

Record Number: 16610
Author, Monographic: Morin, J.//Bernier, M.//Secretan, Y.
Author Role:
Title, Monographic: Outils de production de modèles de terrain massif par méthodes aéroportées
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1999
Original Publication Date:
Volume Identification:
Extent of Work: 18
Packaging Method: pages
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 545
Location/URL:
ISBN: 2-89146-321-8
Notes: Rapport annuel 1999-2000
Abstract: Mini projet (dépôt à faire 6 juillet 1999, numéro de rapport donnée par téléphone)
Call Number: R000545
Keywords: rapport/ ok / dl

***OUTILS DE PRODUCTION DE MODÈLES
DE TERRAIN MASSIFS PAR MÉTHODES
AÉROPORTÉES***

Rapport de recherche No R-545

1999

Outils de production de modèles de terrain massifs par méthodes aéroportées

Mini-projet de Jean Morin

Direction de Monique Bernier et Yves Secrétan

Introduction

L'utilisation de la modélisation hydrodynamique pour adresser les problèmes environnementaux a engendré une demande presque insatiable de données numériques décrivant le terrain d'étude. L'analyse des risques d'inondation et des impacts environnementaux, l'optimisation des interventions, la compréhension des écosystèmes complexes et l'optimisation des habitats sont les objectifs généralement poursuivis par les modélisateurs. La description de la topographie, du substrat et des plantes ainsi que les informations sur l'immobilier et les infrastructures en général sont particulièrement en demande. Puisque la précision des réponses fournies dépend en bonne partie de la précision des mesures du terrain, la qualité et la quantité de ces mesures deviennent critiques pour la rentabilité et l'accessibilité des projets de modélisation.

La philosophie de modélisation du terrain développée à l'INRS-Eau fait appel à une caractérisation massive du terrain. Les capacités techniques des outils de modélisation développés (Secrétan et al. 1998) permettent en effet de gérer de grandes quantités de données géoréférencées. L'utilisation de maillages de diverses densités sur lesquels l'information peut être projetée, simplifie et accélère le traitement et l'analyse. De plus, ces avantages techniques laissent la liberté au modélisateur de choisir un maillage plus ou moins raffiné selon les contraintes et les caractéristiques du terrain, la puissance des ordinateurs, le type de modèle ou la précision voulue. Il est simple de réduire la quantité d'information en rendant plus grossier la taille du maillage; par contre il est périlleux de raffiner un maillage à une taille inférieure à celle des données de base. Il apparaît donc essentiel de pouvoir disposer d'un modèle de terrain massif, c'est-à-dire avec une grande densité d'information spatiale, afin de pouvoir raffiner la précision si nécessaire sans devoir retourner sur le terrain prendre des

mesures.

Ce document se veut un exercice de réflexion sur les moyens à prendre pour obtenir des modèles de terrain massifs à grande précision et à faible coût. La structure du document est loin des méandres de la recherche, qui fut itérative et qui avait comme objectif de trouver, de comptabiliser et même d'inventer des moyens de production de modèle de terrain massifs. Les réflexions et les renseignements pertinents à l'élaboration d'une stratégie de modélisation du terrain y sont résumés. Les sujets traités ici se concentrent sur les moyens de caractérisation aéroportée, puisque de façon générale les capteurs satellitaires présentent une précision trop faible pour nos besoins. Certaines pistes que nous avons suivies se sont avérées trop embryonnaires pour être utilisables à court terme, nous avons cependant considéré que quelques unes valaient la peine d'être présentées.

Dans ce document, les méthodes de caractérisation actuelles et leur performance sont analysées. Nous présentons les renseignements récoltés sur les supports de capteurs qui sont ou encore qui pourraient être utilisables, les capteurs les plus pertinents pour nos besoins ainsi que les données qui peuvent être produites. Nous avons exclus de cette analyse les méthodes proches de l'échosondeur, généralement déplacé à la surface de l'eau. De plus, certaines réflexions sur les moyens employés pour tirer le maximum de renseignements des capteurs sont présentées.

Les références utilisées proviennent principalement du réseau (www). Nous considérons que la recherche sur le réseau est le meilleur moyen d'avoir les informations les plus récentes sur les innovations technologiques utilisables à court terme. Les sites visités appartiennent généralement à des compagnies désirant diffuser une nouvelle technologie ou un nouveau service. Les sites universitaires ou gouvernementaux visités contiennent des synthèses de connaissances ou des descriptions de services offerts.

Modèle de terrain : méthodes actuelles

Les exercices de modélisation se concentrent généralement sur les cours d'eau et leur plaine inondable. Puisque les fluctuations de niveaux peuvent être importantes, la caractérisation du

terrain doit au minimum couvrir le lit majeur des rivières pour des récurrences extrêmes. On parle alors de terrain **submergé** pour la zone couverte par le lit mineur et de terrain **émergé** pour le reste. Les besoins peuvent aisément être redivisés en deux ensembles soit les zones non-navigables (**petites rivières**) et navigables (**grandes rivières**).

De façon traditionnelle, cette activité d'acquisition des données s'effectue à l'aide des outils de l'arpenteur soit le théodolite et la règle de visée, et ce pour les terrains émergents et submergés de moins de 1 m d'eau (petites rivières). L'introduction de la « station totale » a permis d'accélérer la prise de données. Cette technique a été utilisée avec succès sur les rivières Sainte-Marguerite (Lafleur 1997, Rioux 1998) et Montmorency (Doyon 1997). Bien qu'efficace, cette méthode exige un effort soutenu d'au minimum deux personnes durant plusieurs semaines.

Bien que les rivières Montmorency et Sainte-Marguerite soient de gabarits différents (module de 20 et 5 m³/s respectivement) et que la densité de points ne soit pas la même, on peut comparer la performance de la méthode à l'aide du nombre de points mesurés par jour. Rioux a obtenu une bonne performance en utilisant deux prismes de visée au lieu d'un seul. Cette méthode est considérée comme étant précise à ± 10 cm.

Le positionnement dGPS a également été utilisé sur la rivière Sainte-Marguerite pour délimiter les berges à divers débits. Cette technologie comporte plusieurs difficultés d'application sur les petites rivières encastrées et bordées de grands arbres. En effet, le contact avec les satellites est rendu difficile et de nombreux problèmes de réflexion sur la végétation ont été observés.

Tableau 1 : Résumé des performances de mesure à la « station totale ».

	Nbr points	mètre/point approx.	Nbr personne	Temps approx.	Coût commercial: \$/point
Montmorency (Doyon)	12 000	5	2	3 semaines	0.30\$
Sainte-Marguerite (Lafleur)	3 000	2	2	2 semaines	0.80\$
Sainte-Marguerite (Rioux)	9 000	2	3	3 semaines	0.60\$

L'utilisation de photos aériennes à diverses échelles permet d'obtenir une caractérisation de la partie émergente des domaines étudiés. En utilisant des séries de photos en stéréoscopie, des firmes spécialisées peuvent produire un modèle de terrain topographique dont la précision verticale dépend de l'échelle de la photo ; une série de photos au 1 :20 000 permet une précision verticale d'environ 2 m tandis qu'une série au 1 :2 000 permet une précision d'environ 20 cm. Bien qu'efficace, cette technique est limitée par la quantité de photos, qui augmente au carré de l'échelle utilisée, et par la disponibilité de ces mêmes photos. Dans une étude au Saguenay (Leclerc *et al.* 1998), un modèle de terrain de 100 000 points à une précision verticale de 75 cm et une densité d'environ 30 mètres/point a coûté 45 000\$, soit 300 \$/km².

Pour la partie submergée des grandes rivières telles que le fleuve Saint-Laurent, l'échosondeur combiné à un dGPS est utilisé avec succès depuis plusieurs années par le Service Hydrographique de Canada, la Garde côtière et par le partenariat DEA/INRS-Eau. Bien qu'exigeante en temps, de par les grandes superficies impliquées, cette méthode est efficace et flexible, et elle est généralement considérée précise au 10 cm dans la verticale. Dans le cas de rivières navigables mais de moindre importance que le fleuve, l'utilisation de l'échosondeur couplé au dGPS est très efficace. Toutefois, à cause de la présence de plantes aquatique en été et de glace en hiver la fenêtre d'acquisition efficace se limite au printemps. Pour le Saint-Laurent, l'acquisition de données près des berges et en zone émergente demeure un casse-tête puisque l'on parle alors de quelques centaines de km² à couvrir : une tâche titanesque pour une équipe « d'arpenteurs ».

Modèles de terrain massifs : objectifs et besoins

La caractérisation du terrain d'étude est pour l'instant le facteur limitant l'application généralisée de la modélisation dans les problèmes environnementaux. L'obtention de modèles de terrain massifs à faible coût nous permettrait une accessibilité à un vaste marché de petit budget, comme celui des municipalités aux prises avec des problèmes d'inondation ou encore celui des pays en voie de développement. On pourrait également simuler des rivières sur de

très long tronçon, dans l'optique de décrire les habitats du poisson, tout en évitant les difficiles problèmes méthodologiques de choisir le tronçon représentatif de la rivière.

Les besoins idéaux en caractérisation du terrain peuvent être résumés brièvement : la mesure de la topographie doit avoir une densité d'environ 1 point tous les 2-3m pour les petites rivières et d'environ 1 point tous les 10 m pour les grandes rivières comme le fleuve Saint-Laurent. La précision des mesures de topographie doit être inférieure à 1 m dans l'horizontale et inférieure à 20 cm dans la verticale. De plus les niveaux d'eau doivent être mesurés à plusieurs endroits avec une précision inférieure à 5 cm. La situation idéale serait d'avoir le niveau d'eau mesuré sur tout le domaine afin d'assurer une calibration et une validation satisfaisante. La distribution spatiale des substrats doit être caractérisée avec une précision qui dépend de la taille du cours d'eau; une précision de ± 1 m sur le positionnement des zones de substrat est satisfaisante dans la plupart des cas. Les mêmes critères de précision peuvent s'appliquer pour la distribution des plantes et des constructions. La validation des modèles de vagues se fait de façon idéale avec une connaissance de la distribution spatiale des crêtes de vagues après que le vent ait créé des conditions de vagues stables. Une précision de ± 1 m sur le positionnement des crêtes de vagues est suffisante. Les vitesses du courant doivent être mesurées à plusieurs endroits avec une précision de l'ordre du cm/s, idéalement sur plusieurs sections en travers du cours d'eau. De plus pour les simulations de transport solide et dissout en milieu fluvial, la diffusivité doit être caractérisée.

Support de capteur

Pour ceux qui ont eu l'occasion de voler au dessus d'un territoire qu'il ont dû caractériser à pieds, une impression saisissante se dégage : celle d'avoir le modèle de terrain sous les yeux facilement accessible. Ce rêve est maintenant presque réalité alors que l'utilisation des capteurs aéroportés pour récolter l'information caractérisant le terrain semble prometteuse.

Avions

L'avion est et restera la plate-forme aéroportée la plus utilisée. Cet appareil est facilement disponible à un coût raisonnable. Les avions utilisés pour la prise de photos aériennes sont

bien adaptés pour accueillir les divers capteurs. Les capteurs sont généralement montés sur des boîtiers aux dimensions standard s'insérant dans la fenêtre sur le plancher de la carlingue.

Ballons (dirigeables)

Il n'existe que très peu d'information disponible (www) sur l'utilisation des dirigeables dans la récolte d'information. Bien qu'ils sont peu utilisés, les dirigeables (figure 1) présentent des avantages indéniable sur les avions. L'avantage le plus évident est une grande stabilité à faible vitesse. Nous ne nous sommes pas intéressés ici aux dirigeables supportant des passagers, mais seulement les systèmes avec contrôle à distance ont été analysés.

(www.uoguelph.ca/~antoon/websites/blimps.htm, www.blimpguys.com/outdoor~md.htm, www.elite.net/aeros/nruses.html, www.netcomuk.co.uk/~pig/new.html)

Les ballons qui volent aujourd'hui sont tous à structure non-rigide et comme les ballons à air chaud, ils font partie de la famille des « plus-léger-que-l'air ». Les dirigeables utilisés sont gonflés à l'hélium, un gaz qui a la capacité de soulever 1.02 kg/m^3 . La pression à l'intérieur du ballon est très faible à peine plus de 1 atm. De façon générale, les systèmes de télécommande des dirigeables disponibles sur le marché du « prêt-à-utiliser » ont une portée de 1 à 10 km. Les engins les plus intéressants pour nos besoins ont une taille d'environ 2-3 m de diamètre et de 10-15 m de long supportant une charge variant de 10 à 25 kg. En fonction du type de moteur propulsant l'engin, les vitesses qu'il atteint sont de l'ordre de 30 à 50 km/h, et peut supporter des vents de 20 km/h. Le coût d'achat pour ce type d'appareil est d'environ 25 000\$. Nous avons analysé plusieurs engins dont les caractéristiques et les coûts étaient disponibles sur le réseau. Il apparaît que les prix sont relativement les mêmes pour des engins de taille semblable.



Figure 1 : Dirigeable à contrôle radio.

Ce type de support aéroporté pourrait servir de plate-forme à faible coût pour occuper la niche des modèle de terrain de petite dimension. Bien qu'il ne soit pas évident que l'achat de ce type d'appareil soit rentable, il permettrait de monter une caméra vidéo et un instrument de mesure laser peu performant.

Autre support

La « peanut » de Bombardier

Bombardier a créé, pour répondre aux besoins actuels des militaires, un appareil extrêmement bien adapté au recueil d'informations aéroportés, et dont la forme générale ressemble à une arachide (Figure 2). Le CL-327 est une appareil à décollage et atterrissage vertical de 1.80 m de haut. Deux rotors d'hélicoptère de 4 m de diamètre, tournant en sens inverse, assurent sa stabilité et son contrôle directionnel. La vitesse en vol peut varier de 0 à 160 km/h tout en supportant une charge utile de plus de 100 kg. L'appareil est contrôlé à distance et permet l'utilisation d'à peu près tous les types de capteur. Le système de navigation est très précis et permet de répondre à des commandes de vol préprogrammées ou en contrôle direct. Les données peuvent être envoyées par lien radio pour traitement (www.services.bombardier.com/htmfr/A4A.htm).

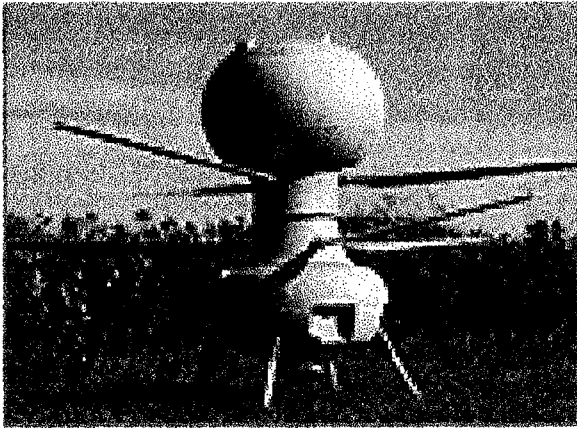


Figure 2 : Le CL-329 de Bombardier

Cette machine combine les avantages de l'avion et des ballons mais sans leurs inconvénients, à l'exception de son coût d'achat. En effet, cet appareil peut demeurer stable à basse altitude pour des missions de caractérisation de très petites rivières avec des topographies complexes, et peut également voler à grande vitesse à des altitudes élevées pour des terrains de grande dimension et à faible gradient topographique tel que le Saint-Laurent. Bien qu'actuellement inaccessible aux budgets non-militaires, ce genre de technologie pourrait dans l'avenir répondre exactement à nos besoins comme support aéroporté.

Capteurs

Une quantité impressionnante de capteurs ont été retrouvées sur le réseau. La plupart de ces capteurs ont été développés sur des plates-formes aéroportées en vue d'être placés en orbite sur les satellites. Certaines compagnies ont continués de produire les capteurs qui ont eu le plus grand succès. Par exemple il est possible d'acquérir des capteurs multispectraux, hyperspectraux, infrarouges, radars, radiométriques, passifs ou actifs pour couvrir à peu près tous le spectre électromagnétique en plus des instruments de mesure de distance à laser. Nous n'avons retenu que ceux qui avaient un potentiel évident et applicable à court ou moyen terme.

Profilomètre laser

C'est une nouvelle technologie apparue il y a une dizaine d'années et qui permet maintenant de caractériser d'immenses surfaces de terrain en quelques heures à une densité et une précision impressionnante. Il existe déjà plusieurs compagnies en Amérique du nord et en

Europe qui offrent ce service. Les différents systèmes sur le marché ont des capacités et des fréquences de mesure variables, qui sont plus ou moins efficaces selon le type de terrain.

De façon générale, tous les systèmes aéroportés de mesure laser sur le marché fonctionnent selon le même principe. Le laser produit des pulsations de lumière qui sont projetées sur un miroir rotatif tournant à une certaine fréquence et projetant le rayon laser vers le sol. Le signal est réfléchi et lu par un récepteur. La différence de temps entre l'envoi et la réception du signal est ensuite transformée en distance. Le récepteur ne conserve que la première et la dernière réflexion obtenue, produisant un modèle de terrain qui permet le calcul des hauteurs d'arbres ou de fils électriques. Bien que quelques lectures sont perdues dans la canopée, le laser est capable de mesurer le terrain en zones densément boisées.

Une plate-forme inertielle (IRS :Inertial Reference System) permet de connaître avec une grande précision le roulis, le tangage et la direction de l'appareil. Cet outil a deux fonctions dans le processus : celle de connaître l'angle absolu de l'appareil et du rayon laser et donc d'extraire la position réelle de l'objet réfléchissant la lumière, et de permettre d'extrapoler la position de l'appareil entre deux lectures du dGPS.

Les principales différences entre les systèmes sont liées à la puissance du laser qui permet de voler à des altitudes plus élevées et donc de couvrir plus de terrain par passage. De la même façon, plus le nombre de lectures est grand plus on pourra voler à haute altitude tout en gardant une densité de mesure satisfaisante. La précision des trois systèmes analysés est approximativement la même : une précision verticale de l'ordre de 10 à 15 cm et une précision horizontale de moins de 1 m. Les incertitudes sont principalement liées au positionnement dGPS.

Le système le plus performant est celui de Toposys puisqu'il permet la densité de sondages la plus grande. Les coûts d'opération que nous avons obtenus sont sensiblement les mêmes. Cependant les coûts de productions du MNT (modèle numérique de terrain) sont plus élevés si la densité est plus élevée. Le système le plus performant est également le plus dispendieux (tableau 2). Toposys propose des coûts de l'ordre de 500 \$ par km² avec une très forte densité. Cette compagnie prévoit augmenter la puissance de son laser et ainsi permettre de

réduire les coûts de production.

La compagnie Consultant GPR qui opère le ALTM 1020 est en voie de modifier son système en augmentant la puissance du laser et en diminuant le diamètre du rayon laser dans l'optique de doubler la hauteur de vol typique à 1600 m. En tout, les coûts des opérations de prise de mesure serait réduit d'un facteur de 3. Excluant les 10 000 \$ à investir au démarrage, la mesure de 1 km² de terrain coûte actuellement 200 \$, incluant les zones de recoupement. Le coût passera donc à moins de 70 \$ le km². Toutefois, la densité de points de mesures serait légèrement plus faible que la densité actuelle.

	Fréquence	Hauteur de vol	Densité
Toposys (Allemagne)	83 000 Hz	300-1000 m (850 m)	4 à 5 mesures/m
ALTM 1020 (Canada)	5 000 Hz	300-1000 m (850 m)	1 mesure/2-3 m
ATM (USA)	3 000 Hz	300-1000 m (700 m)	1 mesure/3-4 m

Tableau 2 : Comparaison entre les différents systèmes laser analysés

Profilomètre lidar

Le lidar utilise à peu près les mêmes principes physiques que le profilomètre laser mais est applicable aux zones couvertes d'eau. Bien que l'on sache qu'il existe quelques autres systèmes dans le monde (Patrick Hallé, Pêches et Océans Canada, comm. pers.), seul le système SHOALS du «U.S. Corps of engineers» est présent sur le réseau. Ce système utilise les propriétés de réflexion et de transmission de l'eau et du fond pour obtenir un modèle de terrain haute densité. Lorsqu'une pulsation de lumière est émise, une partie revient au récepteur et une autre partie principalement composée de lumière bleu-verte pénètre la colonne d'eau jusqu'au fond. Elle est réfléchiée à son tour et captée par le même récepteur, et un ordinateur calcule la profondeur résultante à partir de l'intervalle de temps entre les deux lectures.

Le système SHOALS utilise ces propriétés à l'aide d'un rayon laser monter sur un hélicoptère Bell 212, dont la position est connue à l'aide d'un dGPS et d'une plate-forme inertielle. La densité de mesure généralement utilisée est d'environ 115 000 sondages par km², soit un point tous les 4 m avec une précision verticale de ± 15 cm et une incertitude sur le positionnement de ± 3 m. A cette densité de sondage, le système couvre 8 km² de sondages à l'heure. Une si grande erreur sur le positionnement est liée à la réfraction et la diffusion de la lumière dans la colonne d'eau; la précision est normalement plus grande en zone peu profonde.

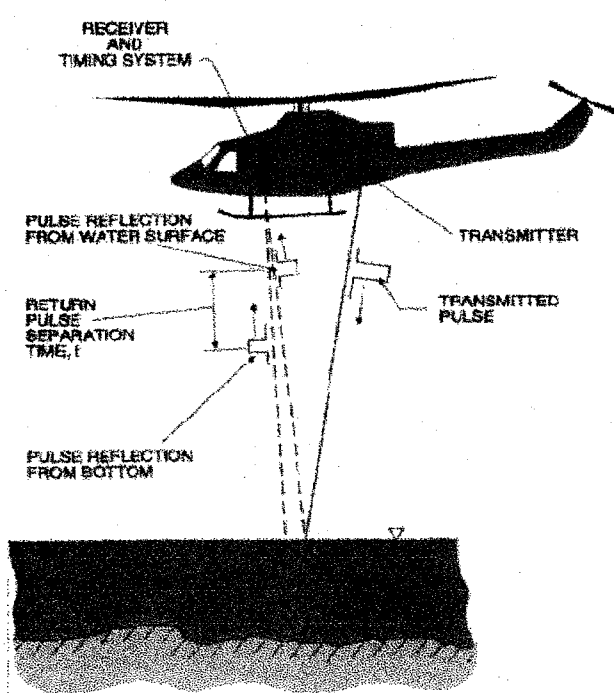


Figure 3: principe de fonctionnement du lidar

La profondeur maximale de pénétration du lidar (Figure 4) est d'environ 3 fois la profondeur Secchi soit environ 40 m pour les conditions marines normales. Le système SHOALS permet de mesurer les parties submergées et émergentes, il semble toutefois que la précision soit moins grande en partie submergée. Les données sont post-traitées à l'intérieur d'une unité mobile montée sur un camion de transport 10 roues et contenant les liens radios, les unités de lecture des bandes magnétiques et plusieurs ordinateurs dont une machine SUN Sparc-10. Ceci permet la production en une seule journée de plusieurs km² de sondages. (www.sam.usace.army.mil/sam/op/shoals).

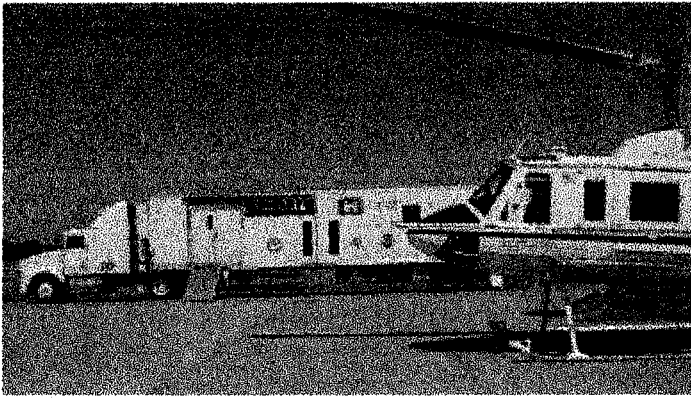


Figure 4 : Système SHOALS.

Il apparaît évident qu'un système aussi lourd ne permet pas qu'on l'utilise pour les projets à petit budget comme les nôtres. De plus, bien qu'extrêmement intéressant, ce système ne semble pas avoir été testé en eau vive. Le système de mesure lidar, sans l'équipement lourd qui l'accompagne pourrait devenir accessible dans le futur. Toutefois, son application dans les conditions de luminosité du Saint-Laurent semble limitée particulièrement dans la masse d'eau de la rivière Outaouais, chargée en matières en suspension.

Camera numérique et vidéo multispectrale

Parmi les besoins qui ont été exprimés plus haut, la description du terrain en termes de type de substrat, de plantes et de position de constructions pourrait se faire à l'aide d'images numériques orthorectifiées. La caractérisation pourrait également se faire de façon semi-automatique avec quelques expériences à l'aide d'images multispectrales. Plusieurs publications traitent de l'utilisation de caméra vidéo multispectrale aéroportée pour la cartographie des milieux humides (équipe de Tom Hardy, Utah State University). De plus la position des crêtes de vagues, des patrons de recirculation et de turbulence ainsi que la température de la surface de l'eau pourraient être cartographiées par cette méthode.

L'objectif principal de cette section était de faire une revue la plus exhaustive possible des systèmes vidéos existant et de leur coût de construction. Toutefois, après avoir analysé quelques sites, un article de D. King de l'Université Carleton (Ottawa) intitulé « Airborne multispectral digital camera and video sensor: critical review of system design and application », avait déjà été réalisé avec les mêmes objectifs. Cette section se limitera donc à décrire les points pertinents de cette recherche.

Les systèmes à caméra vidéo ou à caméra numérique permettent d'obtenir des images multispectrales à un coût d'un ordre de grandeur inférieur aux capteurs traditionnels. La niche la plus efficace pour ces systèmes se trouve dans les modèles de terrain avec des pixels dont les dimensions au sol varient des 0.1 à 3 m et dont la taille de l'image globale varie de 100 m à 3 km. Il semble que le meilleur rapport coût/bénéfice pour le nombre de subdivisions du spectre lumineux soit de 4 : bleu-vert (430-470 nm), vert-jaune (530-570 nm), rouge (680-720 nm) et infrarouge (780-820 nm).

Les caméras et vidéos fonctionnent généralement à 8 bits et permettent donc 256 tons de gris. Il en existe à 16 bits mais leur coût est très élevé. Typiquement, les caméras vidéos ont une définition d'image de 792x480 pixels, tandis que les caméras numériques ont 1024x1024 pixels. Encore une fois, il existe des systèmes à plus haute définition mais leur coût est le facteur dissuasif. Les caméras digitales, bien que plus dispendieuses que la vidéographie, ont un meilleur potentiel pour le développement d'outils de télédétection. Les contrastes sont plus importants et la résolution spatiale supérieure. La plupart des caméras disponibles permettent de contrôler par ordinateur la vitesse d'obturation, le nombre d'images par secondes et le type de gain.

Les systèmes existants se divisent en deux groupes principaux: les systèmes à caméras multiples et à caméra simple avec filtres mobiles. Un système à caméras multiples peut être développé pour moins de 90 000 \$ avec des caméras digitales de 1024x1024 et entre 30 000 \$ et 75 000 \$ pour un système vidéo, tandis qu'un système à caméra simple nécessite entre 15 000 \$ et 30 000 \$. Les deux systèmes ont des avantages et des inconvénients.

Les senseurs d'un système à caméras multiples doivent être montés sur un support absorbant les vibrations et doivent être alignés le mieux possible. Il semble qu'un alignement parfait soit extrêmement difficile à réaliser et que cet alignement ne soit pas stable. On doit alors faire subir aux images un post-traitement qui permet de réaligner les images à l'aide d'un algorithme qui optimise la corrélation entre les images, à partir de mouvements possibles des caméras. Les caméras doivent être synchronisées et les images numérotées afin de pouvoir retrouver les images correspondantes.

Les systèmes à caméra simple comportent l'avantage que l'on ne doit pas monter un système de synchronisation, ni s'occuper d'aligner les caméras et les images. La capture des différentes bandes spectrales se fait à l'aide d'un support de filtres rotatif et synchronisé avec les prises de vue de la caméra. Puisque les images ne peuvent être prises simultanément, il y a une perte de couverture du terrain au bas et au haut de l'image entre les différentes bandes spectrales. De plus le stockage des images d'une caméra digitale simple cause plus de problèmes puisque la vitesse de transfert nécessaire est très élevée.

Le système avec le meilleur rapport qualité/prix selon D. King est un système avec une seule caméra numérique et coûte environ 30 000\$ à construire (Figure 5). Le capteur de la caméra produit des images de 1024x1024 de 8 bits sur un maximum de 8 bandes spectrales en 1.2 secondes. Chaque image produit un fichier de 1.3 Mb soit un flux de données maximum de 10 Mb/s. Actuellement, le flux de données est trop grand pour être stocké sur un support de bande magnétique à coût abordable, toutefois ce genre de système sera bientôt sur le marché à moindre coût. Pour régler ce problème, une unité de stockage mémoire de 256 Mb est utilisée et transférée à la bande magnétique entre chaque passage de l'avion.

AMDFCS

Airborne Multispectral Digital
Frame Camera Sensor

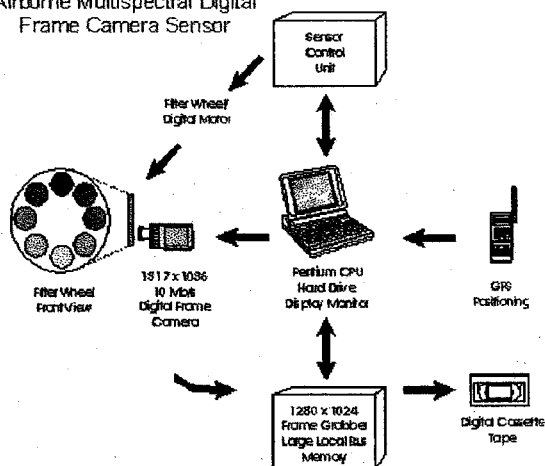


Figure 5: Système de capteur multispectral AMDFCS

L'utilisation de ces systèmes aéroportés a eu lieu dans plusieurs contextes qui sont proches de nos besoins. La mesure de la quantité de matières en suspension, la cartographie des sédiments dans des rivières peu profondes, la cartographie des habitats du poisson ont toutes été réalisées à l'aide de prises de vues aéroportées à des coûts d'environ 150\$ l'heure.

Certains modèles d'élévation ont été produits à l'aide de ces outils et de façon générale, la précision est de l'ordre de la taille du pixel sur le terrain, ce qui est inférieur à la qualité du modèle d'élévation dont nous avons besoin. L'auteur ne discute pas de l'orthorectification des images, alors que cette opération est essentielle à l'utilisation des images pour la cartographie des éléments qui nous intéressent. Il existe de nombreux logiciels sur le marché qui font cette opération (voir orthorectification en annexe).

Autres capteurs

Un projet de capteurs multiples (projet AMPS) aéroportés a été mis en marche par le U.S. DOE (Department of Energy). Le projet a permis de déployer 3 systèmes de multicapteurs montés sous l'aile d'un avion avec différentes spécialités pouvant fonctionner ensemble ou de façon indépendante. Les objectifs principaux de ce programme sont de faire travailler les chercheurs avec plusieurs capteurs sur exactement les mêmes données pour en faire sortir plus de renseignement que ne le ferait un seul capteur. L'intérêt principal des bailleurs de fond est de pouvoir disposer d'instruments fiables pour fournir des renseignements sur les déversements industriels, les feux de forêt ou les effets des tremblements de terre, bref tout ce qui peut affecter la sécurité du public.

Plusieurs des capteurs utilisés semblent avoir un énorme potentiel d'utilisation dans le futur; ce sont pour la plupart des outils que nous ne pourrions utiliser étant donné les coûts élevés associés. Les plus intéressants sont les suivants:

1. Le capteur thermique Barr&Stroud IR18 est un capteur infrarouge passif haute définition capable d'enregistrer des différences de 0.3 Celcius par pixel. Ce capteur serait particulièrement intéressant pour mesurer la température de surface du Saint-Laurent et probablement de pouvoir se servir de ces données pour calibrer la diffusivité.
2. Le capteur multispectral Deadalus (MSS : AMS 3600) et un capteur passif utilisant 10 bandes spectrales allant du bleu à l'infrarouge thermique. Il s'agit ici d'un classique de la télédétection qui peut cependant être remplacé par les caméras vidéo avec filtres.

3. Le capteur ITRES (CASI) est un capteur hyperspectral de type passif, il permet de prendre des images sur des bandes spectrales très fines ou encore il est capable d'enregistrer 288 bandes entre 420 et 930 nm. Cet instrument est extrêmement puissant et facilement adaptable à presque tous les contextes de recherche, mais probablement trop spécialisé pour nos besoins.

D'autres capteurs plus abordables sont également présents, caméra fixe de 23 cm x 23 cm (photo aérienne) et caméra vidéo couleur haute définition (768x493). De plus, une caméra vidéo à très basse luminosité y est installée.

Discussions et conclusions

Ce travail a permis de faire connaître une technologie qui était alors inconnue, soit la méthode de caractérisation par laser aéroporté de la topographies des zones émergentes. Suite à ce travail et aux contacts de notre équipe, cette méthode sera utilisée par le MEF pour la caractérisation des plaines inondables et bientôt par Environnement Canada pour la caractérisation des berges du Saint-Laurent.

La brève analyse des coûts que nous présentons montre la supériorité des lasers aéroportés comme méthode de caractérisation des plaines inondables, et ceci est valide pour les travaux de terrain de grande envergure. La photogrammétrie peut se faire à des coûts raisonnables pour les projets de moins de 20 à 30 km², mais cette méthode est limitée par la précision des mesures. La mesure à la station totale reste rentable pour les terrains de petites superficies, soit de moins de 1 à 2 km par tronçon sur les petites rivières. Lorsque le budget de travaux de terrain peut être supérieur à 15 000\$, il est avantageux de travailler avec le laser aéroporté en période d'été.

Les dirigeables pourraient devenir un support intéressant pour la prise de données par caméra numérique ou vidéo. Cependant la technologie laser est encore trop dispendieuse pour être montée sur cette plate-forme. Nous croyons, étant donné le relativement faible nombre de modèles de terrain de petites dimensions à caractériser, qu'il serait non-rentable d'investir dans l'achat d'un dirigeable et d'un système vidéo pour nos besoins. Il semble beaucoup plus

évident qu'une telle opération devrait se faire en collaboration avec la compagnie qui possède déjà la technologie de mesure laser. L'association des capacités du modelleur et des capacités techniques et de mise en marché de cette compagnie pourrait permettre de mettre au point la saisie, le traitement, la production de modèles de terrain multispectraux de façon semi-automatique.

L'utilisation de vidéographie ou de caméra numérique multispectrale combinée avec l'altimétrie laser devrait améliorer grandement la cartographie des plantes et du substrat ainsi que la calibration des modèles de vagues. Cependant, la vitesse du courant et le niveau d'eau ne peuvent pas être évalués par ces méthodes. L'utilisation de flotteurs colorés en sous-surface relâchés à différents intervalles permettrait de calculer la vitesse moyenne entre deux séries de photos consécutives. Pour ce qui est du niveau d'eau, la précision des techniques de mesure laser n'est pas suffisante pour nos besoins. La seule technique qui semble appropriée est l'utilisation de la station totale.

La calibration d'une bande spectrale infrarouge permettrait de connaître la précision des mesures de température de l'eau, ce qui serait un atout précieux pour les grandes rivières comme le Saint-Laurent. On pourrait éventuellement en arriver à évaluer les diffusivités mais également à utiliser la température comme variable abiotique. Les méthodes d'échosondage demeurent les plus performantes pour caractériser les courants, la profondeur et le substrat des rivières navigables.