tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

Discussion

Potentiel de la méthode

11.1.1 Retour d'expérience

Le test effectué en conditions "idéales" sur le Gardon d'Anduze a démontré la possibilité d'obtenir une mesure spatiale du relief immergé de rivière avec une grande densité et une bonne précision. Les conditions de ce test correspondent à une turbidité négligeable, une interface air/eau assimilable à un plan sur la zone (un miroir), et une résolution spatiale très fine. Les conditions de prise de vue ont pu être maitrisées en effectuant les acquisitions depuis une plateforme fixe.

La mise en oeuvre opérationnelle de la méthode en conditions réelles à montré la nécessité de développer un protocole de mesure spécifique au milieu "rivière" et aux technologies utilisées (plateformes ultra-légères et capteurs petit format). Nous avons de plus intégré des traitements supplémentaires dans le processus d'estimation des altitudes immergées. Nous avons notamment eu recours à une méthode d'estimation fine de la position de l'interface en tout point par l'intégration de contraintes hydrauliques. Un filtrage spatial a ensuite été mis en place afin de diminuer la dispersion de la mesure. L'ensemble des étapes constituant la méthode a permis d'obtenir en bout de chaîne une estimation des altitudes immergées avec un biais faible (moins de 5 centimètres) et une dispersion acceptable (une dizaine de centimètres).

La maitrise de la géométrie de prise de vue est un paramètre très important pour la faisabilité même de la mesure. En effet, il est nécessaire avec des capteurs petit

format de voler le plus bas possible afin d'accéder à la meilleure précision possible (section 6.2.1). Cela correspond en contrepartie à une réduction de l'espace des images occupé par les berges - et donc les points de contrôle au sol. Du fait de l'utilisation de plates formes légères, des décalages angulaires ou de position par rapport au plan de vol prévu peuvent survenir lors de l'acquisition. Ceux-ci peuvent avoir pour conséquence la perte de couverture des berges et donc de mires sur un côté de l'image. Dans le cas des acquisitions réalisées sur la Durance, malgré la marge qui avait été prise concernant la couverture des berges, ce phénomène a concerné 2 images sur 30.

En résumé, l'utilisation de moyens légers a conduit à une diversification des sources d'erreur pour l'estimation des altitudes des points immergés. L'estimation finale avec une bonne précision de ces altitudes n'a été possible qu'au prix de la mise en place (i) d'un protocole de terrain spécifique et surtout de l'optimisation des variables de l'acquisition (ii) de méthodes de traitement spécifiques adaptées au milieu (notamment mise en cohérence hydraulique et correction de la réfraction).

11.1.2 Sources d'erreur

Les sources d'erreurs évoquées plus haut sont nombreuses [Feurer et al., 2007b]. Leur influence relative est difficile à déterminer au niveau du résultat final. On rappelle ici la succession des processus effectués aboutissant finalement à l'estimation de l'altitude des points immergés : estimation de la géométrie interne, estimation de la géométrie externe, appariement de points, estimation de l'altitude de l'interface, estimation de l'effet de la réfraction. A chacun de ces processus correspond une modélisation, qui introduit un biais et une imprécision. La méthode proposée a permis de limiter les biais et les imprécisions à chacune des étapes. Du fait de la corrélation spatiale des variables mises en jeu, la dispersion de la mesure a pu être réduite en effectuant un filtrage spatial.

On observe sur la carte des profondeurs obtenue (figure 11.1) quelques zones pour lesquelles il semble y avoir des erreurs systématiques. Ces zones sont constitués d'ensembles de points pour lesquels les erreurs d'estimation semblent présenter une cohérence spatiale. Les trois facteurs d'explication de ces erreurs systématiques les plus probables sont : la présence de végétation immergée, la mauvaise estimation locale de l'altitude de l'interface ou encore la restitution de points situés à la surface ou dans la colonne d'eau.

Pour les deux zones situées le plus à l'amont (zones 1 et 2), la sous-estimation des

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

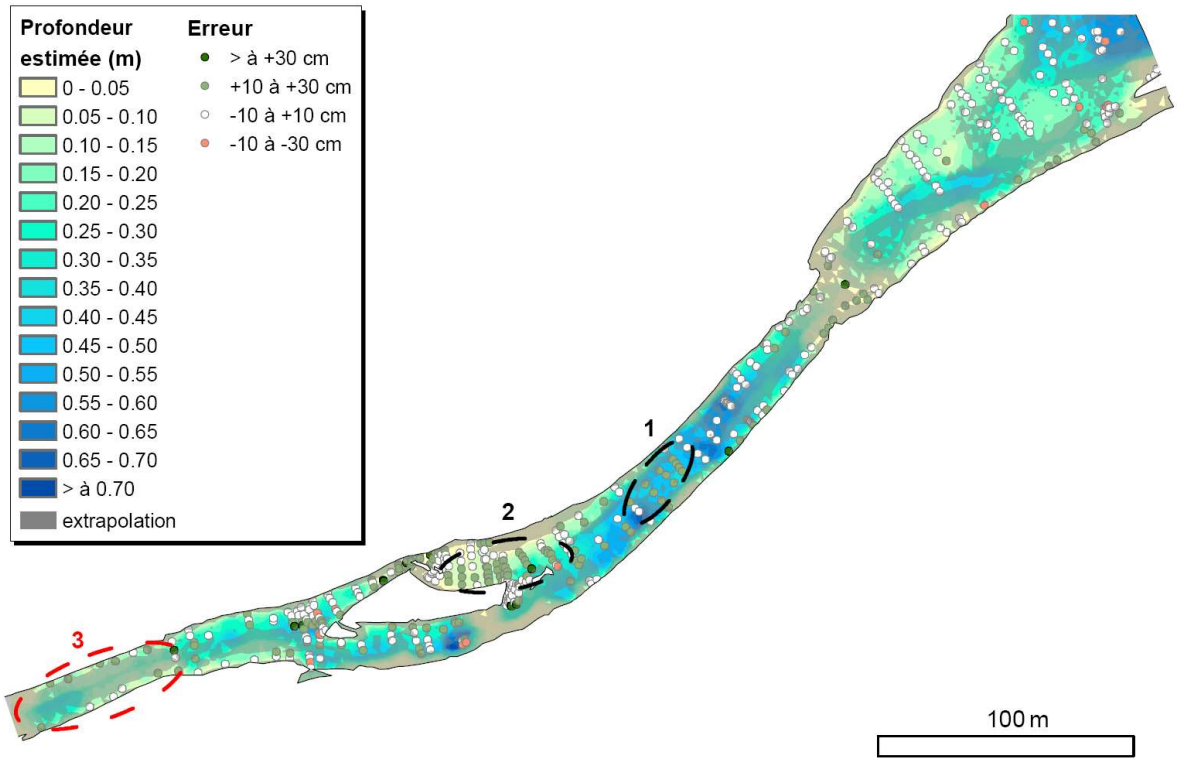

FIG. 11.1 - *Erreurs d'estimation des altitudes, superposées à la carte des profondeurs estimées. Les ovales en pointillés correspondent à des zones pour lesquelles il semble y avoir une erreur systématique*

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

profondeurs est expliquable par la présence de massifs algaux. Le cas de la zone 2 est particulier : il s'agit d'une zone de très faible profondeur, assez plate, comportant de nombreuses pierres isolées détectables dans les images par leur ombre portée. La sous-estimation des profondeurs peut provenir de la restitution de points situés sur le dessus des pierres. De plus, dans la zone 2, l'altitude de l'interface peut être mal estimée. D'une part, la bordure de lit mouillé en rive droite est difficile à déterminer dans les images du fait de la présence de végétation. D'autre part, en rive gauche de ce bras (rive droite de l'île), les altitudes de la bordure de lit mouillé sont mal estimées. Sur le terrain même, cette ligne est délicate à définir (relief très plat, substrat comportant des pierres isolées émergées). À cela vient s'ajouter le fait que cette portion de rive est courte. L'estimation des altitudes par la mise en cohérence hydraulique est basé sur un faible nombre de points de bordure de lit mouillé. On se trouve en limite d'application d'un tel algorithme, implémenté en 1D.

Pour la zone la plus aval (zone 3 sur la figure 11.1), il est plus difficile de proposer une hypothèse, du fait notamment du faible nombre de points concernés. Il peut s'agir d'une mauvaise estimation de la position de l'interface. Cette zone est en effet située à l'extrémité du site d'intérêt. Cette mauvaise estimation peut correspondre à l'effet de bord de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique : l'estimation est moins bonne aux extrémités du fait de l'absence de contraintes d'un côté (ici à l'aval).

11.1.3 Points forts de la méthode

L'application de la méthode a démontré la faisabilité de la mesure sur une zone d'intérêt de plusieurs centaines de mètres avec un biais de 4.3 centimètres et une précision de 10.5 centimètres (écart-type de l'erreur). L'acquisition a été réalisée par des moyens légers permettant la réactivité à la survenue d'évènements ponctuels. La méthode donne a priori les meilleurs résultats sur des sites d'études présentant des faibles profondeurs, et des fonds hétérogènes est présente donc une très forte complémentarité avec les autres méthodes de télédétection.

D'une part avec les méthodes radiométriques, pour lesquelles les fonds doivent être homogènes, et dont les modèles simples d'atténuation présentent des limites pour les faibles profondeurs [Lyzenga, 1978]. De plus, la méthode que nous avons développée permet d'accèder à la topographie immergée (mesure absolue) alors que les modèles radiométriques permettent d'estimer la bathymétrie (mesure relative).

D'autre part avec la complémentarité est forte avec le LIDAR bathymétrique, qui

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

présente des limites pour les faibles profondeurs [Lesaignoux et al., 2007] et semble obtenir de meilleurs résultats pour des surfaces rugueuses [Bailly et al., 2007].

11.1.4 Limites identifiées

Les principales limites de la méthode proviennent des conditions nécessaires à son application : possibilité de restituer le relief immergé et, pour la correction de l'effet de la réfraction, la ligne de rive.

Pour cela, les rives doivent être dégagées, le fond doit être hétérogène, l'eau doit être claire et peu profonde, l'interface la plus plane possible. Les rivières peu profondes à fond de gravier sont des sites d'application possible de la méthode. D'autres méthodes doivent être mises en oeuvre dans le cas de rivières ne présentant pas ces caractéristiques [Lane, 2000].

Les autres limites concernent l'acquisition même des données et les technologies utilisées.

On a vu d'une part que l'utilisation de plateformes légères conduisait à l'acquisition de bandes d'images pour lesquelles l'application opérationnelle de la méthode pouvait être délicate (possibilité résiduelle de lacunes dans la zone stéréo notamment). Si l'expérience menée sur la Durance a prouvé qu'une telle application était possible, elle a en revanche mis en lumière les difficultés correspondant à l'établissement d'un jeu de données volumineux et sans "trou". La méthode telle quelle - avec les moyens technologiques utilisés et les choix effectués - paraît donc limitée à l'acquisition de bandes d'images cohérentes (conditions d'acquisition homogènes) sur des zones de surface (quelques dizaines d'hectares). Il serait donc préférable de fractionner l'acquisition pour la couverture de plus grandes zones.

D'autre part, l'utilisation de capteurs non-métriques petit format à bord de plates formes légères résulte en un compromis délicat (fortes contraintes) et très fragile (stabilité du vol) sur la précision de la restitution altimétrique. Celle-ci est en effet liée d'un côté (si l'on considère que les paramètres d'orientation sont connus très précisément) à la résolution au sol et au rapport base sur éloignement et de l'autre côté justement à la précision d'estimation des paramètres d'orientation (qui nécessite une bonne répartition des mires dans les images, et donc une couverture systématique des berges de part et d'autre de la rivière).

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

Une autre limite concerne la méthode d'appariement utilisée pour la restitution des altitudes apparentes.

En effet, on a vu que l'utilisation d'algorithmes de corrélation automatiques tels que celui implémenté par Leica conduisait à une très forte densité de points dans les zones peu profondes et à un fort taux d'échec ailleurs, résultant en un plan d'échantillonnage très irrégulier et hétérogène. Par ailleurs la méthode de corrélation automatique supervisée par vision stéréoscopique est très coûteuse en temps et nécessite la mobilisation d'un opérateur.

Enfin, une dernière limite de la méthode pourrait apparaître dans l'utilisation des mesures obtenues en entrée de modèles hydrauliques. En effet, sur une rivière telle que la Durance, dont la profondeur moyenne est faible (environ trente centimètres), un faible variation des hauteurs d'eau correspond à une forte variation des débits. Pour donner un ordre de grandeur, le débit moyen en Durance est d'environ $7\text{m}^3/\text{s}$. Une variation de dix centimètres correspond à un doublement du débit. Il y a donc un fort intérêt à évaluer la sensibilité des modèles hydrauliques aux données obtenues par la méthode présentée.

11.2 Perspectives

L'application de la méthode et l'analyse de ses résultats a mis en lumière son potentiel et ses limites. Si certaines de ces limites concernent le domaine d'application de cette méthode, d'autres sont cependant techniques (instruments, traitements). Il semble donc possible d'améliorer la méthode et les résultats obtenus en mettant en oeuvre des technologies et des méthodes différentes.

Dans un deuxième temps, le caractère opérationnel de l'application d'une telle méthode est confronté avec les méthodes de mesure de terrain.

Enfin, et c'est probablement dans l'exploration de cette voie que les gains pourront être les plus significatifs, le couplage de la méthode avec d'autres méthodes est examiné dans la section 11.2.3.

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

11.2.1 Pistes d'amélioration

11.2.1.a Acquisition

En premier lieu, l'utilisation de moyens techniques différents doit permettre de rendre l'acquisition plus robuste et ainsi mieux assurer le respect du plan de vol. Dans le cas de notre expérimentation, le contrôle de la qualité du jeu de données ne pouvait être effectué qu'après l'acquisition. De plus, la marge de manoeuvre était assez réduite, du fait notamment de la vitesse de la plateforme. L'utilisation de plateformes plus lentes, avec un contrôle du vol (centrale inertielle, pilote automatique) serait une première source d'amélioration à explorer pour la constitution d'un jeu de données de meilleure qualité. On peut en effet imaginer avec de tels vecteurs effectuer des prises de vue à plus basse altitude, avec un recouvrement des berges optimisé pour une résolution au sol minimale.

Le compromis réalisé entre les différentes variables d'acquisition est très serré en raison notamment des caractéristiques du capteur utilisé. La mise en oeuvre d'un capteur avec une plus grosse matrice pourrait permettre (i) de diminuer la résolution au sol des images tout en conservant une couverture des berges suffisante et/ou (ii) d'améliorer la géométrie de prise de vue en augmentant le B/Z pour une emprise au sol donnée.

Il serait de plus intéressant de tester un autre mode d'acquisition avec des moyens technologiques le permettant (capteurs permettant l'acquisition rapide de bandes d'image ou vecteurs lents). Afin d'améliorer les conditions de prise de vue vis à vis de la réfraction, l'utilisation de plus longues focales serait en effet à tester. Il serait dans ce cas nécessaire d'effectuer les prises de vues avec un rapport base sur éloignement plus fort. Afin de pouvoir garantir la couverture stéréo complète dans ces conditions, il serait nécessaire de réaliser des bandes d'images avec un très fort recouvrement. Le relief apparent serait restitué à partir de couples formés par des images non-successives, avec un recouvrement inférieur à la moitié de l'image.

11.2.1.b Estimation de la position de l'interface

Comme on a pu le constater lors de la modélisation de l'effet de réfraction - et probablement sur les résultats finaux - la connaissance de la position de l'interface joue

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

fortement sur la qualité du résultat final (biais, dispersion). Afin d'avoir une estimation de cette position la meilleure possible, on peut donc envisager plusieurs améliorations.

Tout d'abord, l'algorithme de mise en cohérence utilisé est un algorithme 1D. Il ne tire donc pas partie des propriétés 3D de l'écoulement. Un première amélioration possible serait le passage au 2D, exploitant les informations de l'ensemble des lignes de rives.

Il serait de plus possible de resserrer encore le système de contraintes en y intégrant quelques données aux limites (amont ; aval) obtenues par mesure sur le terrain au moment de la prise de vue.

Remarque : Il est de plus intéressant de constater que, pour des applications au milieu marin, la détermination fine du relief de l'interface elle-même constitue un problème de recherche à part entière [Wanek et Wu, 2006]. En revanche, la technique utilisée dans la référence proposée est incompatible avec les applications recherchées pour notre problématique. La faisabilité de la méthode implique une certaine texture de la surface et empêche donc la visibilité des objets situés au fond.

11.2.1.c Techniques de corrélation

Enfin, des techniques de corrélation différentes doivent être testées. Comme on l'a vu, d'une part l'appariement des points n'est pas facilité par la traversée de l'eau, et d'autre part la mesure du relief immergé contient un bruit intrinsèque lié à la traversée d'une interface non plane. Ces deux facteurs conduisent à une mesure brute du relief immergé lacunaire et intrinsèquement bruitée.

Or, si l'aspect spatial de la variable estimée a été intégré dans plusieurs étapes de la méthode proposée, ce n'est pas le cas pour l'étape de mise en correspondance des images. Des techniques d'appariement intégrant dans le processus de confection du modèle numérique du terrain des contraintes de régularité pour la surface restituée pourraient permettre de tirer parti de la dimension spatiale des informations issues des images [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006, Pierrot-Deseilligny, 2007]. Quelques tests réalisés en fin de thèse semblent confirmer le fort potentiel de l'intégration de ces techniques dans la méthode développée. Le résultat présenté sur la figure 11.2 est un modèle numérique de surface "apparente" brut. Il est globalement cohérent avec la réalité observée (structures des bancs de galets émergés, ripisylve en rive gauche). Pour la partie immergée, mise à part la partie située au sud de l'île, correspondant à des eaux

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

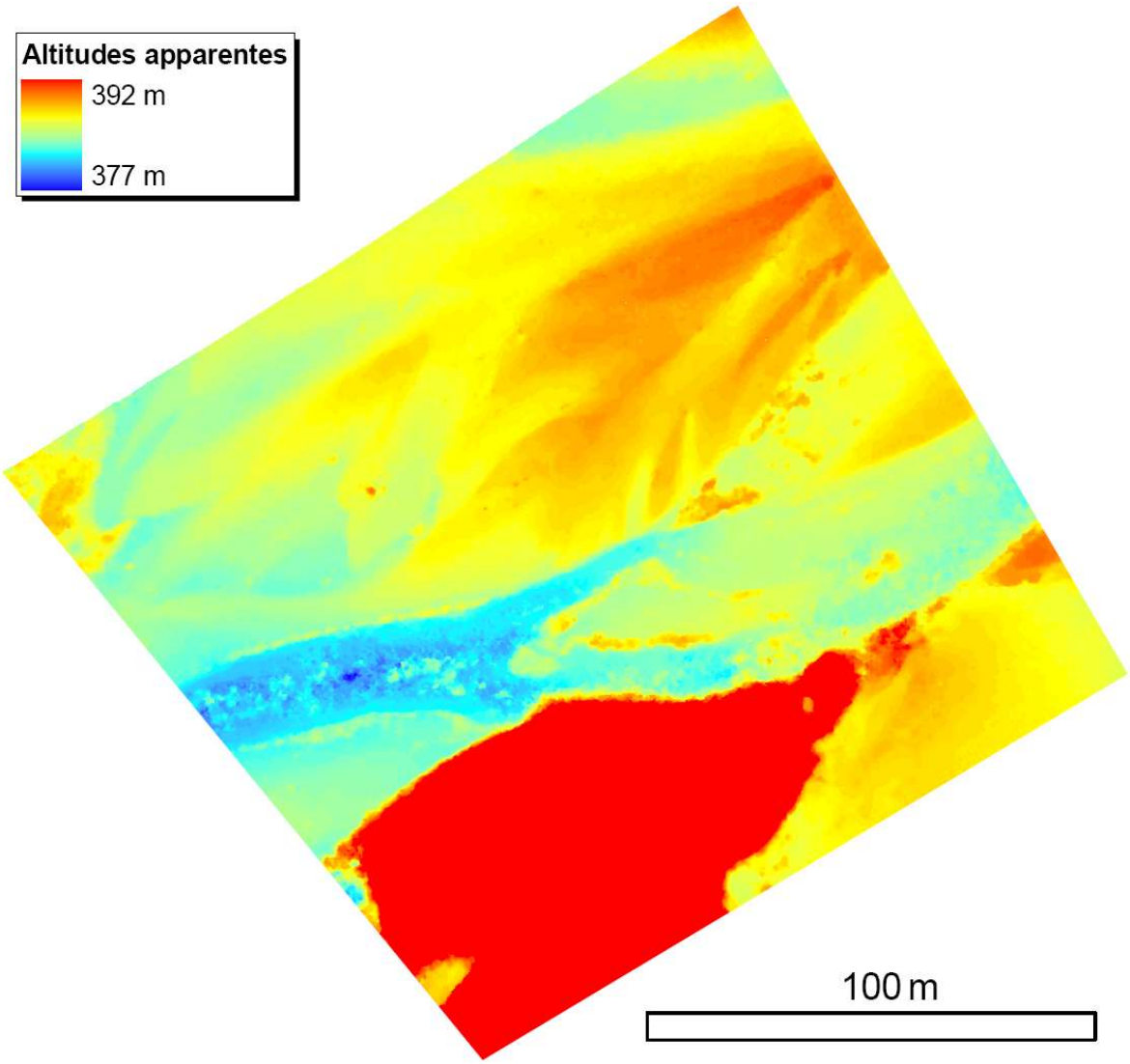

FIG. 11.2 - *Modèle numérique de terrain brut réalisé avec le logiciel MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2007]*

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

très turbides, la forme générale paraît réaliste. On détecte l'effet des reflets spéculaires à l'aval - à gauche - de l'île par la présence de "moutons". En revanche, entre ces zones de mesures aberrantes, la surface restituée semble correspondre au fond de la rivière (bleu profond). La mise en oeuvre de ce type de techniques de corrélation semble donc très prometteuse.

11.2.2 Caractère opérationnel

Un aspect essentiel de l'application de la méthode sur la Durance est son caractère opérationnel.

D'une part on a vu que la technologie utilisée restreignait par elle-même le domaine d'application opérationnel (rivières claires). En revanche, l'acquisition en conditions opérationnelles réalisée sur la Durance a démontré la flexibilité de la méthode et la possibilité de forte réactivité à des conditions de terrain favorables. Sur des rivières à fond graveleux et à faible profondeur, la méthode paraît donc applicable de manière opérationnelle. Comme on l'a dit plus haut, la couverture de grandes surfaces peut nécessiter le fractionnement de l'acquisition afin de garantir la formation de bandes d'images utilisables.

Par ailleurs, il est possible de s'essayer à un chiffrage grossier de la mesure de topographie immergée de rivière avec la méthode proposée, en supposant que les procédés de traitement soient rationalisés.

On a vu que l'acquisition des bandes de données image sur les deux sites de la Durance (total d'une cinquantaine d'hectares) nécessitait environ deux journées de travail de technicien (selon l'accessibilité du site et les données disponibles a priori), pour la préparation du plan de vol, l'équipement des sites en mires et finalement l'acquisition des images. Une fois la méthode développée, on peut compter de manière large une semaine de travail (moitié technicien - moitié scientifique) pour l'établissement des modèles numériques de terrain. Ce chiffrage horaire grossier, exprimé en numéraire[1], conduit à une enveloppe approximative d'environ 2000 euros au kilomètre linéaire (une station). Ce prix peut être doublé si l'on fait appel à un prestataire externe pour l'acquisition (avec un cahier des charges serré). Ce chiffre est à comparer avec l'enveloppe d'environ 20000 euros correspondant au coût au kilomètre linéaire des mesures de terrain actuelles.

[1] en s'appuyant sur les chiffres du devis présenté page 240

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

11.2.3 Couplage avec d'autres méthodes

Le potentiel de la méthode d'estimation de la topographie immergée par stéréophotogrammétrie et les spécificités de ses conditions d'application permettent d'envisager de fortes complémentarités avec d'autres méthodes de télédétection.

11.2.3.a Méthodes radiométriques

Comme il a été présenté dans l'étude bibliographique, deux des principales limites des méthodes établissant un rapport entre couleur de l'eau et épaisseur de la lame d'eau sont (i) le besoin de données de calage (ii) la nature même de la mesure : c'est une profondeur et non la topographie immergée.

La synergie entre cette méthode et la méthode présentée dans ce document paraît très forte, notamment dans le cas de l'utilisation d'images satellite à très haute résolution spatiale, type IKONOS ou QUICKBIRD. Une acquisition conjointe de données satellitaires sur l'ensemble de la zone d'étude et de données aériennes sur un site de calibration doit pouvoir permettre d'établir des modèles radiométriques à partir des mesures obtenues par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. Le site de calibration peut être choisi de manière à (i) être représentatif de l'ensemble de la zone ; (ii) optimiser les conditions d'application de la méthode par stéréo à travers l'eau. On peut ainsi envisager d'extrapoler les mesures effectuées sur le site de calibration à l'ensemble de l'image et ainsi obtenir une carte bathymétrique de l'ensemble du tronçon.

De plus, ces méthodes, basées sur un modèle simplifié d'atténuation logarithmique de l'énergie lumineuse, semblent limitées pour les très faibles profondeurs, pour lesquelles les phénomènes de diffusion et d'interaction à la surface ne sont plus négligeables [Lyzenga, 1978]. On a là encore une forte complémentarité avec la méthode par stéréophotogrammétrie à travers l'eau, pour laquelle les faibles profondeurs représentent des conditions d'application favorables.

Dans les autres cas (notamment turbidité forte) où la méthode radiométrique n'est pas applicable, il est possible d'utiliser les informations spectrales et des approches "objet" pour tirer des informations sur le substrat [Church et al., 1998], la végétation immergée [Puech et al., 2005], les unités hydromorphologiques [Wright et al., 2000,Puech et al., 2008] et/ou les habitats de la rivière [Marcus, 2002].

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

11.2.3.b Le LIDAR bathymétrique

Le lidar bathymétrique paraît être l'une des techniques les plus prometteuses pour la mesure des paramètres physiques de rivière, notamment du fait que : (i) elle est moins sensible à la turbidité que les techniques passives ; (ii) elle ne requiert pas de points de contrôle au sol. Elle n'est cependant pas opérationnelle pour ces milieux spécifiques qui posent des problèmes différents des milieux marins côtiers, par leur caractéristiques spatiales (étendue, continuité de la surface) et leur profondeur. Les surfaces immergées sont en effet en général plus faibles, ce qui peut poser des problèmes pour le réglage des gains d'amplification du signal reçu. Ces réglages sont nécessaires à la bonne détection du pic correspondant au fond de la rivière. De plus, la technique n'est pour l'instant pas validée pour les très faibles profondeurs (identification du pic dans l'infrarouge correspondant à la surface, discrimination des deux pics dans le vert, ajustement du retour de volume correspondant à la diffusion Raman dans le rouge).

Afin d'accéder à une mesure de toutes les unités de la rivière, il apparaît donc tout à fait pertinent de mettre en oeuvre une application couplée lidar/stéréo. Le plus souvent, des images avec un recouvrement de 60% sont déjà acquises lors des levés lidar. L'exploitation en stéréo de la bande d'image peut être réalisée afin de compléter les lacunes du nuage de points lidar pour les faibles profondeurs. Ces zones de la rivière correspondent aux zones pour lesquelles la densité de points obtenue avec la méthode développée est la plus importante (section 10.4.1). Les deux méthodes sont donc fortement complémentaires.

11.2.4 Suivi temporel - morphodynamique de la rivière

Le travail présenté et la méthode développée sont surtout centrés sur l'aspect spatial des données de télédétection et conséquemment sur les possibilités d'utilisation et de traitement des informations obtenues à partir de telles techniques.

Cependant, la mise au point d'une méthode de mesure de la topographie immergée de la rivière à partir d'images aériennes laisse entrevoir la possibilité d'effectuer le suivi temporel de la morphologie de la rivière. En effet d'une part le coût de la mesure est diminué par rapport aux campagnes terrain ; d'autre part, il est possible de répéter les acquisitions, au prix d'un ré-équipement du site en points de contrôle dans le cas où des crues ont modifié leur position ou les ont détruites.

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013

La technique mise au point doit ainsi permettre le suivi de l'évolution de la topographie immergée et émergée afin d'accéder à la compréhension de la morphodynamique de la rivière. On peut de plus envisager d'utiliser la méthode développée comme source de données de base pour des études locales de risque (innondations) ou encore pour des études d'impact (mesure d'un état de référence, mesure de la topographie de la rivière après aménagement).

tel-00818380, version 1 - 25 Jul 2013