation, et plus tard les éventuels ouvrages de confortement. Par ailleurs, le plan topographique à grande échelle est particulièrement utile pour le suivi et la maintenance des levées [8].

Un tel plan est établi en exploitant à la fois les points laser bruts et la mosaïque d'images géo-référencées, mais sans nécessairement des vérifications de terrain. Le passage du MNT au plan topographique requiert toutefois un travail d'interprétation des données.

Utilisation des données LiDAR pour évaluer la sensibilité de la digue aux différents aléas de rupture ou de dégradation

Risque d'érosion interne

Les principaux facteurs de risque vis-à-vis de l'érosion interne sont : (i) les bâtiments encastrés dans les digues, (ii) les galeries ou conduites traversant la digue, (iii) la végétation arborée et (iv) les zones d'interface ou de transition. L'objectif est de les repérer à partir de leurs marques extérieures, puis de les caractériser, grâce aux données LiDAR. Un traitement peut être appliqué sur chaque raster (ou grille) MNS (ou MNT) pour mettre en évidence le relief.

(i) Le bâti encastré

Les données du MNS sont sous forme de planches rasters d'une dimension de 100x150 mètres. Afin d'obtenir une couche où uniquement le bâti est présent, il faut soustraire chaque raster MNS sans bâti (comprenant la végétation) du MNS (comprenant la végétation et le bâti).

En soustrayant sous SIG les deux couches rasters concernées, on obtient un raster (grille) unique du bâti. Les couleurs doivent être modifiées pour une meilleure visualisation. Cette méthode permet d'obtenir la hauteur du bâti (en mètres).

(ii) Les ouvrages traversants

Il s'agit, à l'aide du MNT ou du MNS sans végétation, de repérer les galeries ou conduites traversantes par leurs ouvrages associés extérieurs, tels que les regards (puits en béton, fermé par un couvercle amovible, donnant accès à la canalisation) ou ouvrages de tête (déboché ou entonnement côté fleuve ou côté val).

Différents traitements peuvent être effectués sous SIG : affichage des lignes de niveau (ou isolignes) ou effet d'ombrage. Pour repérer ces ouvrages, on peut utiliser :

- le MNT ou le MNS sans végétation avec ombrage (Figure 5). En effet, ce MNS conserve ces ouvrages et l'absence de végétation permet de mieux les visualiser ;

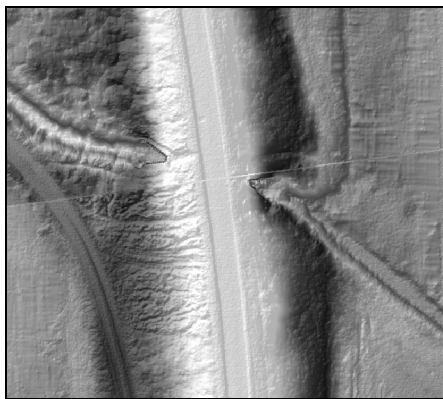


FIGURE 5. EXEMPLE DE VISUALISATION SUR LE MNT D'UNE GALERIE BATARDABLE TRAVERSANT LA DIGUE

- les isolignes superposées à la carte des pentes : elles délimitent clairement les ouvrages (Figure 6) ;
- les orthophotographies (Figure 6).

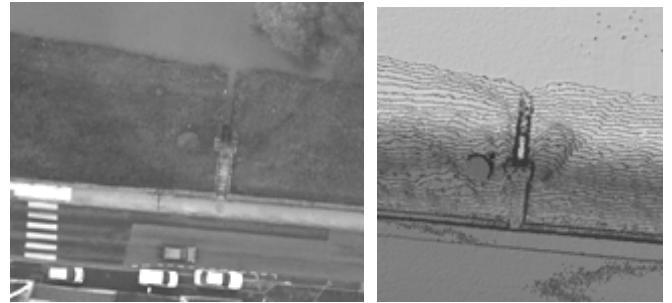


FIGURE 6. PHOTOGRAPHIE ET MNT AVEC ISOLIGNES REVELANT UN REGARD ET UN DEBOUCHE DE PERTUIS

En conclusion, pour repérer les éléments d'ouvrage traversant la digue, il est préférable d'utiliser les isolignes avec MNS sans végétation mais il est indispensable d'examiner aussi les orthophotos qui peuvent apporter des informations supplémentaires.

(iii) La végétation arborée

De la même façon que l'on crée la couche de bâti, la couche « végétation » s'obtient grâce à la calculatrice raster : MNS (végétation et bâti) auquel on soustrait le MNS sans végétation (i.e. ne contenant que le bâti).

On peut classer les hauteurs de végétation pour mieux caractériser les strates ou structures du couvert forestier : arbres, arbustes, haies, etc.

Pour déterminer si le tronc de l'arbre est ancré dans le corps de digue ou est situé au-delà du pied de la digue, il est préférable de tracer le profil en travers avec les points laser bruts au droit de l'arbre suspect en utilisant un logiciel adapté de visualisation de coupes (Figure 7).



FIGURE 7. PROFIL EN TRAVERS SUR LES POINTS LASER BRUTS

(iv) Les zones de transition

D'une façon générale, une transition est une zone de contact entre deux structures ou ouvrages de génie civil de constitution ou de profil géométrique différent [9]. De plus, elles peuvent être cachées, incluses mais visibles en partie, ou totalement extérieures. Avec la technologie LiDAR, on ne verra que les structures de transition extérieures ou visibles au moins en partie.

Pour repérer ces zones, on peut utiliser : les orthophotographies, le MNS sans végétation avec effet

d'ombrage (Figure 8) et les profils en travers avec un espacement régulier tracés sur la digue, un changement de pente pouvant aussi être caractéristique d'une zone de transition.



FIGURE 8. ZONE DE TRANSITION ENTRE UN REMBLAI EN TERRE ET UN QUAI MAÇONNE VISIBLE SUR LE MNS AVEC OMBRAGE

Les photos aériennes haute résolution permettent de distinguer rapidement les ouvrages présents sur les digues, les intersections de routes ou chemins, les changements de nature de revêtement, etc... Les données LiDAR fournissent une appréciation de l'élévation du terrain - difficile à obtenir avec les seules photos aériennes - et l'effet d'ombrage est nécessaire pour visualiser correctement la géométrie de la structure. Il faut impérativement utiliser les données MNS sans végétation, de façon à voir les bâtiments et structures hors sol enlevés lors de la création du MNT.

Enfin, le plan topographique détaillé, fourni en livrable optionnel de la mission LiDAR, permet lui aussi de repérer et de caractériser la plupart des structures ou singularités externes, sources potentielles de risque d'érosion interne.

Risque de surverse

La surverse est une cause majeure de formation des brèches, tout au moins pour les digues en remblai. La méthodologie propose deux façons complémentaires d'étudier le risque de surverse.

(i) Comparaison entre les lignes d'eau en crue et le profil en long de la digue

Le rapprochement entre les lignes d'eau en crue et le profil en long de la crête de digue permet d'évaluer le risque de surverse. C'est une démarche classique. Le profil en long de la digue peut être réalisé au sommet de la banquette (point le plus haut de la digue : cf. Figure 2) ou juste au contact du pied de la banquette avec la chaussée. En effet, les banquettes, compte tenu de leur nature et de leur géométrie, ne sont pas à considérer comme fiables vis-à-vis d'un niveau de crue subaffleurant ; il s'agit d'ouvrages pare-vagues. Le niveau de sûreté de la levée est donc ramené à la cote du pied de banquette ou au milieu de la chaussée (on ne tient donc pas compte de la banquette). L'intérêt de comparer le niveau d'eau pour la crue de référence à ce niveau de sûreté de la digue est de déterminer la revanche disponible par rapport à

la crue vis-à-vis de laquelle on souhaite se protéger et de mettre en évidence les tronçons où cette revanche serait insuffisante.

En l'absence d'étude hydraulique préalable, une analyse du profil en long de la crête de digue peut être suffisante pour identifier, dans un premier temps, toutes les zones basses où une surverse pourrait se produire en premier en cas de crue débordante. Ce type d'information est important pour définir des mesures potentielles de protection ou de prévention.

(ii) Suivi de tassement par acquisitions LiDAR périodiques

D'éventuels problèmes de tassement de la levée (i.e. tassement de couches compressibles en fondation) ou d'affaissement (i.e. mouvements liés à un effondrement d'origine karstique en fondation) entamant la revanche peuvent être repérés et quantifiés en comparant des données topographiques acquises au cours du temps. Ce type de mouvement de sols évolue en général, plus ou moins lentement, sur plusieurs années. Pour les détecter, puis les ausculter, il faudrait donc régulièrement répéter des acquisitions LiDAR haute résolution [10], par exemple, avec une périodicité de 2 à 5 ans, et suivre les déplacements relatifs des surfaces d'ouvrage bien dégagées et régulières (ex : revêtement ou piste de crête de digue), afin de bénéficier des meilleures précisions notamment altimétriques.

Risque d'instabilité

Ce risque peut concerner l'un des talus de la digue ou des structures attenantes à celles-ci (revêtement, banquette, muret, ...).

Le risque d'instabilité d'ensemble d'un des parements de la digue existe lorsque plusieurs facteurs sont réunis, notamment si le profil en travers de digue est étroit avec des pentes de talus fortes (pentes supérieures à 65 % ou fruits inférieurs à $3H / 2V$) et/ou une crête de faible largeur.

Afin de caractériser un tel risque d'instabilité et de collecter des données d'entrée pour une étude de modélisation géomécanique (calcul de stabilité), il convient de faire des profils en travers d'espacement régulier pour détecter plus finement les changements géométriques de profil. On notera toutefois que, d'une façon générale, les levées du Val d'Orléans ont une crête large : d'où l'intérêt de rechercher les zones ponctuelles à risque d'instabilité par l'étude préalable des variations des pentes de parement.

Il est nécessaire de coupler ce travail avec une analyse de la nature des ouvrages : par exemple, l'existence d'un perré maçonné peut contribuer efficacement à la stabilité d'un talus de digue d'apparence trop raide.

Une difficulté apparaît toutefois pour les talus instables des levées au contact du cours d'eau où la topographie subaquatique conditionne le déséquilibre. Il est nécessaire dans de tels cas d'utiliser des moyens d'investigation complémentaires au LiDAR classique comme le sonar. Les LiDARs bathymétriques aéroportés n'ont à ce jour pas la précision suffisante pour répondre à un tel besoin.

Erosion externe et affouillement

La faible distance de la digue par rapport à la berge du lit mineur est un facteur de risque vis-à-vis de l'érosion externe due aux contraintes hydrauliques (courants, tourbillons, ...) apportées par le fleuve, notamment lors des crues. Les tronçons de digue situés dans des zones de rétrécissement du lit majeur endigué sont aussi potentiellement exposés. Enfin, les arbres, piles de pont ou toutes constructions saillantes sur le parement côté fleuve sont à l'origine d'un risque d'affouillement.

Les digues en bordure immédiate du lit mineur sont les premières exposées au risque d'érosion externe ou d'affouillement. Si les tronçons concernés sont facilement repérables sur les photos aériennes de toute résolution, le repérage et la caractérisation géométrique des attaques effectives d'érosion nécessitent de disposer de photos aériennes haute résolution et, en cas de végétation arborée rivulaire susceptible de masquer les érosions, de données LiDAR haute densité [6]. Pour caractériser l'évolution de ces attaques d'érosion, il faudrait idéalement pouvoir comparer entre elles des photos aériennes haute résolution, prises à différentes époques de la vie de l'ouvrage : ce dont on ne disposera que dans l'avenir une fois que l'on aura répété les acquisitions à haute précision sur le même site. Encore conviendra-t-il de s'assurer que ces acquisitions photographiques soient effectuées avec des niveaux du fleuve similaires (et plutôt bas), afin de faciliter l'analyse comparative des talus côté fleuve de digue et de l'état des berges.

Conclusion - Perspectives

A l'appui d'un cas réel d'application, le présent article décrit une méthodologie d'exploitation des données de télédétection LiDAR et d'imagerie aériennes haute résolution pour contribuer efficacement à un diagnostic de digues fluviales situées en zone urbaine ou rurale.

Les coûts d'acquisition et d'élaboration des livrables (MNS et MNT, orthophotographies, plans topographiques, ...) sont de l'ordre de 1500 à 2000 euros/km, selon les spécifications du cahier des charges et dès lors qu'un linéaire supérieur à 70-80 km est levé (cette distance minimale correspond à une journée d'hélicoptère).

L'apport ou la complémentarité avec d'autres moyens ou méthodes d'investigation demeure indispensable pour aboutir à un diagnostic complet : étude historique et analyse documentaire, examen visuel sur le terrain, reconnaissances géotechniques, levés subaquatiques,.... Les documents topographiques qui sont fournis au terme de la campagne d'acquisition LiDAR constituent par la suite de précieux outils de suivi des ouvrages pour le gestionnaire de digue.

En perspective, notre méthodologie – tant sur le plan des modalités d'acquisition des données que sur celui de leur exploitation ultérieure – mériterait d'être adaptée au cas du survol de digues en situation de crue ou post-crue du cours

d'eau. En effet, la télédétection LiDAR et imagerie héliportée, en associant très haute résolution et grand rendement, se révèle potentiellement très intéressante pour contribuer à un diagnostic de digue en crue ou post-crue au sens du guide [8].

Remerciements

Les recherches qui ont permis d'élaborer cet article ont été réalisées dans le cadre du projet FloodProBE financé par le 7^e PCRD de l'Union Européenne, avec les contributions de la DREAL Centre, de FUGRO-GEOID et d'Irstea.

Les auteurs tiennent à remercier également la SNCF pour son soutien financier à l'acquisition des données LiDAR sur le site pilote du Val d'Orléans, ainsi que Benoît Cajelot de FUGRO-GEOID pour sa relecture globale du présent article.

Références

- [1] Gomes-Pereira L.M., Wicherson R.J. (1999). Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (1999) 105-114.
- [2] Véga C., Durrieu S. (2010). Multi-level filtering segmentation to measure individual tree parameters based on LiDAR data: Application to a mountainous forest with heterogeneous stands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, n° 4, p. 646-656.
- [3] Haugerud, Harding (2001). Some algorithms for virtual deforestation of LiDAR topographic survey data. *ISPRS Workshop on Airborne Laserscanning*, Annapolis, October 2001.
- [4] Collins, B.D., Sitar, N. (2004) Application of High Resolution 3D Laser Scanning to Slope Stability Studies. 39th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, Butte, Montana, pp. 79-92.
- [5] Panissod, F. ; Bailly, J.S. ; Durrieu, S. ; Jacome, A. ; Mathys, N. ; Cavalli, M. ; Puech, C. (2010). Qualification de modèles numériques de terrain LiDAR pour l'étude de l'érosion : application aux badlands de Draix. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 192, p.50-57.
- [6] Clément A., Mériaux P. (2007). La télédétection LiDAR : projet « FliMap-Digues » et derniers développements de l'utilisation de méthodes à haut rendement pour la reconnaissance des digues fluviales françaises. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 186, p. 87-91.
- [7] Vennetier M., Mériaux P., Buset F., Felix H., Lacombe S. (2010). Utilisation de la télédétection LiDAR aéroporté haute définition pour la caractérisation de la végétation des digues. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n° 191 (mai 2010).
- [8] Mériaux P., Royet P. (2007). Surveillance, Maintenance and Diagnosis of Flood Protection Dikes: A Practical Handbook for Owners and Operators. *Quae Editions* 2007, 162 p.
- [9] Tourment R., Royet P., Morris M.W. (2012). Levee failures related to structure transitions: typology, levee performance and improvements. 2nd European Conference on FLOODrisk Management (FLOODRisk 2012), Rotterdam (The Netherlands), November 20-22 2012.
- [10] Mériaux P., Monier T., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012, à paraître). L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 Novembre 2012, Chambéry.

Mots-clés : télédétection, LiDAR, digue, diagnostic, MNT