

**CARACTÉRISATION DES BANDES RIVERAINES PAR TÉLÉDÉTECTION
SATELLITAIRE À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE**

Par

Karem CHOKMANI

Julio NOVOA

Centre Eau Terre Environnement
Institut national de la recherche scientifique
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1S 1W8

Projet 810313

Rapport de recherche
Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire

07 octobre 2013

© 2013, INRS - Eau Terre Environnement

Chokmani Karem, Novoa Julio, 2013. *Caractérisation des bandes riveraines par télédétection satellitaire à très haute résolution spatiale*. Rapport de recherche R1464, INRS-ETE, Québec (Qc) : 07 octobre 2013, 106 p.

ISBN : 978-2-89146-771-1

Table des matières

ACTIVITÉS DE DIFFUSION ET DE TRANSFERT AUX UTILISATEURS	7
LISTE DE CHERCHEURS, ORGANISMES PARTENAIRES ET DU RESPONSABLE DE L'INSTITUTION REQUÉRANTE	8
ACTIVITÉS DE TRANSFERT SCIENTIFIQUE.....	9
INTRODUCTION	11
OBJECTIF	15
MÉTHODOLOGIE	15
ZONE D'ÉTUDE.....	15
DONNÉES.....	16
VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DU TERRAIN.....	17
CALCUL DE L'INDICE DE QUALITÉ ET L'EFFICACITÉ DE LA BANDE RIVERAINE	18
RÉSULTATS.....	23
VALIDATION DU MNT	23
INVENTAIRE DE L'UTILISATION DU SOL	24
INDICE DE QUALITÉ DE LA BANDE RIVERAINE	25
EFFICACITÉ DE LA BANDE RIVERAINE EN MILIEU AGRICOLE	27
CONCLUSIONS	31
RÉFÉRENCES	33
ANNEXES	35

Liste des figures

Figure 1 : Bassin versant de la rivière La Chevrotière.....	16
Figure 2 : Méthodologie pour le calcul de l'indice de qualité et l'efficacité de la bande riveraine	18
Figure 3 : Présentation suggérée de l'IQBR.....	22
Figure 4 : Comparaison visuelle entre le modèle d'altitude satellitaire (à droite), et le modèle GPS qui représente la vérité terrain (à gauche) dans les trois parcelles agricoles sélectionnées.....	24
Figure 5 : Carte d'utilisation du sol des zones riveraines du bassin versant de la rivière La Chevrotière	24
Figure 6 : Statistiques du calcul de l'IQBR dans le bassin versant de La Chevrotière....	25
Figure 7 : Distribution spatiale de l'indice de qualité de la bande riveraine (IQBR) dans le bassin versant de La Chevrotière.....	26
Figure 8 : Indice de qualité de la bande riveraine dans les zones agricoles. À droite la zone agricole de Saint-Gilbert.....	27
Figure 9 : Qualité du drainage dans les zones agricoles. À droite la zone agricole de Saint-Gilbert	28
Figure 10 : Efficacité de la bande riveraine dans les zones agricoles. À droite la zone agricole de Saint-Gilbert.....	29

Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs

- Atelier de présentation de résultats aux organismes partenaires et potentiels utilisateurs (CAPSA, MAPAQ, INRS-ETE). 12 novembre 2013. INRS-ETE. 490 rue de la Couronne, Québec.
- Atelier de formation en technologies et méthodologies utilisées avec l'organisme partenaire (CAPSA). 17 décembre 2013. INRS-ETE. 490 rue de la Couronne, Québec.

Liste de chercheurs, organismes partenaires et du responsable de l'institution requérante

- Karem CHOKMANI Professeur-chercheur en télédétection et hydrologie au Centre - Eau Terre Environnement de l'Institut National de la Recherche et Scientifique. Responsable.
- Philippe DUFOUR Directeur général de la CAPSA. Organisme partenaire
- Josée Charest Directrice service recherche & développement au Centre - Eau Terre Environnement de l'Institut National de la Recherche et Scientifique. Responsable de l'institution requérant

Activités de transfert scientifique

- Présentation orale Karem Chokmani. *Validation "hydrologique" d'un modèle numérique d'altitude (MNA) produit à partir de l'imagerie satellitaire WorldView-2.* Séminaires au Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures. Agriculture Agroalimentaire Canada. 7 mars 2013. Voir Annexe.
- Article scientifique Novoa, J., Chokmani, K., Nigel, R., Dufour, P. *Quality assessment from a hydrologic perspective of a digital elevation model derived from WorldView-2 remote sensing data.* Accepté avec corrections mineures au Journal de Sciences Hydrologiques. Voir Annexe.
- Présentation orale Julio Novoa. *Riparian Buffer Strips Management Using WorldView-2 Images.* 34e Symposium canadien de Télédétection. Victoria, BC. 27-29 août 2013. Voir Annexe.
- Présentation orale Karem Chokmani. *Modélisation de l'érosion en zones riveraines cultivées à l'aide de la télédétection satellitaire optique à Très Haute Résolution Spatiale.* 15e Congrès de l'Association québécoise de télédétection. Rimouski, QC. 25-27 septembre 2013. Voir Annexe.
- Article scientifique Novoa, J., Chokmani, K., Nigel, R., Dufour, P. *Riparian Buffer Strips Management using WorldView-2 images. Study case : La Chevrotière River Basin.* Rédaction en cours.

INTRODUCTION

Les bandes riveraines figurent de plus en plus parmi les solutions envisagées pour protéger la qualité des eaux [1]. En effet, les bandes riveraines par leur capacité filtrante contribuent à réduire la pollution diffuse des eaux de surface en réduisant la charge de nutriments et de sédiments des eaux de ruissellement produites par les terres agricoles [2]. Elles jouent également un rôle de refuge et de réserve de biodiversité pour la faune et flore, de protection contre l'érosion et de brise-vent. En plus de ses fonctions écologiques, d'assainissement et de protection, les bandes riveraines contribuent aussi à l'intégrité et l'esthétisme du paysage rural [1, 3]. D'ailleurs, la condition écologique de cet habitat riverain est évaluée au Québec à l'aide de l'indice de qualité de la bande riveraine (IQBR). Cet indice est basé sur la superficie relative occupée par neuf composantes de la bande riveraine (portant sur l'état de la couverture végétale, la texture des sols et les aménagements anthropiques) [4].

Par conséquent, il est nécessaire de développer des approches opérationnelles non seulement pour cartographier le couvert végétal dans les zones riveraines, mais aussi pour surveiller les changements qui y surviennent, identifier les zones à prioriser pour des activités de restauration et évaluer le succès des mesures de gestion antérieures [5]. Toutefois, la cartographie précise des écosystèmes riverains constitue un réel défi vu la nature complexe de ces milieux [6]. Pour ce faire, les techniques traditionnelles de cartographie se basent essentiellement sur les observations sur le terrain assistées par la photographie aérienne. Ces observations sont par la suite consignées manuellement sur un support cartographique (numérique ou non). À titre d'exemple, le Groupe de concertation du bassin versant de la rivière Bécancour a réalisé en 2006 un portrait global des bandes riveraines sur une portion de 134 km de la rivière Bécancour à l'aide de relevés de terrain réalisés en canot [7]. Les résultats ont été compilés dans un SIG et ont permis de cartographier l'état des bandes riveraines selon leur largeur, le type de végétation et la présence de perturbation. Ces techniques demeurent toutefois très exigeantes en termes de ressources matérielles et humaines et ne permettent pas de couvrir de grandes superficies, sans être pour autant précises en raison de la vue partielle qu'on l'a du phénomène. La photographie aérienne s'est imposée alors comme une alternative viable pour la cartographie des écosystèmes riverains [8]. Cependant, malgré la précision que pourrait offrir les photographies aériennes (une résolution

spatiale de l'ordre de 20 cm), cette technique, en plus de sa pauvreté en termes d'information spectrale, nécessite des traitements additionnels (numérisation, orthorectification, mosaïquage, photo-interprétation, etc.) contribuant à augmenter les coûts de production sur les grandes étendues et limitant ainsi les possibilités de mises à jour plus fréquentes [6]. La photographie aérienne numérique multi-spectrale est venue combler certaines de ces lacunes. Ainsi, Vézina et al. ont démontré le potentiel de ce type d'imagerie et ses avantages par rapport à la photographie aérienne pour la caractérisation des bandes riveraines au Québec [9]. Toutefois, le coût d'acquisition de ces données demeure un facteur limitant. Dans le passé, la résolution spatiale de l'imagerie satellitaire offrait à peine la capacité pour cartographier la végétation riveraine à l'intérieur du corridor de 30m centré sur les cours d'eau [5]. De telles données continuent malgré tout d'être utilisées de par le monde pour la caractérisation et le suivi de l'état des milieux riverains : p.ex. aux États-Unis pour l'étude des changements des habitats riverains au cours d'une période 30 ans et sur l'ensemble du territoire américain [10]; au Canada pour le suivi de la dynamique spatiale de l'activité agricole en bordure des rivières [11]. Depuis, les progrès récents en matière de télédétection satellitaire en particulier l'avènement de l'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale ont amélioré sensiblement le potentiel de ces technologies pour le suivi et la gestion des bandes riveraines à des échelles très fines [5, 12] et ce, à des coûts d'acquisition par hectare très avantageux (évalués à 0,30\$/ha, versus l'imagerie numérique aéroportée estimée à 1,22\$/ha [9]). Ces dernières années, la résolution spatiale de l'imagerie par satellite a augmenté de façon significative. Un certain nombre de satellites commerciaux (WorldView-2, GeoEye-1) peut acquérir des images multi-spectrales à une résolution spatiale inférieure à 2 m et des données panchromatiques à moins de 50 cm de résolution pixel [12], s'approchant ainsi du niveau de détail de la photographie aérienne. Par ailleurs, grâce au développement des techniques de fusion de données numériques, il est possible d'injecter la haute résolution spatiale de l'image panchromatique dans les images multi-spectrales et obtenir ainsi des images multi-spectrales à une résolution spatiale de l'ordre de 50 cm [13]. Toutefois, étant donné que l'imagerie à THRS implique une très grande quantité d'information à traiter, les techniques usuelles de traitement d'image pixel à pixel peuvent s'avérer insuffisantes et risquent de produire des résultats peu cohérents [6]. En effet, le très haut niveau de détail de ce type d'imagerie se traduit par une grande variabilité dans les signatures spectrales des pixels limitant ainsi la possibilité de développement de signatures spectrales uniques pour la

classification des objets d'intérêt (p. ex., les pixels ombragés versus les pixels ensoleillés d'une frondaison d'un arbre). L'approche de classification par région ou orientée-objet [14] s'est montrée très efficace pour extraire l'information à partir de l'imagerie satellitaire à THRS en vue de la caractérisation des bandes riveraines [15, 16]. Cette approche a été utilisée avec succès pour étudier le potentiel de l'imagerie de THRS à cartographier les zones riveraines forestières sur l'île de Vancouver [6]. Au Québec, aucune étude appliquée à la problématique de suivi et de gestion des bandes riveraines et combinant imagerie à THRS et classification orientée-objet n'a été recensée.

Néanmoins, ces deux techniques ont été utilisées conjointement dans un contexte connexe à savoir la détection de l'écoulement des amas au champ et d'enclos d'hivernage vers le réseau de drainage de surface [17]. La classification orientée-objet utilise non seulement l'information spectrale des objets homogènes (regroupement de pixels) identifiés dans l'image mais aussi l'information spatiale, géométrique, sémantique et topologique comme: la forme des objets identifiés, la proximité et l'adjacence de ceux-ci, la texture ainsi que leur contexte. Elle permet également de hiérarchiser le processus de classification en différents niveaux sémantiques (générale, détaillée, agrégée, etc.) et gérer les liens entre ces différents niveaux. De plus, elle permet d'intégrer toute couche d'information auxiliaire à l'imagerie satellitaire, ce qui s'avère très utile pour la cartographie d'un environnement aussi complexe que les zones riveraines. À ce titre, le modèle numérique de terrain (MNT) permet de générer une série de couches d'information au niveau des parcelles (pente du terrain, les directions d'écoulement, les limites des micro-bassins) complémentaires à l'imagerie THRS et indispensables pour caractériser les bandes riveraines en termes de conformité (les largeurs minimales des bandes sont définies en fonction de la pente) et d'efficacité (celle-ci dépend de la portion de ruissellement produite par la parcelle limitrophe au cours d'eau et interceptée par la bande). Michaud et al. [18] ont analysé l'écoulement intra-parcellaire sur le bassin versant de la rivière Ewing en Montérégie à l'aide de données altimétriques de Lidar aéroporté. Ils en ont conclu que l'eau de ruissellement de 55% des micro-bassins versant intra-parcellaires n'est pas interceptée par les bandes riveraines. Toutefois, ils n'ont pas identifié explicitement sous forme cartographique les tronçons de cours d'eau concernés. Avec une précision verticale de 15 à 20 cm, les données altimétriques de Lidar aéroporté ou celles provenant de photographies aériennes acquises en stéréoscopie constituent une source alternative aux relevés altimétriques de précision

au sol (station totale ou GPS-RTK, pouvant atteindre une précision verticale millimétrique) pour la production d'un MNT de précision afin d'inférer la microtopographie intra-parcellaire. Toutefois, leurs coûts d'acquisition très élevés freinent leur utilisation opérationnelle sur le territoire agricole. En revanche, la stéréoscopie satellitaire à TRHS permettrait de produire des MNT avec une précision verticale inférieure à 50 cm [19]. En effet, tous les fournisseurs commerciaux d'imagerie de THRS offrent actuellement l'acquisition d'une paire d'images stéréoscopique permettant la reconstruction du relief en 3D. Ces données altimétriques se comparent avantageusement avec les données de Lidar aéroporté (RMSE par rapport au Lidar en terrain plat de 18 cm) [20]. Par conséquent, il serait intéressant de tester le potentiel de la stéréoscopie satellitaire à THRS à reproduire la microtopographie intra-parcellaire afin d'être utilisée en remplacement aux données aéroportées (Lidar ou photographie) pour générer les couches d'information complémentaires à l'imagerie à THRS et servant à la caractérisation des bandes riveraines.

Les bandes riveraines, connues pour ses effets bénéfiques sur la qualité de l'eau, les écosystèmes et la faune, sont protégées au Québec. Le ministère du Développement durable, environnement, faune et parcs (MDDEFP), à travers sa Politique de protection de l'eau, et plus spécifiquement à travers la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, a établi les largeurs minimales à respecter pour les conserver, et ainsi prévenir les processus d'érosion, le transport de polluants dans les cours d'eau, et pour servir également comme corridors écologiques, entre autres.

Des études ont été faites par plusieurs organismes reliés à la gestion du territoire, où ils montrent l'état écologique des bassins versants en utilisant l'indice de qualité de la bande riveraine (IQBR). Cet indice est généralement utilisé pour analyser et créer un portrait écologique, et ainsi aider dans la gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

Ce rapport technique est un résumé des travaux de recherche synthétisés principalement dans Novoa (2013a) et (Novoa, 2013b).

OBJECTIF

Développer une méthodologie opérationnelle pour la caractérisation des bandes riveraines à l'aide de l'imagerie satellitaire stéréoscopique à très haute résolution spatiale et de la classification basée en objets.

On a divisé cet objectif en trois volets :

- Créer de l'inventaire de l'utilisation du sol
- Évaluer l'indice de qualité de la bande riveraine
- Évaluer l'efficacité de la bande riveraine en milieu agricole

MÉTHODOLOGIE

Zone d'étude

Le bassin versant de La Chevrotière est localisé dans le MRC de Portneuf, à 60 km de la ville de Québec. C'est un bassin versant de 107 km² avec une topographie de plate à légèrement vallonnée, et majoritairement agricole. La rivière La Chevrotière s'écoule sur 29 km et c'est un affluent direct du fleuve St-Lawrence. Comme la plus part de bassins versants agricoles, ceci face des problèmes comme la pollution diffuse, l'érosion de berges et la perte de sol agricole. La figure suivante montre les limites du bassin versant et des photographies des trois champs agricoles où on a relevé des données GPS de haute précision pour valider le modèle numérique du terrain satellitaire.

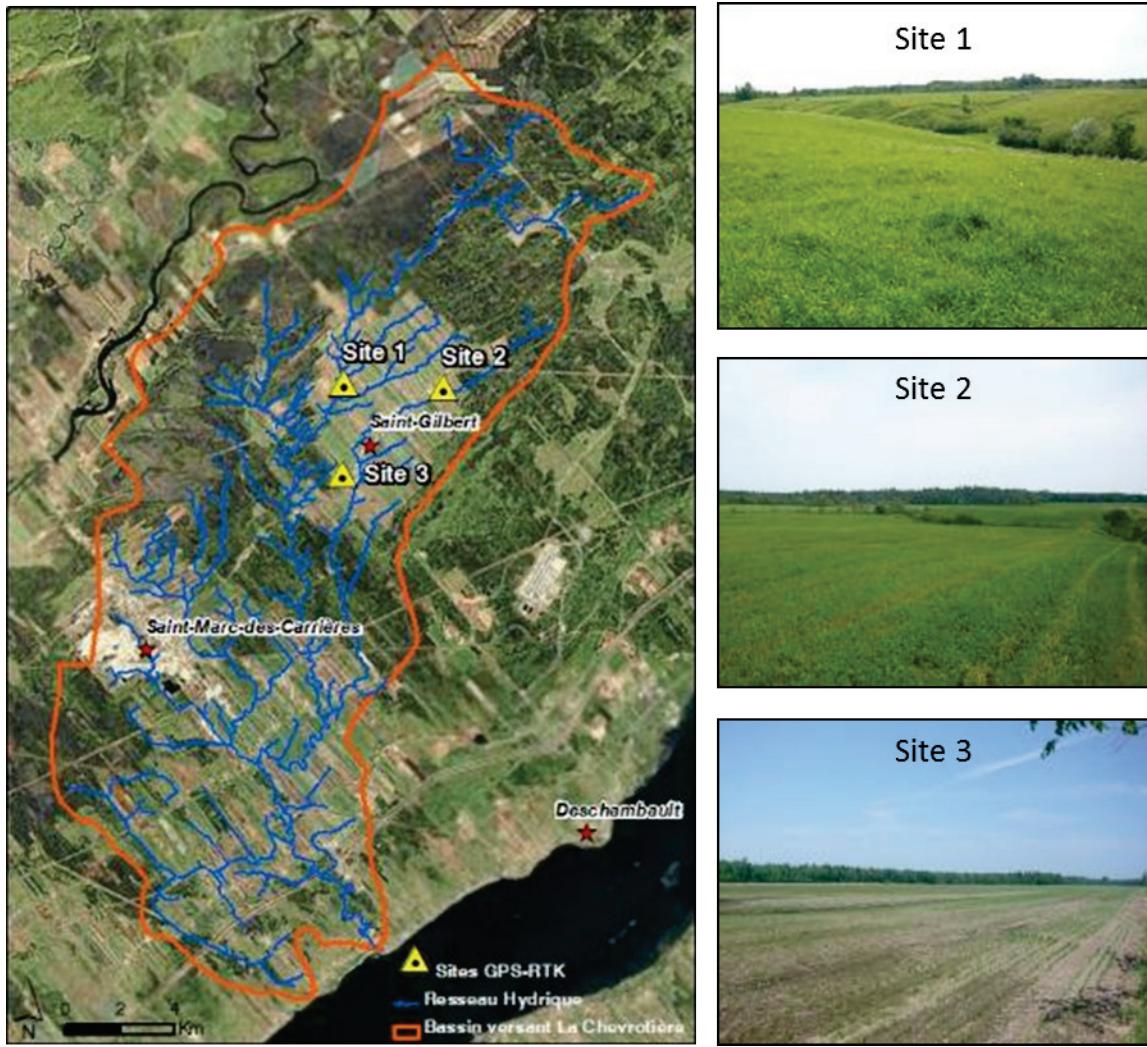


Figure 1 : Bassin versant de la rivière La Chevrotière

Données

(1) Satellitaire

WorldView-2, c'est un satellite commercial qui capte des images avec 8 bandes multispectrales à 2 mètres de résolution spatiale et une bande panchromatique à 0,5 mètre de résolution spatiale. Ce satellite est capable d'enregistrer des images stéréoscopiques, c'est-à-dire des images d'une même zone géographique, mais prises avec différents angles de visées. Les images stéréoscopiques permettent aux utilisateurs d'extraire des modèles numériques du terrain (MNT) aux bas coûts, si l'on compare avec d'autres méthodes comme le LIDAR par exemple.

Dans ce projet, on a utilisé deux images satellitaires, une image d'été 2011 et une image de printemps 2012. À partir de l'image de l'année 2012, le fournisseur a créé un modèle numérique du terrain avec une précision verticale et une résolution spatiale de un mètre.

(2) Relevé GPS

On a relevé un peu plus de 130 000 points GPS de haute précision ($\pm 10\text{cm}$) dans trois parcelles agricoles dans la zone de Saint-Gilbert avec un GPS différentiel Trimble et avec des corrections en temps réel avec la méthode RTK. Les parcelles choisies ont différentes topographies pour bien représenter la variabilité du paysage dans la zone agricole d'étude. On est arrivé à obtenir une densité moyenne de 1,5 points GPS par mètre carré, ce qui constitue une bonne information de base pour comparer la performance du MNT satellitaire (Wirtensohn, 2011).

(3) Relevé terrain

Le calcul de l'IQBR dans la zone d'étude a été fait dans 80 sites d'échantillonnage, qui ont été sélectionnés aléatoirement à partir d'un échantillonnage simple stratifié. Le protocole du MDDEFP a été utilisé pour rendre cette information comparable avec l'information extraite des images satellitaires. Dans ces travaux sur le terrain, on a créé une fiche pour la récolte de données et toute l'information résultante a été stockée dans un système d'information géographique (Wirtensohn, 2011).

Validation du modèle numérique du terrain

Pour connaître les limitations du MNT à représenter l'altitude et le processus d'écoulement de l'eau de surface, ce qui est l'information de base pour les calculs de l'indice de qualité et l'efficacité de la bande riveraine, on a évalué la qualité du modèle numérique du terrain. Cette évaluation a été faite dans deux fronts, le premier pour vérifier la précision du MNT à représenter l'altitude, et le deuxième pour vérifier ses capacités dans l'extraction des variables hydrologiques reliées à l'écoulement de l'eau de surface. La validation verticale a été faite en comparant le modèle satellitaire contre 130 000 points GPS de haute précision. Pour la validation hydrologique on a sélectionné les variables suivantes pour évaluer sa performance : dépressions (superficie

chevauchement et superficie totale), points de drainage (superficie drainée, nombre de points), pente (min, max, moyenne), et la longueur des cours d'eau (total, moyen, max). Les résultats montrent que le MNT satellitaire peut être considéré comme une source d'information spatiale pour la modélisation environnementale.

Calcul de l'indice de qualité et l'efficacité de la bande riveraine

La méthodologie proposée par le MDDEFP pour le calcul de l'IQBR, adapté de Saint-Jacques et Richard (1998), a été développée pour que le protocole soit exécuté sur terrain, donc on a adapté ce protocole en remplaçant les travaux sur terrain par l'analyse numérique des images satellites à très haute résolution spatiale. Ainsi, les images WorldView-2 nous ont permis l'extraction précise d'information sur la couverture végétale et sur la qualité du drainage au niveau parcellaire. Cette information a été utilisée pour évaluer l'indice de qualité (IQBR), et l'efficacité des bandes riveraines. Les processus méthodologiques sont décrits dans la figure suivante :

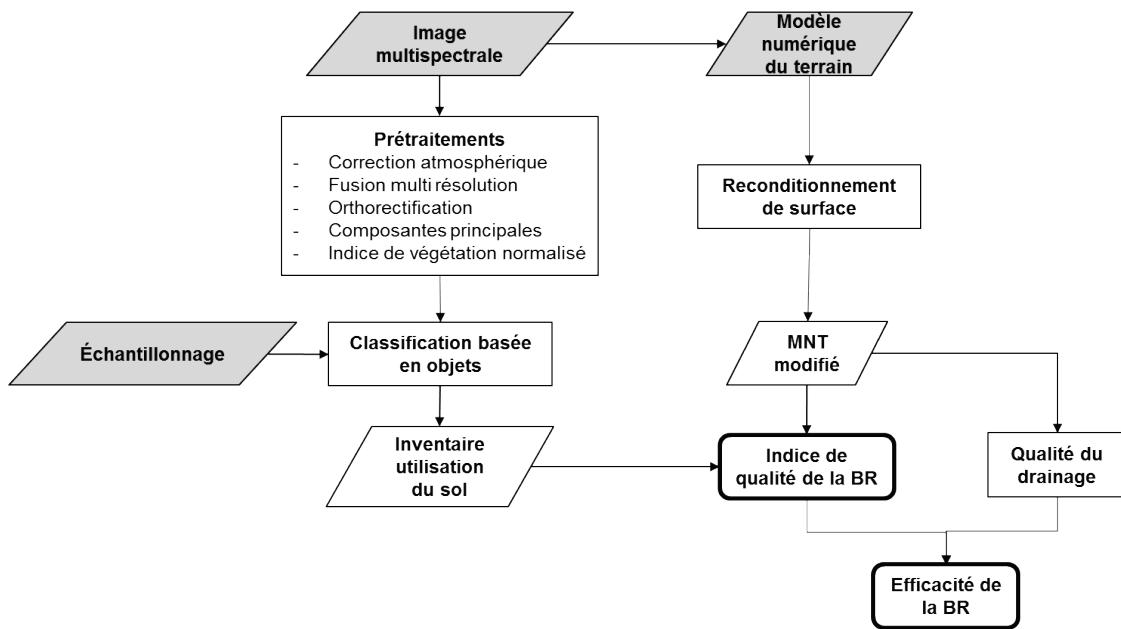


Figure 2 : Méthodologie pour le calcul de l'indice de qualité et l'efficacité de la bande riveraine

Prétraitements de l'image satellite : cette étape comprend tout les processus qui transforment l'image brute en une image corrigée, prête pour permettre l'extraction

d'information sur la couverture végétale de la zone d'étude. Parmi ces processus, on a la correction atmosphérique, la fusion multirésolution, l'orthorectification, le calcul des composantes principales, et le calcul de l'indice de végétation normalisé (NDVI). Tous les prétraitements ont été faits avec le logiciel PCI Geomatica. Pour la correction atmosphérique on a utilisé l'algorithme ATCOR2, pour la fusion multirésolution (*pansharpening*) on a utilisé l'algorithme PANSHARP2, et pour la orthorectification on a choisi le module OrthoEngine avec les fonctionnes rationnelles de correction et 5 points GPS de haute précision ($\pm 10\text{cm}$) spatialement bien distribués dans l'image. Une fois que les images ont été corrigées et fusionnées, l'algorithme PCA a été utilisé pour calculer les composantes principales. Enfin, l'indice de végétation normalisé a été créé avec la calculatrice raster du logiciel mentionné.

Classification basée en objets : la classification basée en objets est une technique pour extraire l'information des images matricielles en utilisant des groupes de pixels (objets) et ses propriétés spectrales, géométriques, et topologiques. À différence des techniques conventionnelles de classification, où le pixel est l'unité d'analyse, la classification basée en objets est éprouvée comme plus efficace pour analyser des images à très haute résolution spatiale. Avec la première composante principale et le NDVI de chaque image, on a fait l'extraction d'information sur l'utilisation du sol. Il faut suivre les pas suivants pour faire cette extraction d'information :

- Segmenter l'image
- Sélectionner les sites d'entraînement
- Classifier l'image
- Valider la classification
- Exporter les résultats

La segmentation ou création d'objets est un processus empirique que varie d'une image à l'autre. Il s'agit de définir les paramètres d'échelle, de couleur, et de compaction. Dans ce projet, dans le logiciel *eCognition Developer*, on a choisi une échelle de 25, couleur 0.1, et compacité 0.1. Pour trouver l'échelle adéquate, l'outil qui s'appelle *ESP (estimate scale parameter)* a été utilisé. Ce module du logiciel eCognition, prend en compte la variabilité dans la quantité et la taille des objets, pour déterminer une valeur optimale d'échelle.

Les sites d'entraînement sont des objets (polygones) sur lesquels on connaît l'utilisation du sol, et ils sont utilisés par l'algorithme le voisin le plus proche (*Nearest Neighbor*) pour assigner chaque objet à une catégorie d'utilisation du sol. Pour sélectionner ces sites d'entraînement, on a utilisé l'information d'utilisation du sol collecté dans le relevé terrain dans 80 sites d'échantillonnage.

Ensuite, on a appliqué l'algorithme de classification le voisin le plus proche pour créer un fichier ou couche géographique de l'inventaire de la végétation dans les zones riveraines du bassin versant. Étant donné que la largeur maximale des bandes riveraines est de 15 mètres selon la réglementation en vigueur, et, pour accélérer le temps de calcul du logiciel, il faut noter qu'on a extrait l'information seulement dedans une zone tampon de 50 mètres autour des cours d'eau.

Après l'extraction de l'information sur l'utilisation du sol avec la classification basée en objets, une validation a été effectuée. Enfin, les résultats sont exportés vers un format d'échange du type *Shapefile*. Ce type de fichier sera utilisé dans les analyses de l'indice de qualité et d'efficacité de la bande riveraine dans un système d'information géographique (SIG).

Reconditionnement de surface : le modèle numérique du terrain satellitaire est une source d'information très importante pour les calculs suivants, mais il a quelques limitations pour bien représenter la microtopographie parcellaire, effet causé principalement par les limitations du capteur et par la résolution spatiale du modèle. Pour améliorer cette condition, un reconditionnement de surface a été appliqué dans le MNT. Comme résultat on obtient des variables hydrologiques plus précises pour nos calculs de l'IQBR et l'efficacité de la bande riveraine. La méthode utilisée s'appelle AGREE, développée par l'Université du Texas, et elle force la création des voies d'écoulement intra parcellaires dans le MNT à partir d'information vectorielle linéaire. Cette fonctionnalité est implémentée dans le module ArcHydro du logiciel ArcGIS.

Qualité du drainage (QD) : la qualité du drainage est définie comme la capacité de la bande riveraine à intercepter les eaux de ruissellement et remplir ses fonctions écologiques. Elle directement reliée à l'homogénéité de la superficie drainée par les exutoires parcellaires. Les variables hydrologiques utilisées pour évaluer la qualité du drainage sont les points de drainage et l'accumulation de flux d'écoulement des eaux de

surface. Pour obtenir les variables hydrologiques, il faut suivre le flux de travail du module ArcHydro et utiliser la formule suivante :

$$QD = \text{Drainage Extrême} / \text{Drainage Total}$$

Drainage Extrême : Superficie totale drainée par des points de drainage extrêmes qui s'écoulent vers la bande riveraine. Les points extrêmes sont eux qui ont une surface de drainage supérieur au percentile 75e.

Drainage Total : Superficie totale de la parcelle.

Les valeurs calculées sont finalement transformées dans une variable catégorique avec les classes suivantes :

Qualité du drainage	Valeur
Très faible	< 0.25
Faible	0.25 – 0.50
Moyenne	0.50 – 0.75
Bonne	> 0.75

Indice de qualité de la bande riveraine (IQBR) : une fois que toutes les variables sont disponibles (utilisation du sol, altitude), l'indice de qualité de la bande riveraine a été calculé en suivant la méthodologie développée par le MDDEFP. Cette méthodologie est basée sur la superficie relative occupée par neuf catégories de l'utilisation sol, un facteur de pondération associé à chaque catégorie, et la pente de berges dans des tronçons de cours d'eau de 500 mètres. Le logiciel ArcGIS et son module ArcHydro ont été utilisés pour cette étape-là. La formule de calcul de l'IQBR est la suivante :

$$IQBR = 0.1 * (\%forêt*10 + \%arbustaie*8.2 + \%herbaçaire*5.8 + \%coupeForestière*4.3 + \%pâturage*3 + \%culture*1.9 + \%solNu*1.7 + \%socleRocheux*3.8 + \%infrastructure*1.9)$$

Les valeurs calculées sont finalement transformées en une variable catégorique avec les classes suivantes :

IQBR	Valeur
Très faible	< 40
Faible	40 – 60

Moyen	60 – 80
Bon	> 80

Voici une fiche synthèse avec le format suggéré par le MDDEFP pour catégoriser et présenter l'indice de qualité de la bande riveraine :

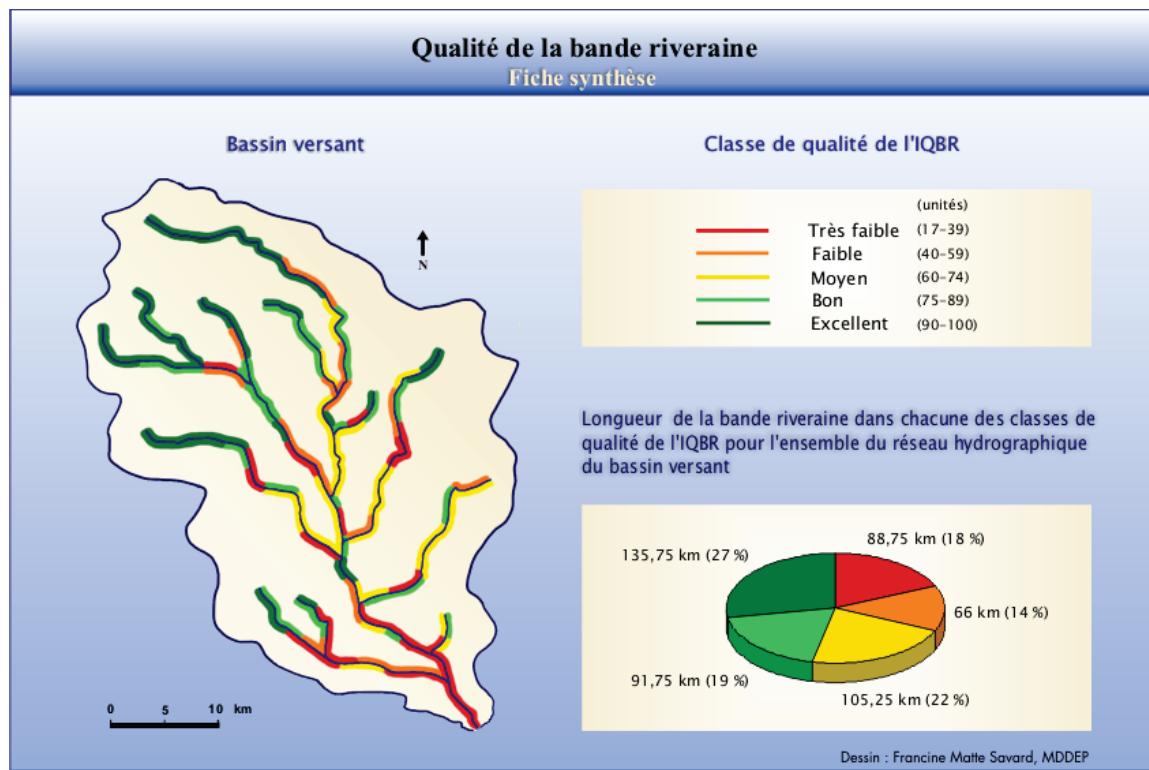


Figure 3 : Présentation suggérée de l'IQBR

Efficacité de la bande riveraine : dans chaque bande riveraine on connaît la catégorie de son IQBR et la catégorie de sa qualité du drainage (QD). L'efficacité de la bande riveraine sera égale à la catégorie la plus faible entre ces deux indicateurs, comme dans la formule suivante :

$$\text{Efficacité de la bande riveraine} = \min (\text{IQBR}, \text{QD})$$

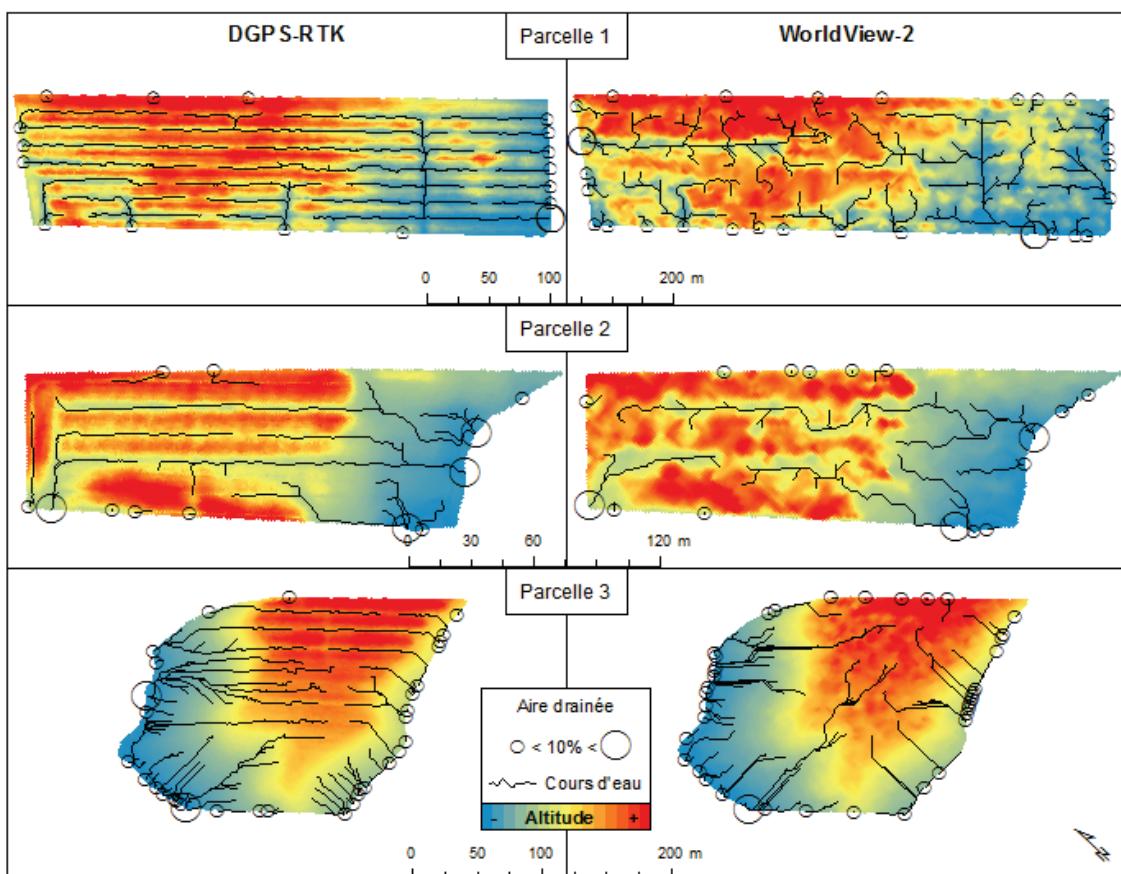
Pour illustrer ce concept : s'il y a une bande riveraine avec une très bonne qualité (bien végétalisée) mais avec une faible qualité de drainage, son efficacité sera faible parce

qu'elle ne pourra pas remplir adéquatement toutes ses fonctions écologiques à cause d'une potentielle accumulation excessive des eaux d'écoulement.

RÉSULTATS

Validation du MNT

Les résultats de validation du modèle numérique du terrain confirment une précision verticale de 0.45m en milieu agricole, c'est qui est en concordance avec la précision offert par le fournisseur (1m). Il faut noter que pour cet exercice académique de validation du MNT satellitaire, le reconditionnement de surface du modèle n'a pas été appliqué. Dans les étapes suivantes, c'est-à-dire, dans le calcul de l'IQBR et l'efficacité



de la bande riveraine, cette modification du MNT est entrée en vigueur. Voici une figure qui montre une comparaison visuelle entre les cours d'eau, les points de drainage, et l'altitude entre le modèle satellitaire et le modèle GPS :

Figure 4 : Comparaison visuelle entre le modèle d'altitude satellitaire (à droite), et le modèle GPS qui représente la vérité terrain (à gauche) dans les trois parcelles agricoles sélectionnées

Inventaire de l'utilisation du sol

À partir des images satellites WorldView-2 l'inventaire de l'utilisation du sol a été créé. Ces images et la classification basée en objets, se montrent comme une bonne alternative pour remplacer ou complémer la photo aérienne et les données Lidar, sources de données souvent utilisées dans l'estimation de l'IQBR et des autres analyses des habitats riveraines.

Le processus de validation de la carte d'utilisation du sol a montré un coefficient kappa global de 0.82, ce qui confirme que la classification basée en objets est une méthode fiable pour l'extraction d'information à très haute résolution.

Si on analyse le coefficient kappa de chaque classe, on voit que les classes forêt, cultures, sol nu, infrastructure ($\kappa \geq 0.92$) sont les plus performantes, et que les classes pâturage (0.67), arbustive (0.54) et herbacée (0.39) ont été plus conflictuelles.

Dans ces trois dernières classes la confusion existe entre eux-mêmes ou avec un autre

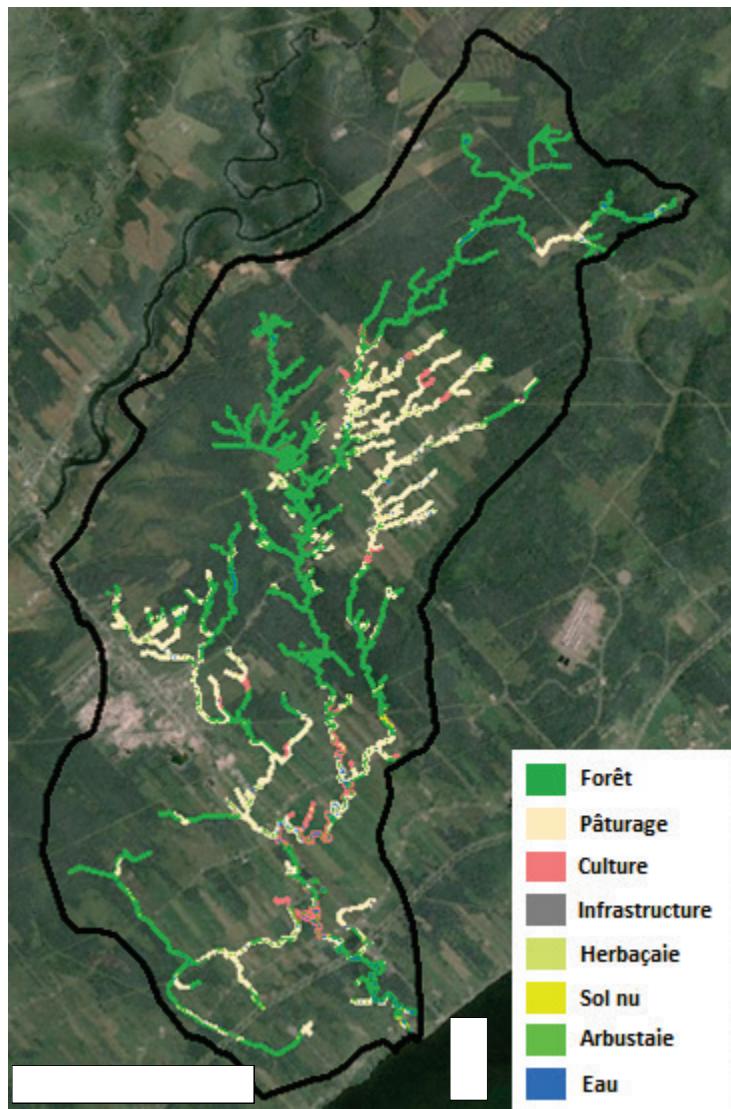


Figure 5 : Carte d'utilisation du sol des zones riveraines du bassin versant de la rivière La Chevrotière

type de végétation, ce qui garantit une affectation minimale dans le calcul de l'IQBR car les coefficients de ces classes sont très similaires.

Indice de qualité de la bande riveraine

L'indice de qualité de la bande riveraine (IQBR) du bassin versant de La Chevrotière (*Figures 6, 7*) est majoritairement bon avec le 60% de toute la longueur des rives en bon état, mais le 24% de la longueur totale, ce qui est égal à 76.6 km, appartient aux bandes riveraines avec un faible ou très faible IQBR. Cela nous indique d'un potentiel problème de conformité de la loi, donc les organismes compétents pourront focaliser ses efforts humains et financiers dans ces 76.6 km des berges les plus problématiques du bassin versant.

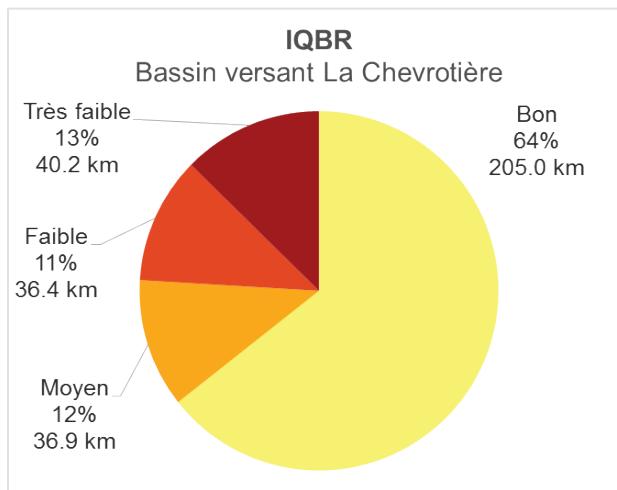


Figure 6 : Statistiques du calcul de l'IQBR dans le bassin versant de La Chevrotière

La *Figure 7*, la carte de distribution spatiale de l'IQBR, montre les valeurs plus faibles dans les zones agricoles, et les plus hautes dans les zones naturelles, comportement qui est logique prenant en compte la formule de calcul utilisé, où on récompense les bandes riveraines avec végétation naturelle, et on pénalise ceux qui n'ont pas de végétation.

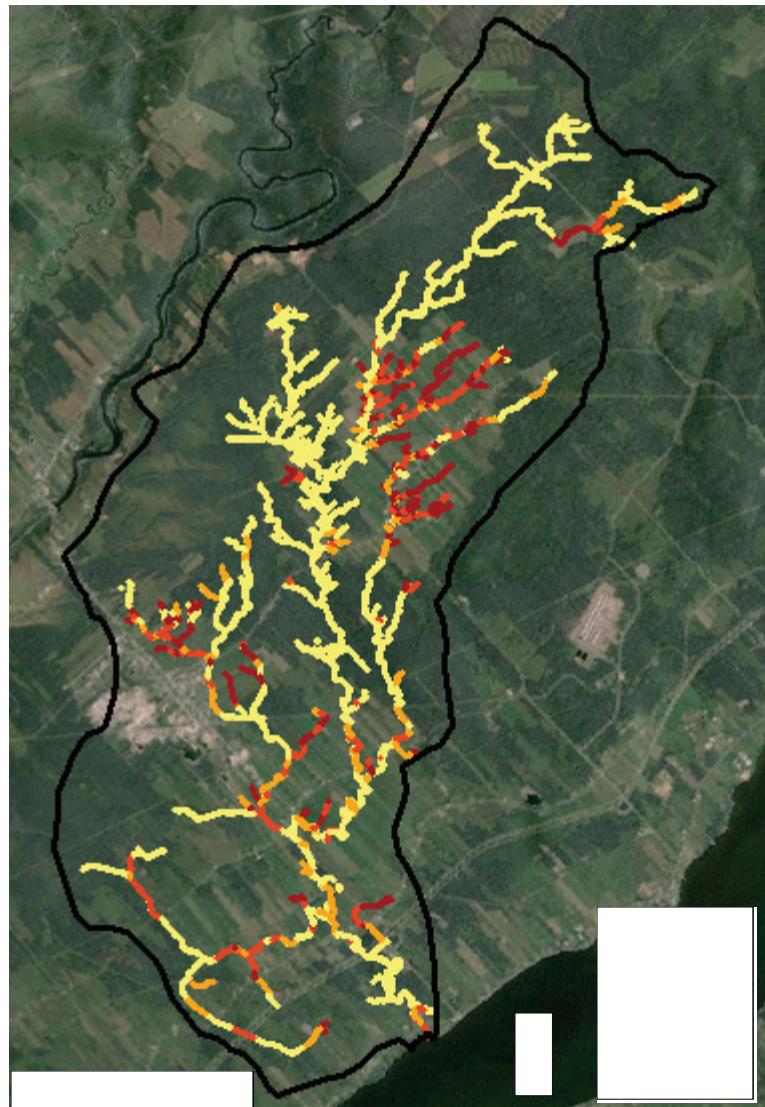


Figure 7 : Distribution spatiale de l'indice de qualité de la bande riveraine (IQBR) dans le bassin versant de La Chevrotière

La *Figure 8* montre les résultats du calcul de l'IQBR en zones agricoles. Dans ces régions productives, il y a une diminution considérable de l'IQBR en bon état, de 64% à 29%. Il existe aussi une augmentation considérable du pourcentage de rives avec un faible ou très faible IQBR, de 24% à 55%. Toutes ces données nous indiquent que les zones agricoles sont celles qui ont plus besoin d'intervention par les organismes compétents.

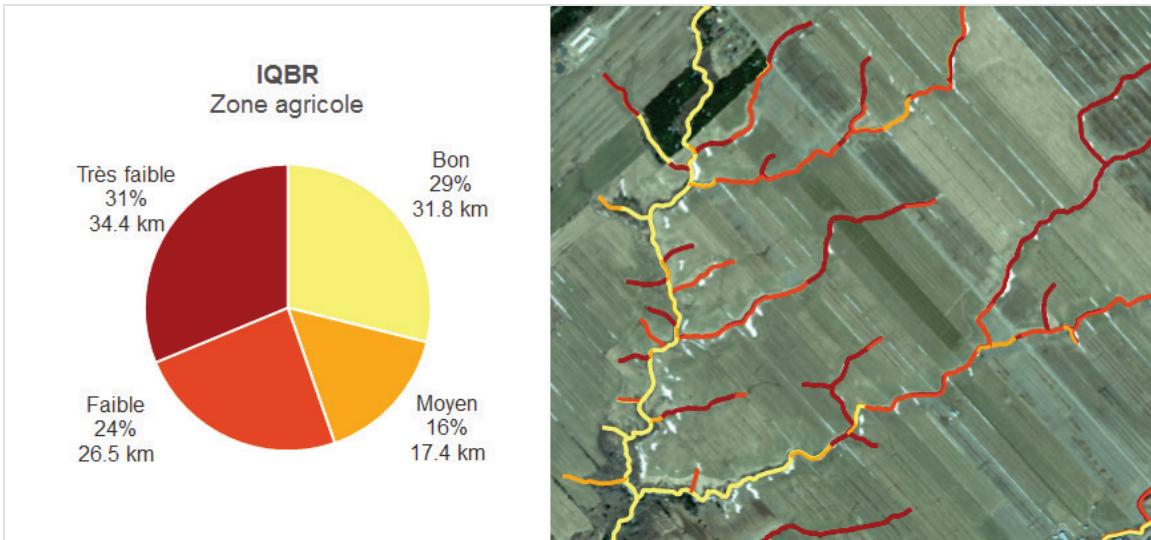


Figure 8 : Indice de qualité de la bande riveraine dans les zones agricoles.
À droite la zone agricole de Saint-Gilbert

Efficacité de la bande riveraine en milieu agricole

Étant donné que l'efficacité de la bande riveraine est dérivée à partir de l'IQBR et la qualité du drainage (QD), on a calculé la qualité du drainage. La *Figure 9* présente les résultats. Les bandes riveraines localisées dans les zones agricoles ont, en général, une bonne qualité du drainage (59%), ce qui représente 65.1 km de rives en bon état. Les rives avec une faible et très faible qualité du drainage représentent le 10% (34.7 km) de la longueur totale des rives dans le milieu agricole.

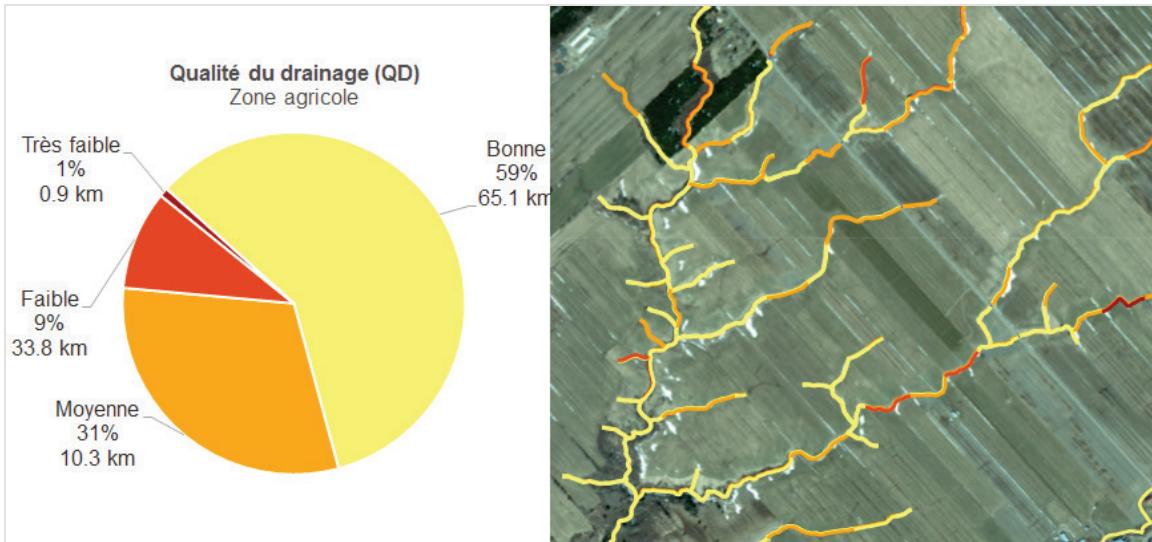
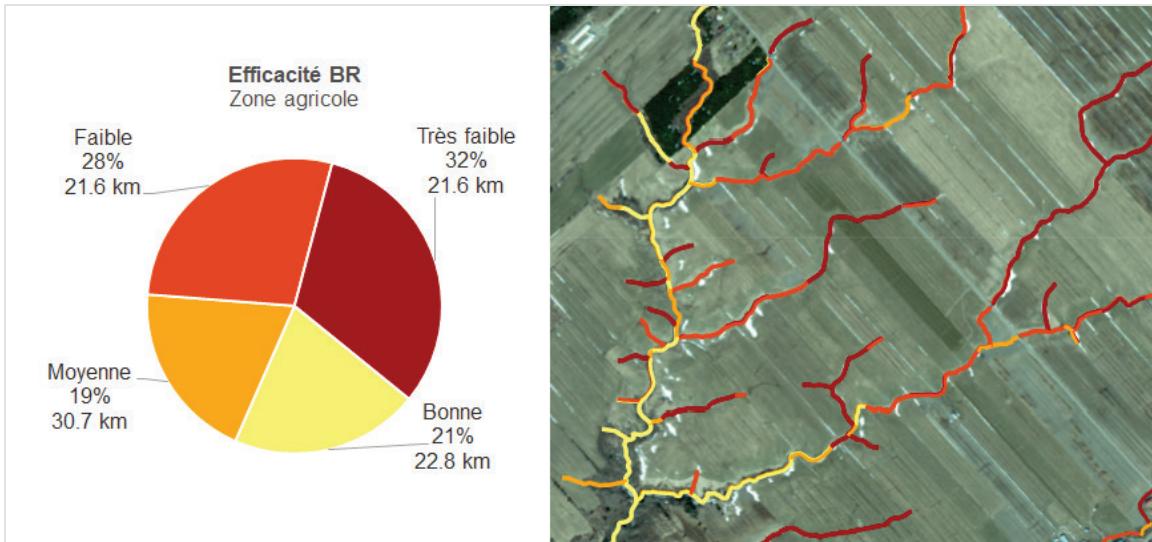


Figure 9 : Qualité du drainage dans les zones agricoles. À droite la zone agricole de Saint-Gilbert

À partir de la combinaison de l'IQBR et la qualité du drainage, on peut constater qu'il y a des bandes riveraines avec un bon IQBR mais avec une faible ou très faible qualité de drainage. Comme résultats, le milieu agricole de ce bassin versant montre que 60% de ses bandes riveraines a une efficacité, entre faible et très faible. Par contre, seulement le 21% ou 22.8 km des bandes ont une bonne efficacité, à différence de l'IQBR qui a qualifié comme bon au 29% ou 31,8 km des rives. L'inclusion de la qualité du drainage comme variable de calcul de l'efficacité, apporte information plus riche pour aider dans la gestion de ces écosystèmes riverains.



**Figure 10 : Efficacité de la bande riveraine dans les zones agricoles.
À droite la zone agricole de Saint-Gilbert**

CONCLUSIONS

La caractérisation des bandes riveraines à l'aide de l'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale s'avère une alternative méthodologique opérationnelle et viable qui produit de bons résultats et qui permet d'assurer de faire le suivi régulier et efficace de ces écosystèmes à moindres coûts. Le choix de faire appel à une seule et même source d'information pour les données images et pour les données altimétriques pour le développement de la méthodologie favorise son utilisation puisque ceci limite les coûts d'acquisition et de traitement des données (environ 1,5\$/ha). Dans les approches traditionnelles, on fait appel à des fournisseurs différents pour les données images (photos aériennes, environ 1,3\$/ha) et les données altimétriques (Lidar, environ 0,75\$/ha - 3\$/ha, selon la densité du semis des points), avec des protocoles d'acquisition et d'outils de traitements différents.

La méthodologie développée pourra être appliquée avec n'importe qu'elle image satellitaire stéréoscopique à très haute résolution spatiale. La méthodologie n'utilise que des techniques standards de télédétection et des systèmes de traitement et d'analyse de l'information géographique disponibles dans la plupart des logiciels commerciaux, et aussi dans quelques logiciels gratuits.

Le présent projet met alors à la disposition des gestionnaires de l'eau un outil opérationnel d'aide à la décision pour que l'implantation, le maintien ou la restauration de bandes riveraines soit prise en compte efficacement dans les processus de connaissance, de protection et de gouvernance de l'eau et pour qu'ils puissent bien évaluer les ressources requises et les modalités d'implantation. Incorporée au cycle de gestion intégrée de l'eau, la méthodologie développée constitue un outil efficace de suivi et d'évaluation des actions portant sur les bandes riveraines conçues et implantées lors de l'itération précédente du cycle de gestion. Une telle méthodologie permettra aux gestionnaires de bassins versants de dresser un portrait exhaustif des bandes riveraines, d'évaluer l'état de santé de ces écosystèmes fragiles et d'analyser leur conformité par rapport aux recommandations et/ou à la réglementation en vigueur. De plus, elle permettra de mesurer l'efficacité des zones riveraines par rapport aux conditions réelles du ruissellement au champ.

En plus de contribuer à favoriser l'application judicieuse des pratiques de conservation des eaux et des sols et à améliorer la productivité des organismes de gestion de bassins versants, les connaissances développées dans le cadre du présent projet contribueront à promouvoir l'utilisation des données de l'observation de la terre, des technologies spatiales et des outils géomatiques en général dans le secteur agricole. Ceci permettra aux organismes de bassins versants et les intervenants en agroenvironnement d'avoir accès et ce, à des coûts raisonnables, à des outils d'aide à la décision leur permettant d'être performants aussi bien au niveau économique qu'environnemental.

RÉFÉRENCES

- [1] E. Gagnon, G. Gangbazo, "Efficacité des bandes riveraines : analyse de la documentation scientifique et perspectives" (Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques de l'eau, 17 p, 2007).
- [2] M. Duchemin et al., http://www.irda.qc.ca/_documents/_Results/53.pdf, 2002.
- [3] Centre de conservation des sols et de l'eau de l'est du Canada (CCSE-SWCC), <http://www.ccse-swcc.nb.ca/publications/francais/bandes.pdf>, Date de création inconnue.
- [4] MDDEP, http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/IQBR/index.htm, 2002.
- [5] S. J. Goetz, Journal of the American Water Resources Association 42, 133 (2006).
- [6] S. E. Gergel et al., Ecosystems 10, 688 (2007).
- [7] L. Chauvette, http://www.grobec.org/pdf/grobec_portrait_global.pdf, 2006.
- [8] E. Muller, Aquatic Botany 58, 411 (1997).
- [9] A. Vézina et al., www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Imagerie1.pdf, 2003.
- [10] K. B. Jones et al., Landscape Ecology 25, 1261 (2010).
- [11] F. Gu, W. Liu, Geo-Spatial Information Science 13, 263 (2010).
- [12] S. Ashraf et al., New Zealand Geographer 66, 33 (2010).
- [13] Y. Zhang, paper presented at the IGARSS'02, Toronto, Canada, June 24-28 2002.
- [14] de Kok R et al., in Joint EARSeL - ISPRS Workshop "Fusion of Sensor Data". (International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Valladolid, Spain, 1999), vol. 32.
- [15] S. J. Goetz et al., Remote Sensing of Environment 88, 195 (2003).
- [16] K. Johansen et al., Remote Sensing of Environment 114, 2679 (2010).
- [17] K. Chokmani et al., R-979 (INRS-ETE, Québec, 2008).

- [18] A. Michaud et al., <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/196.html>, 2009.
- [19] M. Vinod, paper presented at the 13th Annual International Conference and Exhibition on Geospatial Information Technology and Applications, Gurgaon, India, 19 - 21 January 2010.
- [20] G. Mitchell, K. MacNabb, paper presented at the ASPRS 2010 Annual Conference, San Diego, California, April 26-30 2010.
- [21] WIRTENSOHN, M. 2011. Revue de littérature et travaux de terrain en vue de la caractérisation des bandes riveraines par télédétection satellitaire à très haute résolution spatiale. Rapport de stage dans le cadre du programme de maîtrise professionnelle en sciences de l'eau. Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau-Terre-Environnement, Décembre 2011, 53p.

ANNEXES

Présentation orale Karem Chokmani. *Validation "hydrologique" d'un modèle numérique d'altitude (MNA) produit à partir de l'imagerie satellitaire WorldView-2.* Séminaires au Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures. Agriculture Agroalimentaire Canada. 7 mars 2013.



Validation "hydrologique" d'un modèle numérique de terrain (MNT) produit à partir de l'imagerie satellitaire WorldView-2

Karem Chokmani 00 ± 55 cm² mol l⁻¹
07 Mars 2013

$L = \ln(0) = \ln\left(\frac{P_1 Q_2}{P_2 - P_1}\right)$

Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avant-garde

The slide features a central title in large, bold, white font: "Validation 'hydrologique' d'un modèle numérique de terrain (MNT) produit à partir de l'imagerie satellitaire WorldView-2". Below the title, there is a mathematical equation: $L = \ln(0) = \ln\left(\frac{P_1 Q_2}{P_2 - P_1}\right)$. At the bottom left, the text "Centre - Eau Terre Environnement" is displayed. At the bottom right, the INRS logo is present. The background of the slide is a blue-tinted collage of scientific data, including contour maps, graphs, and chemical structures, similar to the one above it.

Définitions

"Modèle tridimensionnel représentant, sous forme numérique, le relief d'une portion de territoire." OQLF

- modèle numérique de terrain (MNT) ne tient pas compte du sursol (bâtiments et végétation)
- modèle numérique d'altitude (MNA) tient compte du sursol



© ASTRIUM

5

Importance des MNA/MNT

- Amplement utilisées pour la représentation géographique du territoire
- Permet dériver plusieurs variables d'importance pour la modélisation environnemental et l'analyse spatiale
 - Hydrologie
 - Érosion/pollution
 - Énergie solaire
 - Neige, etc.



© ASTRIUM

7

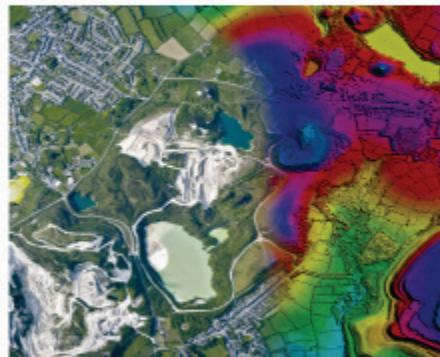
Création des MNT/MNA

Méthodes conventionnels:

- Relevés topographiques
- Photogrammétrie aérienne

Méthodes plus récents:

- GPS
- LiDAR aéroporté
- Interférométrie Radar
- Photogrammétrie satellitaire



© ASTRUM

9

Problématique

Validation des MNT produits photogrammétrie satellitaire:

- l'échelle du bassin versant (> 5m):
 - Erreur verticale
 - Capacité à représenter les processus hydrologiques de surfaces
- l'échelle de la parcelle (< 1m):
 - Erreur verticale
 - Pas validation hydrologique

MNT à très haute résolution spatiale pourrait fournir aux agriculteurs des informations précises pour :

- augmenter leur productions,
- renforcer des pratiques soucieuses de l'environnement => réduire les impacts environnementaux.

11

Objectif

Validation "hydrologique" d'un modèle numérique de terrain produit à partir de l'imagerie satellitaire WorldView-2

- Erreur verticale
 - Capacité à représenter les processus hydrologiques de surfaces

13

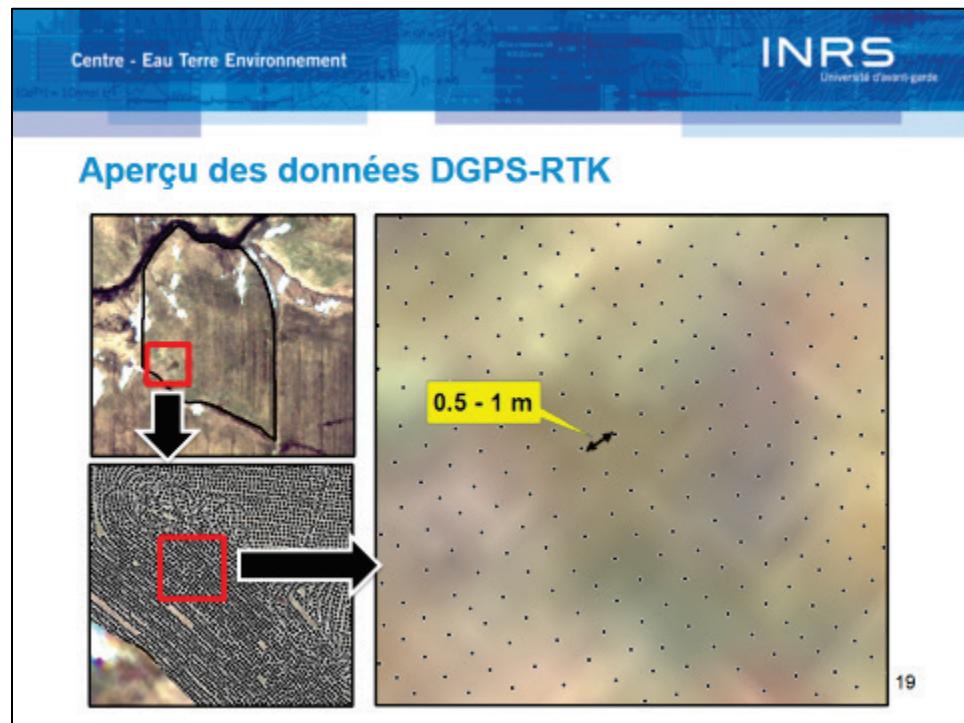
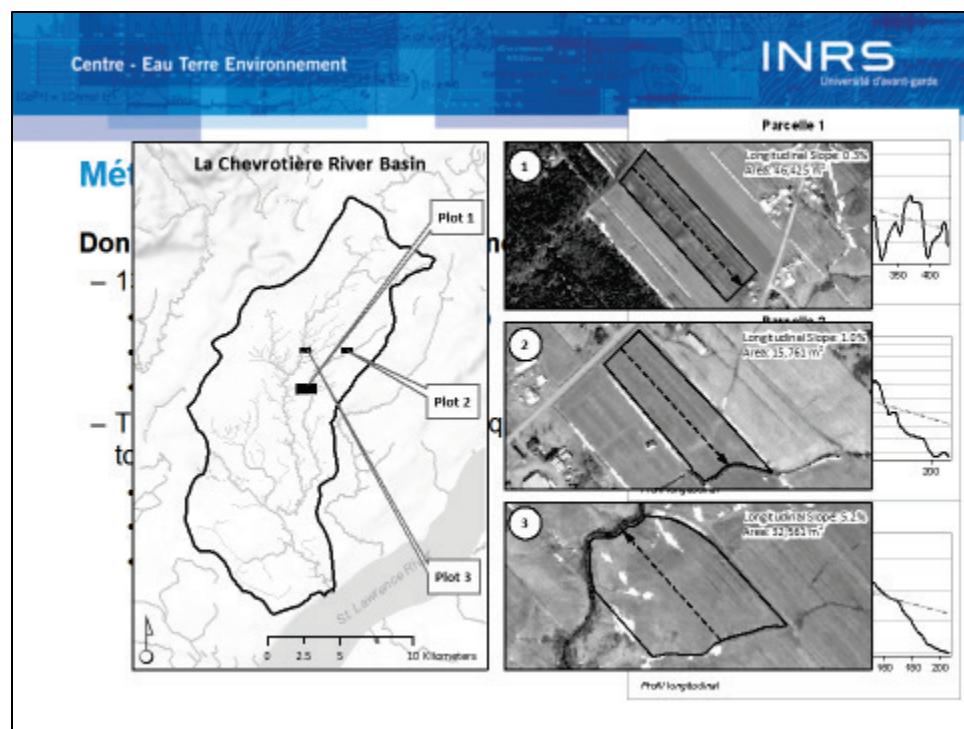
Méthodologie

Zone d'étude

- Bassin versant de la rivière La Chevrotière, région de Portneuf.
 - Superficie: ~100 km²
 - Zone majoritairement agricole
 - CAPSA: Organisme du bassin versant



15



Méthodologie

MNT satellitaire

- Extrait à partir d'une paire stéréoscopique WorldView-2
 - Images prises: 14 avril 2012
 - Précision vertical: 1 m
 - Résolution spatiale: 1 m
- Processus d'extraction semi-automatique
 - utilise la bande panchromatique, prise dès deux angles différentes
 - des algorithmes de corrélation de pixels pour faire l'extraction de l'altitude.

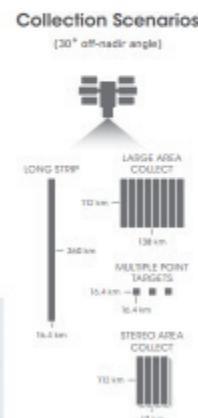
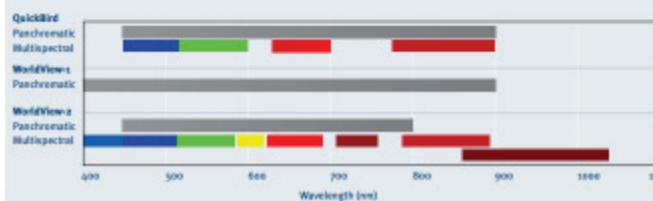


21

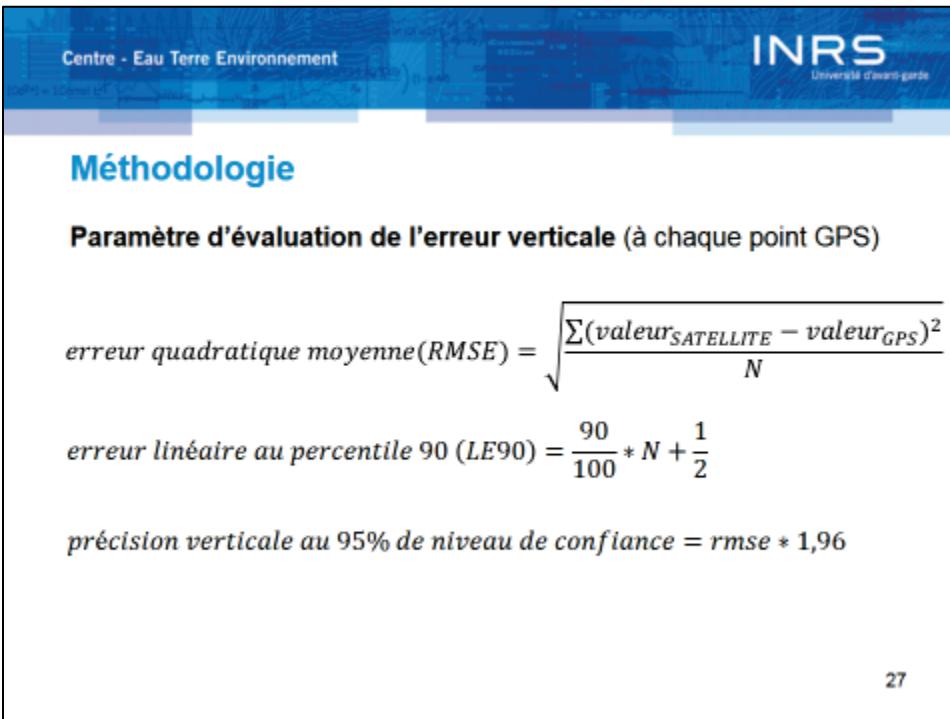
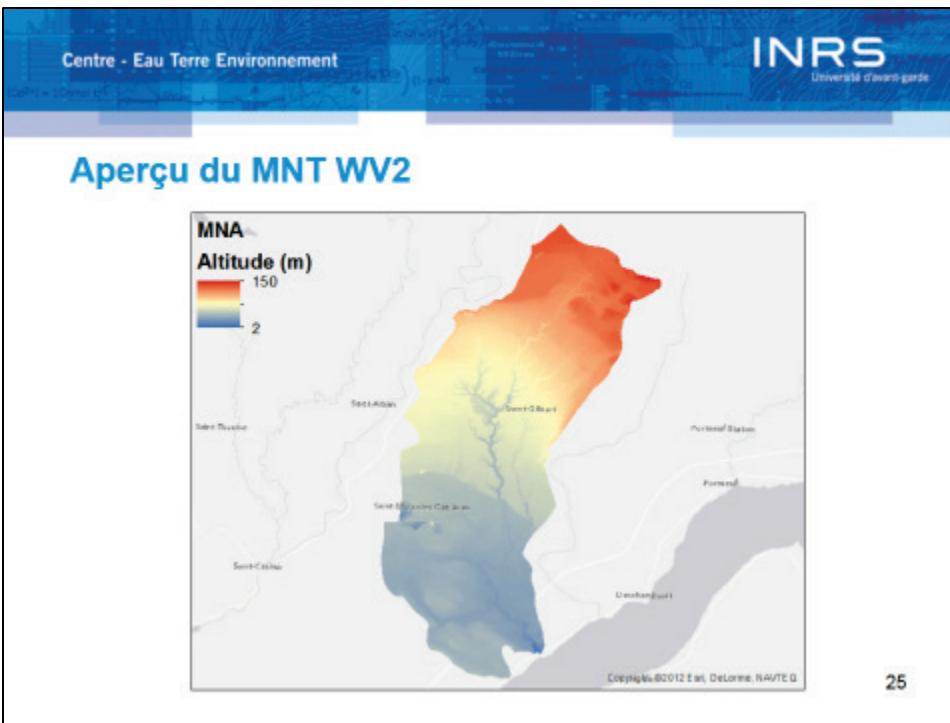
Satellite WorldView-2



- 1 bande panchromatique @ 0.5 m
- 8 bandes multispectrales @ 2.0 m



23



Méthodologie:

Variables « hydrologiques » analysées

- Pente
 - Longitudinale
 - Moyenne
 - Maximale
- Voie d'écoulement
 - Longueur moyenne
 - Longueur maximale
 - Longueur totale
- Dépressions
 - Aire totale
 - Aire commune
- Aire drainée
 - Points de drainage
 - Accumulation de l'écoulement

29

Méthodologie:

Variables « hydrologiques » analysées

- Création de trois MNT à partir des points GPS avec l'algorithme inverse de la distance pondérée (IDW)
 - 75% (interpolation), 25% (validation)
 - Erreurs d'interpolation: ~ 0.03 m

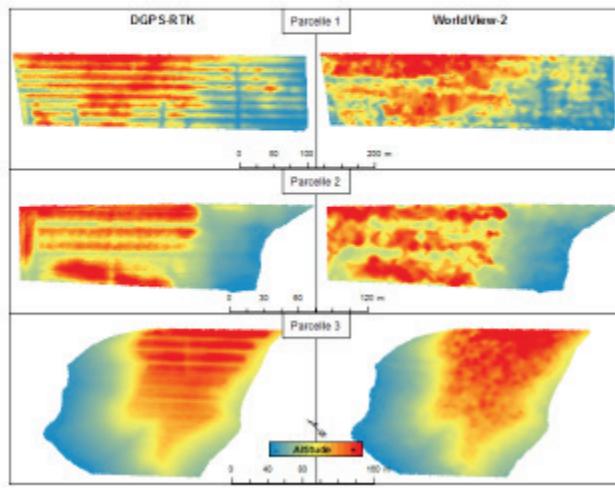
$$\text{erreur relative} = \left(\frac{\text{valeur}_{\text{SATELLITE}} - \text{valeur}_{\text{GPS}}}{\text{valeur}_{\text{GPS}}} \right) * 100$$

31

Résultats

33

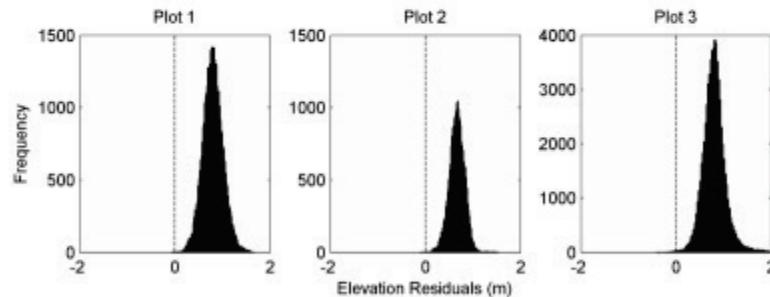
Aperçu des deux MNT



35

Évaluation de l'erreur verticale

Biais moyen: +0.78 m => MNT WV2 surestime de l'altitude



37

Évaluation de l'erreur verticale

Erreur :

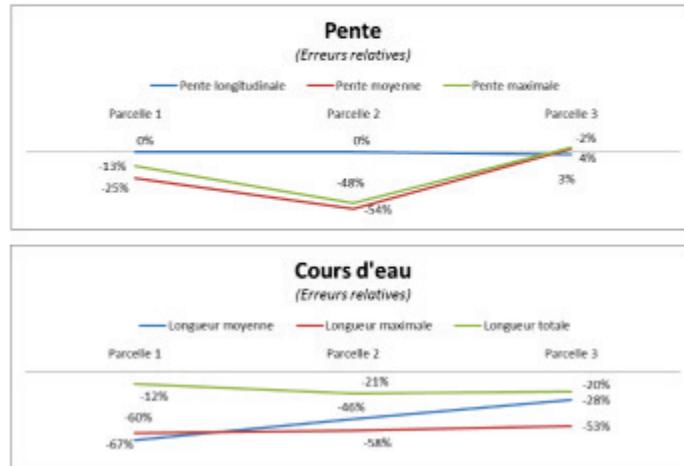
- Erreur quadratique moyenne (RMSE): 0.23 m (sans biais)
- Erreur linéaire (LE90): 0.36 m (sans biais)
- Précision vertical: 0.45 m (sans biais)
- Précision vertical: 0.81m (avec biais)

Erreur nominale du fournisseur:

- Précision vertical: 1 m
- Surestimation du biais

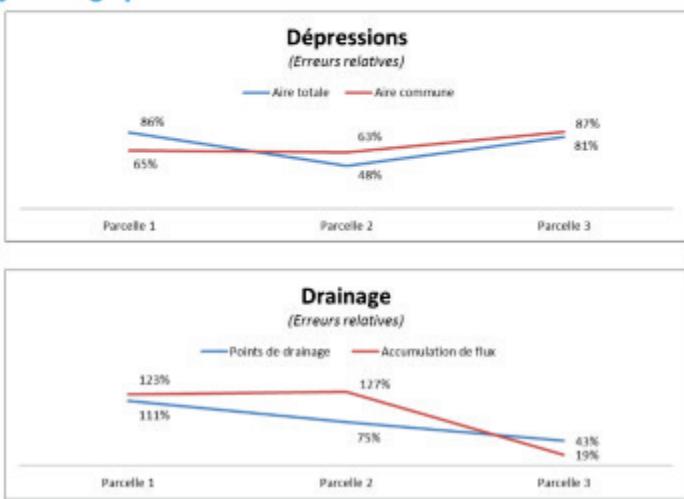
39

Capacité du MNT WV2 à représenter les processus hydrologiques de surfaces



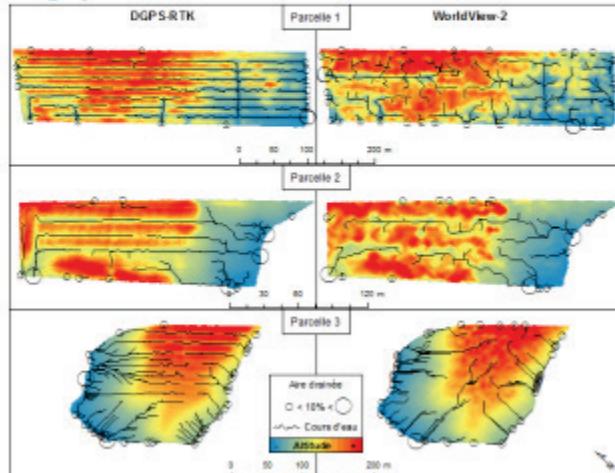
41

Capacité du MNT WV2 à représenter les processus hydrologiques de surfaces



43

Capacité du MNT WV2 à représenter les processus hydrologiques de surfaces

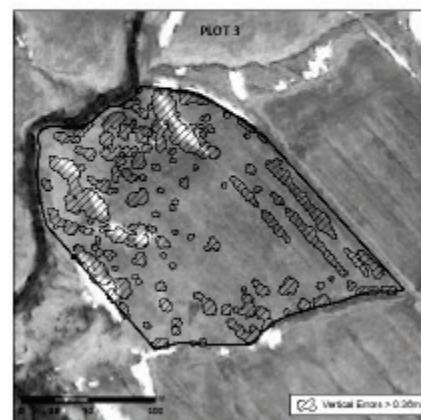


45

Capacité du MNT WV2 à représenter les processus hydrologiques de surfaces

zones avec des erreurs verticales > à l'erreur linéaire ($LE90 = 0.36 \text{ m}$)

- Erreur systématique (au niveau spatial)
 - Dépressions du terrain, naturelles ou artificielles (fossés),
 - Neige résiduelle



47

Conclusions

Erreur verticale: MNT satellitaire fait une représentation assez fidèle de l'altitude dans le milieu agricole (45 cm)

Qualité très insuffisante pour représenter les processus hydrologiques de surfaces

- Parcelles à très faible pente
- Utile dans les zones riveraines où la pente est généralement élevée.

Erreur localisées dans les dépressions => utilisation de l'information spectrale pour combler pour corriger le MNT (travaux en cours).

49

Remerciements

MAPAQ : soutien financier (PSIA)

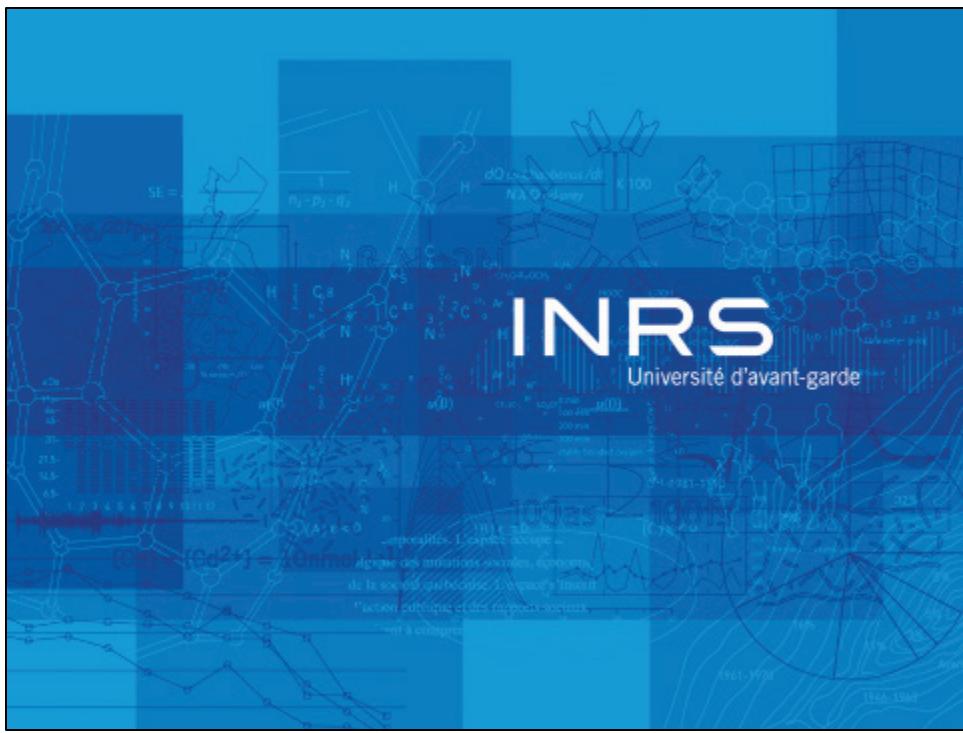
CAPSA : soutien logistique / technique

- Philippe Dufour , Dir.
- Stéphane Blouin, Technicien

Équipe de recherche:

- Julio Novoa, candidat M.Sc
- Magali Wirtensohn, stagiaire
- Rody Nagel, postdoc
- Jimmy Poulin, professionnel de recherche

51



- Article scientifique Novoa, J., Chokmani, K., Nigel, R., Dufour, P. *Quality assessment from a hydrologic perspective of a digital elevation model derived from WorldView-2 remote sensing data.* Accepté avec corrections mineures au Journal de Sciences Hydrologiques.

Quality assessment from a hydrologic perspective of a digital elevation model derived from WorldView-2 remote sensing data

Julio Novoa^{*1}, Karem Chokmani¹, Rody Nigel¹, & Philippe Dufour²

¹*Institut national de la recherche scientifique (INRS), Centre Eau-Terre-Environnement (ETE), 490, de la Couronne, Québec (QC) G1K 9A9*

²*CAPSÀ, 111-1, route des Pionniers, St-Raymond (QC) G3L 2A8*

**Corresponding Author:*

Telephone: 418-654-2530

Fax: 418-654-2600

Email: julio.novoa@ete.inrs.ca

Abstract

A digital elevation model (DEM) derived from a WorldView-2 (WV-2) image was assessed against ground-truth GPS point data sets. Two assessment methods were used: (i) vertical accuracy assessment and (ii) hydrological assessment of surface runoff variables. Three agricultural plots with different topographic slopes were used to perform a vertical accuracy assessment, followed by a comparative assessment of a set of hydrological variables. Results show a global vertical accuracy of 0.45 m, confirming the potential of WV-2 stereo images to extract elevation information at high spatial resolution. Concerning plot-scale micro-topographic features, the WV-2 DEM performed better on the plot with rolling slopes (5–10%), extracting variables such as the total length and drainage area of flow paths with relative errors lower than 20%. However, some limitations were detected in the extraction of variables such as terrain slope, drainage points of flow paths, and terrain depressions in areas of flatter slopes (<5%).

Key Words: Surface Hydrology, Surface Runoff, DEM, Plot Scale Hydrology, WorldView-2, ArcHydro

1. INTRODUCTION

Gridded digital elevation models (DEM) are used in many disciplines due to their ability to represent topographic characteristics required in landscape, hydrological, and erosional modelling (Li et al., 2005, Longley, 2005). The uses of DEMs in hydrological analysis include (i) automatic extraction of terrain properties and drainage networks, (ii) determination of flow direction and accumulation, (iii) delineation of catchment areas, and (iv) extraction of watercourses, among others (Wechsler, 2007, Nigel and Rughooputh, 2010a).

Several studies have been done at the basin scale to analyse the capabilities and limitations of DEMs in hydrological modelling (Callow et al., 2007, Hosseinzadeh, 2011, M. El Hage, 2012, Rezak et al., 2012). However, at more detailed (plot) scales there is a lack of knowledge to support operational and practical uses of DEMs (John G. Lyon, 2003), particularly for agricultural plots, where it is anticipated that high-resolution DEMs can provide farmers with accurate topographic information to help them develop better, more productive, environmentally conscious practices to increase yield and decrease environmental impacts (Ge et al., 2011, van der Velde et al., 2010).

Lowland watersheds—generally characterized by fertile soils, water availability, and high accessibility—are commonly exploited for urbanization or agricultural practices. This gives rise to environmental problems such as land loss and water and land pollution resulting from these land use changes and exploitation (e.g., high nutrient inputs, modifications of discharge water flow paths, etc.). Hydrological modelling is an important task in such watersheds (van der Velde et al., 2010), and thus it is essential to evaluate topographic representations of watersheds using DEMs in order to identify their capabilities and limitations for hydrological modelling.

Currently, a variety of remote sensing techniques are used to generate elevation models. These techniques, most of which have been developed and improved over the last thirty years (Toutin and Cheng, 2002), range from standard and GPS topography, aero- and space-photogrammetry, and radar interferometry to airborne LiDAR. Some drawbacks of these technologies are cost, processing time, and lack of diversified spectral information (with the notable exception of space photogrammetry) (Hobi and Ginzler, 2012).

Hydrologic variables derived from a DEM are highly sensitive to the DEM's accuracy. Consequently, high-precision DEMs are required in hydrologic modelling in order to produce unbiased predictions and outcomes (Vaze et al., 2010, Lin-Lin Xiao, 2010). Furthermore, accurate elevation information is an important component of hydrologic modelling at high spatial resolution. DEM-extracted variables such as water flow direction and accumulation, micro-basins, flow paths, drainage points, depression zones, and drainage area need to be derived from highly accurate elevation models (preferably at high resolution too) to ensure good quality outcomes (Erskine et al., 2007).

Very high spatial resolution (VHSR) stereoscopic satellite images have been available since the launch of the IKONOS satellite in 1999. VHSR satellite stereo images are being used as a viable and fast alternative for producing elevation models (Jacobsen, 2004). The WorldView-2 satellite, launched in October 2009, is equipped with panchromatic and multispectral sensors, and is capable of capturing stereoscopic images. These stereo pairs can be used in automatic elevation extraction processes to generate DEMs covering the areas of the images. In addition, the satellite's revisit time of 1–4 days makes it an important data source for monitoring spatial phenomena over time. WorldView-2 is the first satellite with one panchromatic band and eight

multiplespectral bands at 0.5 m and 2 m spatial resolution, respectively. The panchromatic sensor can capture stereo image pairs to be used to generate 1-m pixel size DEMs. Previously, such high-resolution stereo-based DEMs were only achievable with aerial photography (G. Büyüksalih, 2012).

The aim of this research is to evaluate, at the agricultural plot scale, the capabilities and limitations of a WorldView-2 digital elevation model (WV-2 DEM) for representing elevation and extracting hydrologic variables commonly used in environmental modelling. The WV-2 DEM will be evaluated against high-density and high-precision field-captured GPS point data sets based on an assessment of (i) vertical accuracy and (ii) extracted hydrological variables describing spatial surface runoff.

2. METHODS

2.1 Study Area

The La Chevrotière river basin is located in the Portneuf Municipality, part of the Capitale-Nationale Administrative Region, in the province of Quebec, Canada (Fig. 1). The basin lies on the north shore of the St. Lawrence River and has an area of 107 km². It is located in a low-lying region that is mainly agricultural, characterized by pasture, forest patches, and small urban settlements. The combined population of Saint-Marc-des-Carrières and Saint-Gilbert, the two main urban centres, is around 3100 inhabitants. The La Chevrotière River is the union of two main branches and several small tributaries. It covers a distance of 29 km in a flat-to-undulating landscape before reaching the St. Lawrence. The highest point in the river basin has an altitude of 150 m above sea level. The mean slope of the basin is around 5%, but in riverine zones, slopes can be greater than 8% (CAPSA, 2011).

Like most river basins in agricultural regions, the La Chevrotière basin faces a variety of environmental pressures, including nonpoint source pollution, erosion, and land loss (CAPSA, 2011). Many of these environmental problems are being addressed from a landscape perspective, thereby creating an operational gap between land managers and planners—who work at regional scales—and the occupants of the basin—who work at local scales and who typically lack technical information to understand and participate in the territorial planning process of their watershed. Tools to foresee potential problems at smaller analysis scales (e.g., agricultural plots) would give landscape planners a way to evaluate the potential hydrological problems faced locally (on plots) by farmers. Such tools would also give farmers and other watershed inhabitants information that could help them to prevent environmental problems and improve their income through better practices. Provision and use of such tools would represent a viable, empowering management practice that could help to improve water quality and reduce environmental impacts (van der Velde et al., 2010, John G. Lyon, 2003).

2.2 Data Description

This research is based on two data sets: (a) high-precision and high-density GPS point data sets from field surveys (hereinafter referred to in tables and figures as *GPS*) and (b) a 1-m gridded digital elevation model with a vertical accuracy of 1 m extracted from a WorldView-2 stereo pair (hereinafter referred to in tables and figures as *WV-2*).

2.2.1 Ground-Truth GPS survey

During summer 2011, we carried out ground-truth GPS surveys in three agricultural plots with different topographic characteristics (Fig. 2). Plot 1 has a nearly level longitudinal slope of 0.3% (the longitudinal slope covers the length of the plot and is indicated by the arrow in the plot in Fig. 2). The elevation range of the plot is 2.3 m, and its maximum slope is 25%. Plot 2 has a gentle longitudinal slope (1.0%), maximum slopes of ~27%, and an elevation range of 4.6 m. Plot 3 has a nearly rolling longitudinal slope (5.2%) and an elevation range of 17.4 m, with maximum slopes of 63%.

For this project, we mounted a GPS receiver on an all-terrain vehicle and, using a differential real-time kinematic (RTK) method, collected 131,519 xyz coordinates from a well-distributed grid of points, evenly spaced on the ground approximately every meter. The resulting data set had an average density of 1.5 GPS points per square meter and a vertical accuracy of 10 cm (Table 1). As discussed in Hohle and Hohle (2009), the quantity and accuracy of the control points surveyed must be at least three times as great as those of the DEM evaluated. In the present work, this requirement was surpassed to ensure a correct comparative statistical analysis.

2.2.2 Satellite DEM

The satellite stereo pair was taken by the WorldView-2 VHSR satellite on 14 April 2012 (15:58 and 15:59 GMT). The stereo pair was in UTM projection and WGS84 datum. Additional metadata of the stereo pair are given in Table 2.

In order to geo-rectify the stereo image pair, we provided the image supplier (in the present case, Effigis Inc.) with five ground control points. The ground control points were selected from well-distributed and easily recognizable image features, such as utility poles and the intersections of paved streets. The image supplier then took the stereo image pairs and control points and generated an ortho- and geo-rectified Digital Elevation Model (DEM) using the BAE Systems NGATE module for stereo pairs (Kurt DeVenecia, 2007). That module applies image correlation algorithms to automatically extract elevation. During the process, image features such as roads, tracks, rivers, railways, freeways, etc., are additionally extracted using image interpretation and integrated into the DEM. The output DEM was in the local coordinates of MTM7 projection and NAD83 datum. Pixel spacing and vertical accuracy were both 1 m.

The two data sets (GPS points and WorldView-2 DEM), were then compared using two complementary assessment techniques. The first analysed the ability of the NGATE module to extract accurate elevation values in the form of a gridded model, and the second performed a comparative evaluation of the surface hydrologic variables extracted from the satellite DEM and the GPS-based DEM over the three sample plots.

The three plots used in the GPS survey were untilled and bare of plant life, with topographic features clearly visible, during the field survey (summer 2011) and subsequent satellite image capture (spring 2012). However, there are small concave areas on the satellite image—mainly in Plot 3—where terrain characteristics were not extracted properly (during DEM generation) because of the presence of snow during image acquisition (the discussion section will include some comments on this issue).

2.3 Vertical Accuracy Assessment

For the elevation accuracy assessment, we used widely applied error metrics such as Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) (Eckert et al., 2005). Additionally, and to make this study comparable to other research and to commercially available digital elevation model accuracy reports, we also calculated metrics such as 90th percentile linear error (LE90) and vertical accuracy at 95% confidence level (NDEP, 2004). To accurately calculate absolute vertical accuracy, each sample plot was analysed individually. For this, at the location of each ground-truth GPS point, the corresponding elevation provided by the WV-2 DEM was extracted. For the vertical accuracy assessment, the GPS points were compared directly to the WV2-DEM data. We used this approach rather than a GPS-DEM versus WV2-DEM comparison in order to avoid errors introduced by the GPS interpolation algorithms.

2.4 Hydrological Assessment

The hydrological assessment method used in this work relies on surface runoff variables derived from a grid DEM. Therefore, for the hydrological assessment, the GPS points were interpolated to generate a DEM for each plot. The DEMs were interpolated at 1-m resolution using the Inverse Distance Weighted (IDW) algorithm. This interpolation algorithm performs well when the density and precision of the source elevation data are high (Chaplot et al., 2006, Guo et al., 2010, Aguilar et al., 2010, Lin-Lin Xiao, 2010). Our GPS data set met both of these conditions, with an average point density of 1.5 points/m² and a vertical accuracy of 10 cm.

One quarter of the GPS points were randomly selected for validation purposes (i.e., not used in the interpolation process). As expected, small interpolation errors (0.03 m) were found in the three plots. However, such errors are more sensitive to the DEM's sources than to interpolation algorithms and uncertainties (Erskine et al., 2007, Peng Li, 2012). We concluded, therefore, that the IDW algorithm was an appropriate choice, offering a good balance between accuracy and computing speed.

The hydrologic variables retained for assessment were (1) terrain depressions, (2) terrain slopes, (3) and flow paths. These variables, and their quality indicators, were chosen to ensure an easily reproducible hydrologic quality assessment using available software and the simplest variables (Table 3). In the present case, the quality indicators were extracted using the software ArcGIS® and its ArcHydro® module, which is extensively used in hydrological analyses as it is effective at extracting hydrological

parameters for further modelling (Maidment, 2003, Jin Zhang, 2010, Nigel and Rughooputh, 2010b).

Pits or depressions are low points completely surrounded by higher elevation points. These features pose the main difficulty in determining hydrological flow directions because the depressions must be filled before flow can continue downstream (Jenson and Domingue, 1988). Thus, a DEM that can correctly identify and represent depressions or pits can provide important information at the agricultural plot scale; such information is directly related to nutrient control and crop yields and has wide potential use in precision agriculture (John G. Lyon, 2003). DEM post-processing for hydrologic and erosion modelling produces a “filled” DEM from which pits are removed. To identify the location of depressions, we extracted terrain depression polygons by subtracting the original DEM from this “filled” version. In order to evaluate the performance of the model using this technique, two quality indicators were used: total area of depressions and non-overlapping areas of depressions. The first expresses the quantity of land surface detected as a depression, while the second expresses the spatial coincidence of these depressions over the surface.

After terrain depressions, terrain slopes were extracted. In a gridded DEM, slope is a local function, and it represents the maximum rate of elevation change of a plane formed by a 3x3-cell neighbourhood around the centre pixel (Eq. 1). The slope value of this plane was calculated using the average maximum technique (Burrough, 1986) over the distance between the target cell and its surrounding eight pixels, and it is expressed in decimal degrees as

$$\text{slope} = \arctan [\text{sqr} ((dz/dx)^2 + (dz/dy)^2)] \quad (\text{Eq. 1})$$

where dz/dx is the rate of elevation change in the east–west direction and dz/dy is the rate of elevation change in the north–south direction of the plane. To evaluate the performance of this variable, three quality indicators were used: the longitudinal slope (Fig. 2), the mean slope, and the maximum slope.

Finally, flow paths were extracted, and to evaluate their performance five quality indicators were calculated: mean length, maximum length, total length, drainage outlets, and drainage area. The first three indicators are directly derived from the geometric properties of flow paths, while the other two—drainage outlets and drainage area—are extracted indirectly. Drainage outlets give precise information of the position at which water flows out of a catchment area, while drainage area corresponds to the total area drained towards the drainage point; the latter is commonly used as a proxy of surface runoff intensity. To calculate these five indicators, intermediate data sets such as flow direction and flow accumulation were extracted. The ArcHydro software uses a pre-filling algorithm to calculate flow direction (Jenson and Domingue, 1988), which ensures a continuous water flow and enables further hydrological modelling. The flow direction algorithm used by the software, called D8, uses the direction of the steepest descent from the central pixel of a 3x3 moving window to one of its eight neighbours to determine the direction of water flow in every cell of the elevation model. Subsequently, flow paths were extracted using an accumulation threshold of 100 cells (i.e., 100 m^2), which was selected after several tests were performed to determine the number of cells needed to ensure good, continuous representation of the surface runoff flow paths. Due to the importance of knowing the position and amount of water flow towards natural water streams or artificial pathways, an individual analysis was made for each side of the sample plots (i.e., northeast, northwest, etc.).

Once the hydrologic variables were calculated and in order to ensure easy comparability between the variables and across the three sample plots, we used the relative error (e), expressed in percentage terms (Eq. 2), as a relative measure of change, as follows:

$$e = [(value - value_{ref}) / value_{ref}] * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

where $value$ corresponds to the measured value from the satellite DEM and $value_{ref}$ is the ground-truth value extracted from the GPS-derived elevation model. This error metric is frequently used when absolute values are expressed in different units or different magnitude scales. It must be noted that neither of the two elevation models, GPS and WV-2, were post-treated with drainage enforcement procedures in order to impose linear or polygonal entities, particularly to enforce flow direction.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Vertical Accuracy

First, we analysed the elevation residuals using the three GPS point data sets. This enabled us to identify the presence of a systematic elevation error (bias), with a global mean value of 0.78 m, revealing a trend of the satellite DEM to systematically overestimate the elevation in bare, flat terrain (Fig. 3). There are two error categories in elevation models: random and systematic. The latter category originates mostly in the production chain, which is composed of processes that make use of image matching, elevation extraction, and gridding algorithms (Wise, 2000). Similar elevation biases have been found in other DEMs derived from imagery from WorldView-2 and other satellites (P. Reinartz, 2010, G. Büyüksalih, 2012, Peng Li, 2012). As these examples show, systematic errors are commonly present in satellite-derived elevation products. It is preferable that such errors be detected and eliminated before further processing, particularly in studies requiring absolute DEM values or operating at very high spatial resolution.

Table 4 shows the accuracy metrics calculated using the biased elevation residuals. We found a global Root Mean Square Error (RMSE) of 0.81 m, a Vertical Accuracy of 1.60 m, a Mean Absolute Error of 0.78 m, a global Maximum Absolute Error of 2.36 m, and a Vertical Linear Error (LE90) at the 90th percentile of 1.05 m.

Before further analysis, we removed the 0.78-m bias in order to obtain adjusted error metrics of the elevation model (Vaaja et al., 2011). Once the bias was removed (Table 5), we found a global Root Mean Square Error (RMSE) of 0.23 m, a Vertical Accuracy of 0.45 m, a Mean Absolute Error of 0.17 m, a global Maximum Absolute Error of 1.55 m, and a Vertical Linear Error (LE90) at the 90th percentile of 0.36 m.

In brief, the WV-2 DEM achieved a vertical accuracy of 0.45 m, consistent with the quality standards of the supplier. The WV-2 DEM vertical errors obtained in this work are similar to those found in other studies using WorldView-2 images, particularly those focused on analysing DEM performance on bare land (Hobi and Ginzler, 2012, Mitchel G., 2010). This confirms both the capabilities of the satellite-derived elevation model and the correctness of the present methodology and data used.

In addition to our analysis of vertical accuracy metrics, we made a visual comparison of transversal elevation profiles of the sample plots to evaluate the capabilities of the satellite DEM to detect micro-topographic features (Fig. 4). In the GPS-based DEM (solid line), we can clearly observe the micro-relief defined by the longitudinal water flow paths (valleys) and the cultivable areas (crests). Conversely, the WorldView-2 DEM (dotted line) shows mostly a smoothing effect in elevation, producing a flattening in all the profiles. The NGATE elevation extraction algorithm, which is a hybrid algorithm that uses a variably sized search window to apply edge and area matching correlation algorithms to every pixel of the image (Kurt DeVenecia, 2007), was unable to properly depict all of the micro-topographic features. The magnitude of the resultant flattening is evident in the maximum absolute errors recorded in the sample plots (0.88 m, 0.87 m, and 1.55 m for plots 1, 2, and 3, respectively).

It is important to note that at the time the stereo pair was acquired (during the second week of April 2012), there were still snow patches in the study area. The snow was present mostly in depressions and drainage channels and thus certainly influenced the extraction of elevation information. Figure 5 shows the snow present in plot 3 (the white patches on the ground). The hatched regions (polygons) have LE90 errors greater than 0.36 m.

Furthermore, although the vertical accuracy assessment provides an indication of the DEM's accuracy, this metric cannot be taken to express the overall performance of the WV-2 DEM in the study area. Our ground-truth check was performed only on agricultural, untilled plots. As P. Reinartz (2010) has suggested, further research using different land cover types and probably different methodologies is needed in order to fully assess the ability of the WorldView-2 satellite to depict elevation in complex landscapes, including forested and urbanized areas,. As demonstrated by the metrics calculated for the present study, the vertical precision of the elevation data in the satellite-derived DEM is less than 1 meter, which may be accurate enough for environmental modelling at regional scales. However, at local (plot) scales, the inability of the DEM to pick up micro-topographic details could lead to erroneous results. To overcome this problem, DEM reconditioning methods may need to be applied. For example, AGREE, an algorithm incorporated into ArcHydro, modifies DEMs by imposing vector features such as channels and streams to ensure better surface hydrologic analysis, especially in the calculation of flow direction and flow accumulation (Hellweger, 1997).

3.2 Hydrologic Variables

Table 6 summarizes the comparison statistics of the three surface hydrologic variables: terrain depressions, terrain slope, and runoff flow paths. By analysing the relative errors of each quality indicator, we were able to assess the performance of the satellite elevation model at extracting these variables. We selected the relative error e (Eq. 2) and its mean absolute value $|e|$ to express the change of each quality indicator in each sample plot; this approach makes it easy to compare the variables to one another. All the error metrics are expressed in percentage to ease interpretation.

First, terrain depressions were analyzed. This variable was the most difficult one for the satellite-derived elevation model to detect. For this assessment, we compared

both the total area detected as land depressions in the two DEMs and the non-overlapping area between them. While the total area expresses the quantity of terrain surface that was detected as a depression, the non-overlapping area represents the spatial disparity between the areas detected in the two DEMs, making this a quality indicator of the discrepancy between the DEMs. In both cases, these calculations produced mean absolute errors as high as 72%, demonstrating the difficulty of using the WV-2 DEM to detect land depressions. Despite these unpromising results, it may be possible to obtain good characterization of terrain depressions using satellite stereo pairs, for instance, by exploiting spectral information to calculate terrain wetness indices. Such techniques, beyond the scope of this paper, are part of the complementary digital image processing techniques available in the remote sensing field.

Next, terrain slope, expressed here as percentage rise, was analysed. This variable is widely used for spatial modelling (for example, in rainfall-runoff models) and as a component in erosion assessment and the Universal Soil Loss Equation (e.g., Nigel and Rughooputh (2013)). The longitudinal slope for each plot was calculated over the length of the plot, as shown by the arrow in Figure 2. There was a little variation (1%) between the two elevation models for the longitudinal slope, showing that the satellite model was able to correctly represent the general slope trend of an agricultural plot. However, we found that the WorldView-2 DEM had difficulties estimating mean and maximum slopes, with mean absolute errors of 27% and 22%, respectively. On rolling terrain (Plot 3), slope calculation performed well, with small errors of 3% and 4% in the mean and maximum values (in contrast to flatter plots). In general, the satellite DEM underestimated slopes, confirming the spatial pattern found in the transversal profiles (Fig. 4), where a loss of local vertical details can be seen in the WorldView-2 model. Depending on the weight of the slope variable in the hydrologic model used, the impact of underestimating slope can vary widely. For example, Kenward et al. (2000) found that even minimal variations in slope can lead to predictions of mean annual runoff volumes in a river basin from 0.3% to 7% higher than expected.

For runoff flow paths, the mean, maximum, and total lengths of the water streams extracted were calculated. The high relative errors obtained indicate that the WV-2 DEM also underestimated this variable. The total length calculation had the best overall performance, with 18% relative error, suggesting that WV-2 DEMs may have utility for deriving composite hydrologic variables such as drainage density, which is commonly used in spatial hydrologic modelling. By contrast, as illustrated in Figure 6, the WV-2 DEM was unable to accurately determine either the location or the length of flow paths. Such information is necessary to understand the internal hydrologic configuration of a plot and design surface drainage structures such as inlet and drainage wells (Beaulieu, 2007). To evaluate quantitatively the representation of flow paths, we used two indicators, namely, (1) the drainage outlet and (2) the drainage area of the flow path. For each indicator, relative error (e) and mean absolute relative error ($|e|$) were calculated for each side of the plot (northwest, southeast, northeast, and southwest).

For the drainage outlet indicator, the variable used was the number of drainage outlets per side of the plot (Table 7). This indicator shows a high mean absolute error of 76%, with the WV-2 DEM mostly overestimating the number of drainage outlets per side of each plot. In line with the other indicators and variables analysed, the higher the longitudinal slope, the better the performance by the WV-2 DEM, with relative error ranging from 111% in plot 1 to 43% in plot 3.

The drainage area indicator, which represents the cumulative area drained towards an outlet, also presented a high overall relative error (90%, Table 8). In keeping with the general trend of better performance of the WV-2 DEM in locations with steeper slopes, sample plot 3 had the lowest error (19%).

3.3 General discussion

The performance of the WV-2 DEM in representing plot slopes is better in steep terrain (plot 3) than flat or gentle terrain (plots 1 and 2). The smaller relative errors obtained in the former show the potential applicability of the WV-2 DEM for environmental and hydrologic modelling in such terrain. Multi-temporal Very High Spatial Resolution (VHSR) WV-2 DEMs could be highly useful in those parts of the landscape that usually have the steepest slopes, such as riverine and riparian areas. Indeed, in such areas, the slopes usually go from moderate to high, often within a short distance, and the interactions between agricultural lands and water streams must be monitored regularly to protect and improve the quality of aquatic and environmental resources.

The overall performance of the WV-2 DEM in correctly representing the terrain depressions of the three plots was 72% (mean absolute relative error $|e|$). Plot 2, which is characterized by gentle slopes (mean ~6%), had the lowest $|e|$ (48%). This means the WV-2 DEM may be better at detecting terrain depressions in intermediate terrain than flatter or steeper terrain. On the whole, however, the performance of the WV-2 DEM in extracting terrain depression information was unsatisfactory. The multispectral imaging capabilities of the satellite may offer an alternative means to extract more accurate depression data, as such regions are usually characterized by higher soil water content, a parameter that can usually be detected in the spectral information of the images (John G. Lyon, 2003).

The flow paths of surface runoff in vector format were used to extract three indicators, namely, mean length, maximum length, and total length of flow paths. Only total length performed well in all sample plots, showing a mean absolute relative error ($|e|$) of 18%. This variable can be used to extract other composite variables, such as the drainage density of a plot (useful as an indicator of landscape dissection) and its runoff potential (describing the plot as a whole). The other two flow path indicators, mean length and maximum length, had $|e|$ of 47% and 57%, respectively, confirming that the picture of the internal connectivity and distribution of runoff channels extracted from the satellite DEM is not reliable at the plot scale (i.e., inside the plot).

The WV-2 DEM also performed poorly in drainage outlet analysis, producing a mean absolute relative error ($|e|$) of 76% across the three plots, with plot 3 having the lowest value (43%). The overall performance of the WV-2 DEM was lower in drainage area extraction than drainage outlet extraction. However, while the drainage area indicator shows a mean absolute error of 90% across the three plots, the lowest value recorded (plot 3, 19%) was better than the 43% recorded for drainage outlet extraction. This suggests that drainage area information extracted from WV-2 DEMs may be useful as a parameter in environmental modelling in terrain with a slope generally >5% (and characterizing the plot as a whole).

Vertical error metrics such as RMSE rely on error propagation theory, where it is assumed that vertical errors have a normal distribution, a condition that is not always found in elevation data (Liu et al., 2012). This approach ignores the already-proved influence of land morphology in RMSE calculations (Wilson, 2012) and thus reduces the usefulness of RMSE as a proxy for the quality of micro-topography and surface hydrologic variables extracted.

The disparities between the drainage outlet and drainage area indicators extracted and the actual parameters of the sites can be seen in Figure 6. Both indicators show their best performance in Plot 3, revealing that the extraction of hydrologic parameters is better in steeper terrain than in flat terrain (except probably for the extraction of terrain depressions, which as discussed above, was better in Plot 2). Figure 7 shows the global mean absolute relative errors (by plot) and the corresponding longitudinal slope of the plot. The global mean absolute relative error (MARE) of a plot was calculated using the mean of the absolute errors of the three hydrologic variables extracted in that plot. We found an inverse proportional relationship between MARE and longitudinal slope, i.e., plots with a low longitudinal slope had an overall higher MARE in all hydrologic variables extracted. Plot 3 had the lowest global MARE (37%). Indeed, some variables performed well in Plot 3, with relative errors of less than 20%, indicating that WV-2 DEMs may be useful in such terrain settings.

The satellite-derived elevation model had difficulty extracting accurate surface hydrology features in flat terrain. Callow et al. (2007) also found these difficulties when analysing DEMs at different spatial resolutions. Further research comparing hydrological variables and terrain complexity indices, as suggested by Huaxing (2008), needs to be done to define more meaningful accuracy metrics to assess the quality of micro-topographic hydrologic variables extracted.

To better understand the influence of the particular algorithms used in available software, a number of studies have compared the performance of different programs when calculating parameters for hydrologic modelling (Zhang et al., 1999, Zhou and Liu, 2004, Wilson, 2012, Endreny and Wood, 2001). Such comparisons are beyond the scope of this study, however; our primary goal was to assess the relative accuracy of the various hydrological parameters calculated, not to determine the best methods available to compute such parameters.

WorldView-2 DEMs offer a practical and fast means to obtain accurate digital elevation models at high spatial resolution. Elevation accuracy metrics such as the root mean square error and the linear error at the 90th percentile are currently the standards upon which commercial remotely sensed elevation models are based, but further research must be done to incorporate new metrics for assessing the quality of micro-topographic representation in such elevation models.

At agricultural plot scales (inside the plot), even with a vertical accuracy of 1 metre in a WV-2 DEM product, not all hydrologic variables are correctly extracted, proving that there is gap between vertical accuracy metrics and the quality of hydrologic variables. Overall, for the three plots, the variables that were most accurately extracted were total length of runoff flow paths (18%), maximum slope (22%), and mean slope (27%). Using sample plot 3 as a proxy for terrain with rolling and higher slopes (>5%), the variables that presented potential for use were mean slope (3%) and maximum slope (4%). The variables drainage area (19%) and total length of runoff flowpaths (20%) also had comparatively good performances, making them potentially useful for representing

the plot as a whole, but not for inside-plot representation. Steeper terrain is generally found in hilly and mountainous regions, but steep slopes can also be found in riverine areas of low-relief watersheds, such as the La Chevrotière River Basin (the study area), where the landscape is usually dissected to accommodate streams and rivers.

Consequently, a satellite DEM can serve as an important decision-making tool to help watershed organizations, government offices, and landscape planners characterize, monitor, and preserve the natural resources of riverine areas.

Spectral information is one of the most important features that separate a very high spatial resolution satellite like WorldView-2 from other options for the extraction of digital elevation models. Some of the weaknesses of the stereoscopic extraction of elevation can be overcome by developing complementary methods to extract information using both spectral and stereoscopic information. Our examination of the extraction of hydrologic variables at plot scales confirmed the limitations of satellite DEMs in flat terrain, but it also showed that satellite DEMs have potential usefulness in terrain with steeper slopes, where better results were obtained. In order to exhaustively exploit the potential of very high spatial resolution stereoscopic satellite imagery for surface hydrologic variable extraction and environmental modelling, further research is needed using alternative flow routing algorithms, other land uses, spectral information, and DEM modification techniques.

5. CONCLUSION

Our study found a global vertical accuracy of 0.45 m in a WV-2 DEM product when assessed against ground truth GPS-RTK high density and high precision point data sets over three agricultural plots with nearly level (0–0.5%), gentle (0.5–2%), and rolling (5–10%) topographic slopes. These results confirm the potential of WV-2 stereo image pairs to extract elevation information at high spatial (1-m) resolution. For the extraction of hydrologic variables, the WV-2 DEM performed better on the plot with rolling slopes (5–10%), extracting quality indicators such as total length of flow paths and drainage area with relative errors lower than 20%. This suggests that satellite-derived DEMs have potential for use in environmental modelling applications in areas with rolling or steep slopes. However, the results also indicate some limitations of the WV-2 DEM in the extraction of terrain slope, drainage points, and terrain depressions in areas of flatter slopes (<5%).

6. ACKNOWLEDGMENTS

This research was made possible by the support of the Ministry of Agriculture of Quebec (*Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation*, MAPAQ), project PSIA# 810313. The authors also wish to thank Magali Wirtensohn and Jimmy Poulin for their support in the field campaign and François Riendeau for his efforts in coordinating the generation and delivery of the satellite digital elevation model.

7. REFERENCES

- AGUILAR, F. J., MILLS, J. P., DELGADO, J., AGUILAR, M. A., NEGREIROS, J. G. & PEREZ, J. L. 2010. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 103-110.
- BEAULIEU, R., BREUNE, I. ET GUILLOU, M. 2007. Avaloirs et puisards (Inlet and Drainage Wells). Available:
http://www.agrireseau.qc.ca/references/6/Fiches_MAPAQ-AAC_Erosion/AvaloirsPuisards_EN_web.pdf [Accessed 2013-02-01].
- BURROUGH, P. A. 1986. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*, Oxford, Clarendon Press.
- CALLOW, J. N., VAN NIEL, K. P. & BOGGS, G. S. 2007. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *Journal of Hydrology*, 332, 30-39.
- CAPSA 2011. Portrait préliminaire des nouvelles zones de gestion intégrée de l'eau par bassin versant de la CAPSA : les bassins versants des rivières La Chevrotière et Belle-Isle. St-Raymond, Québec: Organisme des bassins versants des rivières Sainte-Anne, Portneuf, La Chevrotière et Belle-Isle.
- CHAPLOT, V., DARBOUX, F., BOURENNANE, H., LEGUEDOIS, S., SILVERA, N. & PHACHOMPHON, K. 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77, 126-141.
- ECKERT, S., KELLENBERGER, T. & ITTEN, K. 2005. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from aster data in mountainous terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1943-1957.
- ENDRENY, T. A. & WOOD, E. F. 2001. Representing elevation uncertainty in runoff modelling and flowpath mapping. *Hydrological Processes*, 15, 2223-2236.
- ERSKINE, R. H., GREEN, T. R., RAMIREZ, J. A. & MACDONALD, L. H. 2007. Digital elevation accuracy and grid cell size: Effects on estimated terrain attributes. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1371-1380.
- G. BÜYÜKSALIH, I. B., M. ALKAN, K. JACOBSEN 2012. DEM Generation with WorldView-2 Images. *XXII ISPRS Congress*. Melbourne, Australia: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science.
- GE, Y. F., THOMASSON, J. A. & SUI, R. X. 2011. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*, 5, 229-238.
- GUO, Q. H., LI, W. K., YU, H. & ALVAREZ, O. 2010. Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76, 701-712.

- HELLWEGER, F. 1997. AGREE - DEM Surface Reconditioning System. Available: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html> [Accessed 01-1997].
- HOBİ, M. L. & GINZLER, C. 2012. Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on WorldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data. *Sensors*, 12, 6347-6368.
- HOHLE, J. & HOHLE, M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 398-406.
- HOSSEINZADEH, S. R. 2011. Assessing the quality of ASTER DEMs for Hydrological Applications. *2011 International Conference on Environment Science and Engineering*. Singapore: IPCBEE.
- HUAXING, L. 2008. Modelling Terrain Complexity. In: QIMING ZHOU, B. L., GUO-AN TANG (ed.) *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography: Advances in Digital Terrain Analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- JACOBSEN, K. 2004. DEM generation from satellite data. *Remote Sensing in Transition*, 513-525.
- JENSON, S. K. & DOMINGUE, J. O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information-System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
- JIN ZHANG, Q. L., HUILI GONG, XIAOJUAN LI, LINRUI SONG, JIANWEN HUANG. Hydrologic Information Extraction Based on ArcHydro Tool and DEM. 2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, 7 March 2010 2010 Wuhan, China. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- JOHN G. LYON, A. W., BRUCE C. ATHERON, GABRIEL S. SENAY, TOM KRILL 2003. Remote Sensing and GIS for Site-Specific Farming. In: LYON, J. G. (ed.) *GIS for water resources and watershed management*. London: Taylor & Francis.
- KENWARD, T., LETTENMAIER, D. P., WOOD, E. F. & FIELDING, E. 2000. Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment*, 74, 432-444.
- KURT DEVENCIA, S. W., BINGCAI ZHANG 2007. New Approaches to Generating and Processing High Resolution Elevation Data with Imagery. *Photogrammetric Week*. Stuttgart.
- LI, Z., GOLD, C., ZHU, Q. & MYLIBRARY. 2005. *Digital terrain modeling principles and methodology*, New York, CRC Press.
- LIN-LIN XIAO, H.-B. L. 2010. Impact of Digital Elevation Model Resolution on Stream Network Parameters. *2010 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. Wuhan, China: IEEE.

- LIU, X. H., HU, P., HU, H. & SHERBA, J. 2012. Approximation Theory Applied to DEM Vertical Accuracy Assessment. *Transactions in Gis*, 16, 397-410.
- LONGLEY, P. 2005. *Geographical information systems and science*, Chichester ; Etobicoke, Ont., John Wiley & Sons.
- M. EL HAGE, E. S., G. FAOUR, L. POLIDORI 2012. Evaluation of Elevation, Slope and Stream Network Quality of SPOT DEMs. *XXII ISPRS Congress*. Melbourne, Australia: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science.
- MAIDMENT, D. R. 2003. *Arc hydro : GIS for water resources*, Redlands, Calif., ESRI Press.
- MITCHEL G., M. K. 2010. High Resolution Stereo Satellite Elevation Mapping Accuracy Assessment. *ASPRS 2010 Annual Conference*. San Diego, California: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- NDEP 2004. Guidelines for digital elevation data.
- NIGEL, R. & RUGHOOPUTH, S. 2010a. Mapping of monthly soil erosion risk of mainland Mauritius and its aggregation with delineated basins. *Geomorphology*, 114, 101–114.
- NIGEL, R. & RUGHOOPUTH, S. D. D. V. 2010b. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas. *CATENA*, 82, 191–205.
- NIGEL, R. & RUGHOOPUTH, S. D. D. V. 2013. Application of a RUSLE-based soil erosion modelling on Mauritius Island. *Soil Research*, 50, 645–651.
- P. REINARTZ, P. D. A., T. KRAUß, D. POLI, K. JACOBSEN, G. BUYUKSALIH 2010. Benchmarking and quality analysis of dem generated from high and very high resolution optical stereo satellite data". *ISPRS Symp. Commission I, Int. Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII. Convergence in Geomatics, CGC, ISPRS.
- PENG LI, C. S., ZHENHONG LI, JAN-PETER MULLER, JANE DRUMMOND, XIUYANG LI, TAO LI, YINGBING LI, JINGNAN LIU 2012. Evaluation of ASTER GDEM Ver2 Using GPS Measurements and SRTM Ver4.1 in China. *XXII ISPRS Congress*. Melbourne, Australia: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- REZAK, S., LABORDE, J. P. & ERRIH, M. 2012. Validation of a digital terrain model suitable for regional hydrological modelling in northern Algeria. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 57, 928-941.
- TOUTIN, T. & CHENG, P. 2002. Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images. *Optical Engineering*, 41, 2102-2106.

- VAAJA, M., HYYPPIA, J., KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPIA, H. & ALHO, P. 2011. Mapping Topography Changes and Elevation Accuracies Using a Mobile Laser Scanner. *Remote Sensing*, 3, 587-600.
- VAN DER VELDE, Y., ROZEMEIJER, J. C., DE ROOIJ, G. H., VAN GEER, F. C. & BROERS, H. P. 2010. Field-Scale Measurements for Separation of Catchment Discharge into Flow Route Contributions. *Vadose Zone Journal*, 9, 25-35.
- VAZE, J., TENG, J. & SPENCER, G. 2010. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25, 1086-1098.
- WECHSLER, S. P. 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1481–1500.
- WILSON, J. P. 2012. Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137, 107-121.
- WISE, S. 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, 14, 1909-1929.
- ZHANG, X. Y., DRAKE, N. A., WAINWRIGHT, J. & MULLIGAN, M. 1999. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 763-779.
- ZHOU, Q. M. & LIU, X. J. 2004. Error analysis on grid-based slope and aspect algorithms. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 957-962.

La Chevrotière River Basin

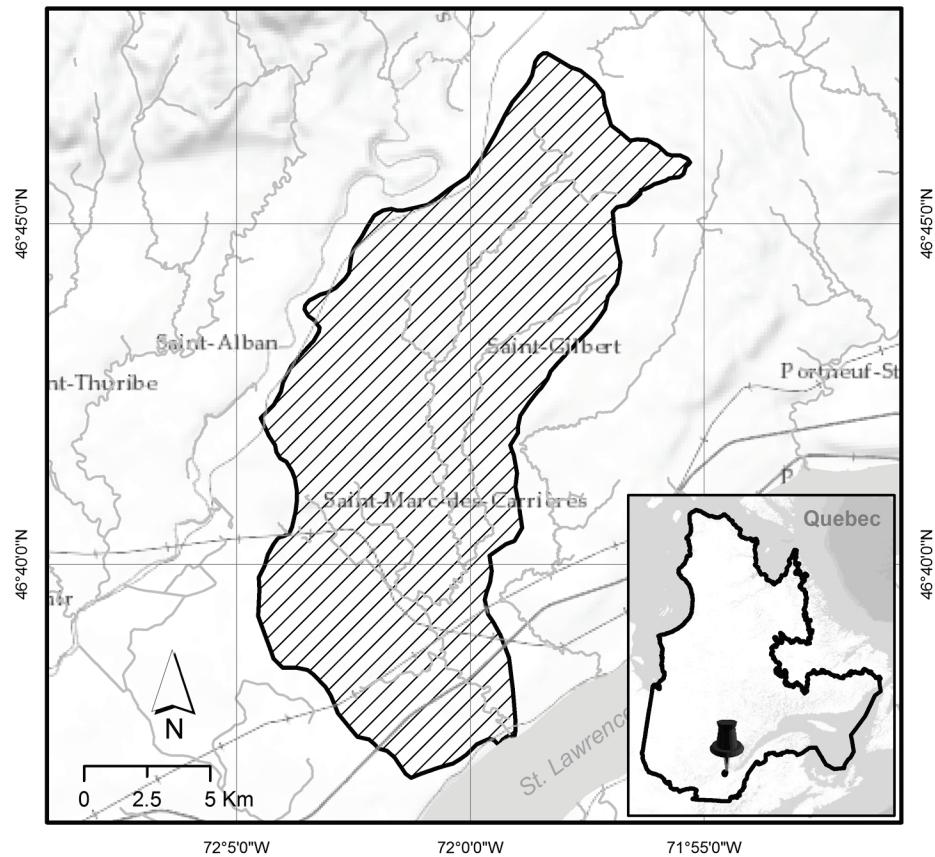


Figure 11: The study area, the La Chevrotière river basin (107 km^2), located on the north shore of the St. Lawrence River in the province of Quebec, Canada.

Sample Plots

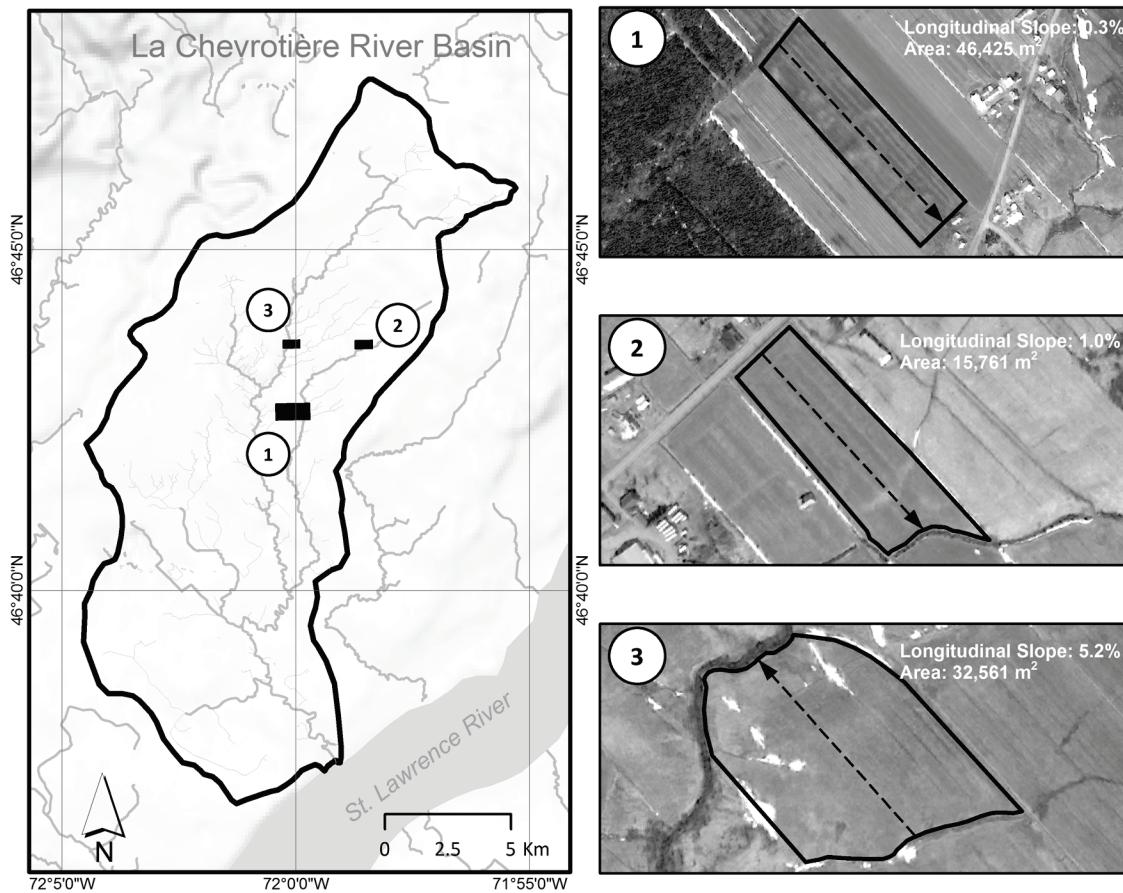


Figure 12: The three agricultural plots used for ground-truth GPS-RTK survey. The arrow in each plot represents the longitudinal slope used for describing the topography of the plot.

Table 1: Ground-truth data set statistics.

Elevation (m)	Plot		
	1	2	3
Minimum	66.77	83.89	58.66
Maximum	69.05	88.44	76.12
Range	2.28	4.56	17.44
Mean	68.08	87.29	71.54
Median	68.11	87.85	73.72
Standard Deviation	0.35	1.15	4.95

Longitudinal Slope (%)	0.3	1.0	5.2
------------------------	-----	-----	-----

Table 2: WorldView-2 imagery metadata.

Parameter	Value
Acquisition Date	2012-04-14
Spectral/Spatial Resolution	(1 band) Panchromatic: 0.5 m (8 bands) Multispectral: 2.0 m
Looks	2
Swath	16.4 km
Northwest Latitude	46.79
Northwest Longitude	-72.08
Southeast Latitude	46.62
Southeast Longitude	-71.92
Scan Direction (1 st image/2 nd image)	Forward/Reverse
Time GMT	15:58/15:59
Sun Azimuth	160.4/159.9
Sun Elevation	51.8/51.7
Satellite Azimuth	104.4/45.8
Satellite Elevation	66.8/51.9
Off-Nadir View Angle	20.5/33.4
Cloud Cover	0.009/0.000

Table 3: Hydrologic variables.

Variable	Quality Indicators	Output Information
Terrain Depressions	Depressions' Total Area Depressions' Non-Overlapping Area	Vector Polygons
Slope	Longitudinal Slope Mean Slope Maximum Slope	Raster Layers
Flow Paths	Flow Paths' Mean Length Flow Paths' Maximum Length Flow Paths' Total Length Drainage Outlets Drainage Area	Vector Points and Polylines

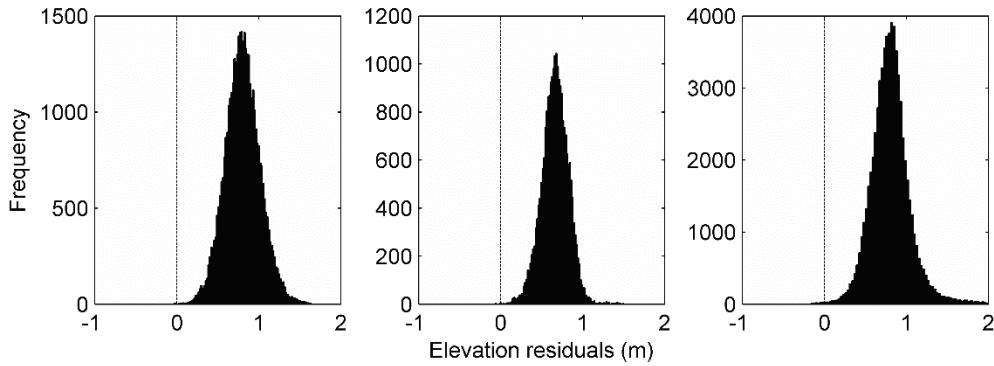


Figure 13: Histograms of elevation residuals of the sample plots.

Table 4: Biased vertical accuracy metrics (m) of the WorldView-2 DEM.

Plot	Bias	RMSE	Vertical Accuracy	MAE	Maximum Absolute Error	LE90
1	0.80	0.83	1.63	0.80	1.67	1.08
2	0.67	0.69	1.34	0.67	1.53	0.87
3	0.81	0.84	1.66	0.81	2.36	1.08
Global	0.78	0.81	1.60	0.78	2.36	1.05

Table 5: Vertical accuracy metrics (m) of the WorldView-2 DEM.

Plot	RMSE	Vertical Accuracy	MAE	Maximum Absolute Error	LE90
1	0.22	0.42	0.17	0.88	0.36
2	0.17	0.33	0.13	0.87	0.56
3	0.25	0.49	0.18	1.55	0.38
Global	0.23	0.45	0.17	1.55	0.36

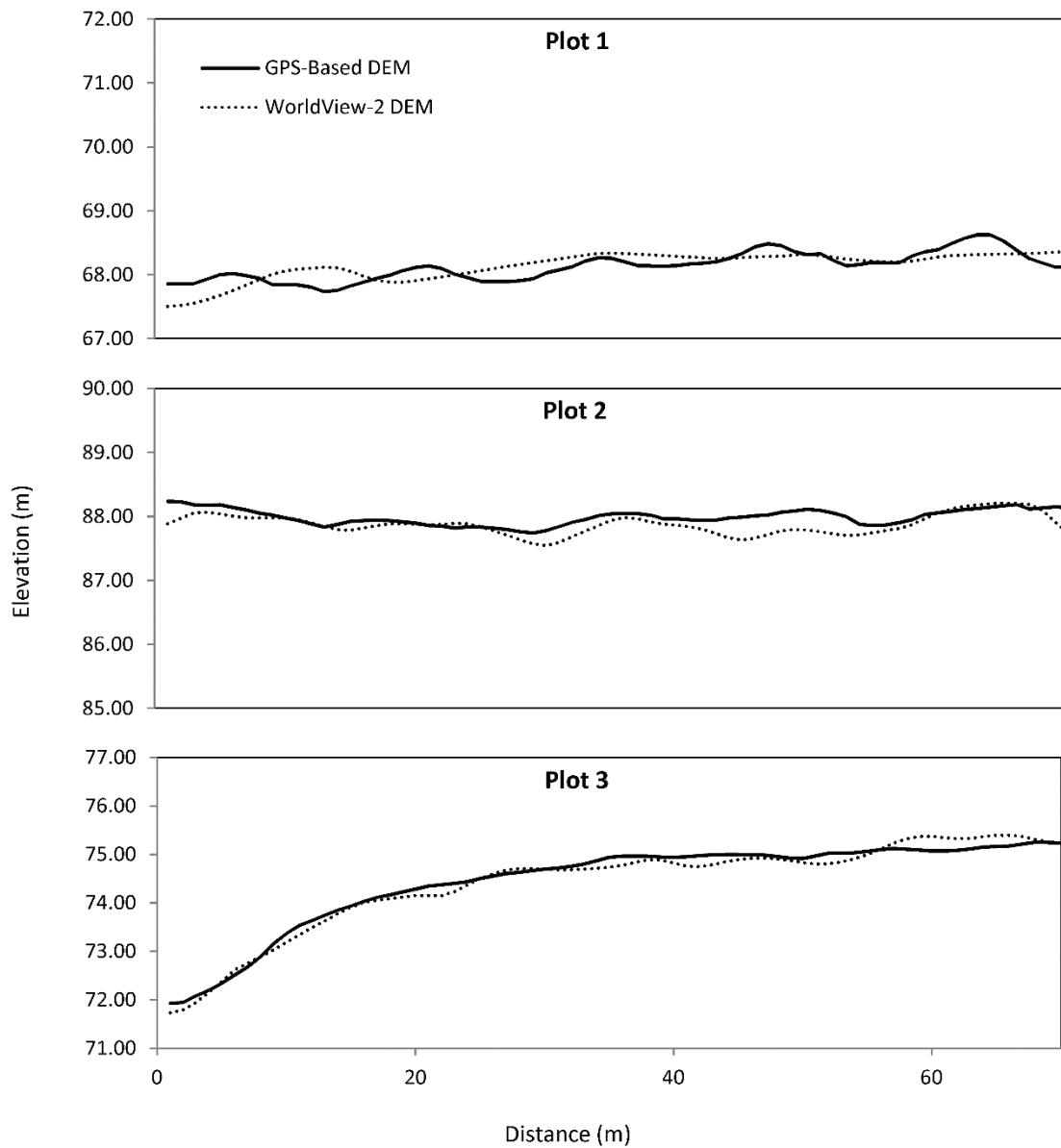


Figure 14: Transverse elevation profiles of the sample plots.

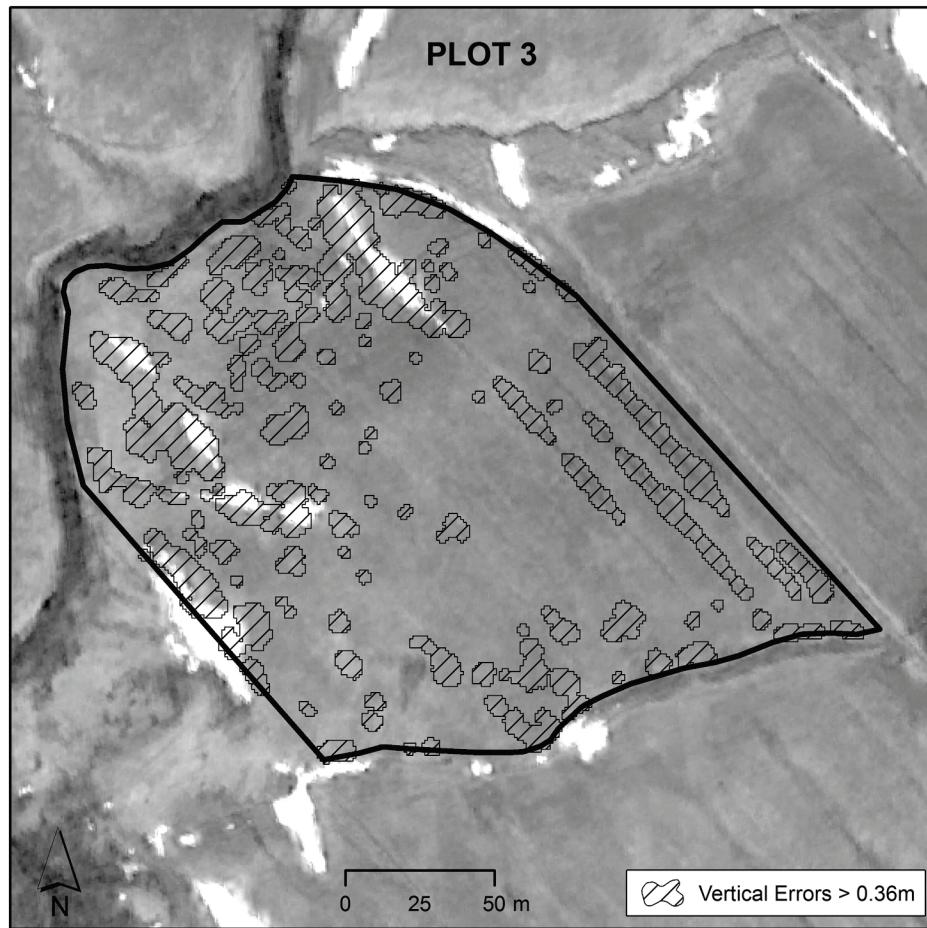


Figure 15: Spatial distribution of snow patches and vertical errors on Plot 3.

Table 6: Comparison statistics (terrain depressions, slope, flow paths) between the WV-2 DEM and the GPS-derived DEM for the three plots. The longitudinal slope covers the length of the plot as shown by the arrow in Figure 2.

Hydrologic Variables	Plot 1			Plot 2			Plot 3			
	GPS	WV-2	e	GPS	WV-2	e	GP S	WV-2	e	e
<i>Depressions</i>										
Total Area (m^2)	5117	9514	86%	1486	2206	48%	838	1513	81%	%
Non-Overlapping Area (m^2)	3331		65%	941		63%	726		87%	%
<i>Slope</i>										

Longitudinal Slope (%)	0.3	0.3	0%	1.0	1.0	0%	5.2	5.1	-2%	1%
			-			-				27
Mean Slope (%)	3.3	2.5	25%	5.23	6.1	54%	12.9	13.3	3%	%
			-	26.5		-				22
Maximum Slope (%)	13.9	12.1	13%	2	33.9	48%	62.8	65.5	4%	%
<i>Flow Paths</i>										
Mean Length (m)	40	13	67%	23	12	46%	20	14	28%	%
			-			-			-	57
Maximum Length (m)	173	69	60%	164	69	58%	139	66	53%	%
			-			-	284		-	18
Total Length (m)	2994	2629	12%	1062	833	21%	6	2290	20%	%

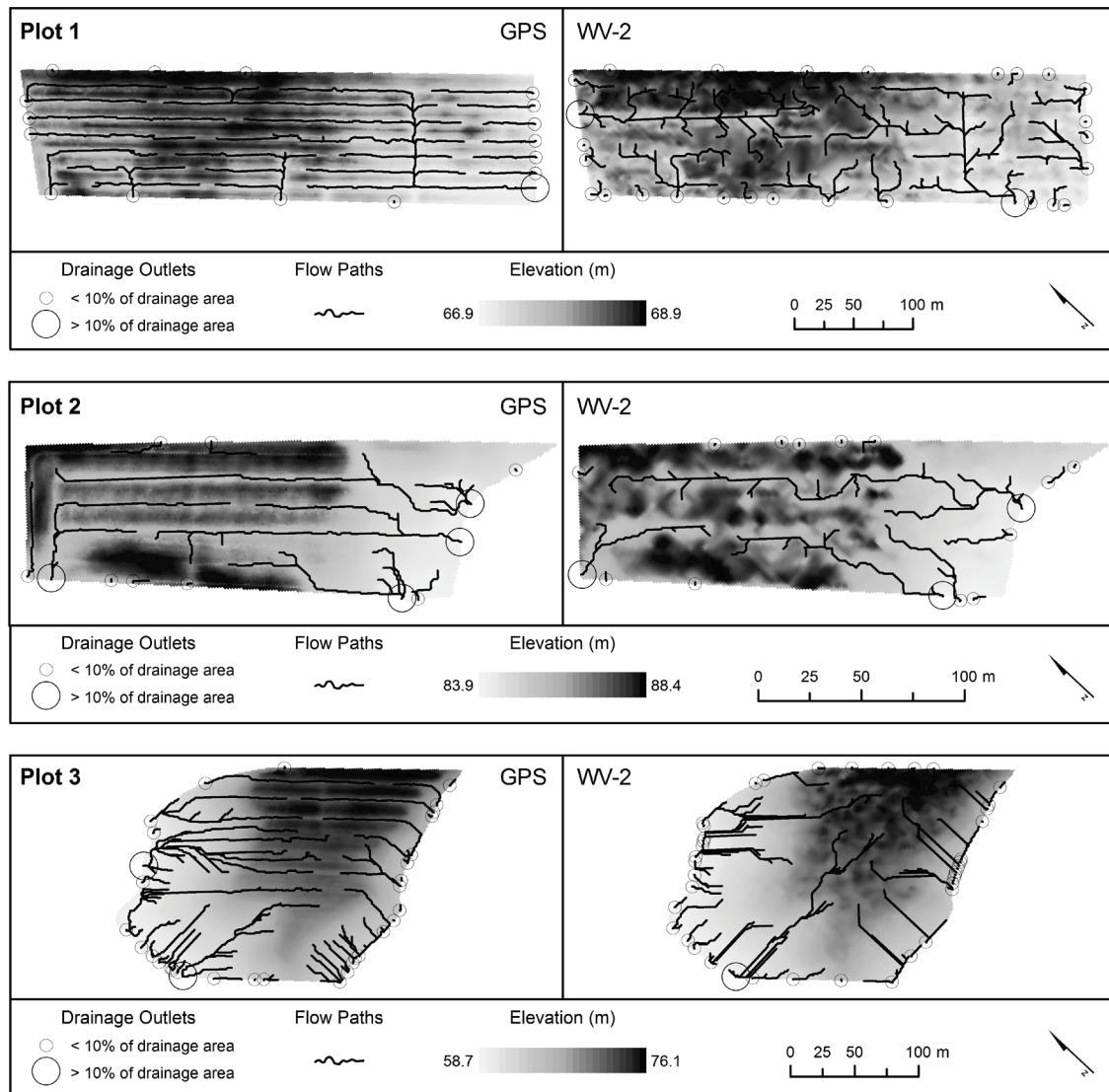


Figure 16: Elevation, runoff flow paths, and drainage points for the satellite- and GPS-based DEM for each plot. Flow paths are shown as black lines, and drainage outlets are represented as two classes: those with a total drainage area of (i) less than 10% and (ii) more than 10% of plot's area. A flow accumulation threshold of 100 cells (i.e., 100 m²) was used to extract the flow paths.

Table 7: Number of drainage outlets derived per side of each plot for the flow paths extracted from the GPS- and the WV-2-based DEM (sides with the highest slope are shown in *italics*).

Plot Side	Plot 1			Plot 2			Plot 3		
	GPS	WV-2	e	GPS	WV-2	e	GPS	WV-2	e
<i>Northwest</i>	3	5	67%	1	2	100%	12	14	17%
<i>Southeast</i>	7	4	-43%	3	4	33%	16	15	-6%
<i>Northeast</i>	3	7	133%	2	5	150%	2	5	150%
<i>Southwest</i>	4	12	200%	6	5	-17%	3	3	0%
e for each plot	111%			75%			43%		
Mean e									

Table 8: Total drainage surface area (m²) per side of each plot for the flow paths extracted from the GPS- and the WV-2-based DEM (sides with the highest slope are shown in *italics*).

Plot Side	Plot 1			Plot 2			Plot 3		
	GPS	WV-2	e	GPS	WV-2	e	GPS	WV-2	e
<i>Northwest</i>	8085	12969	60%	375	2056	448%	18158	16733	-8%
<i>Southeast</i>	24908	4567	-82%	8197	7352	-10%	10642	11659	10%
<i>Northeast</i>	466	1360	192%	559	676	21%	1862	1397	-25%
<i>Southwest</i>	9680	24948	158%	5658	3964	-30%	795	1051	32%
e for each plot	123%			127%			19%		
Mean e									

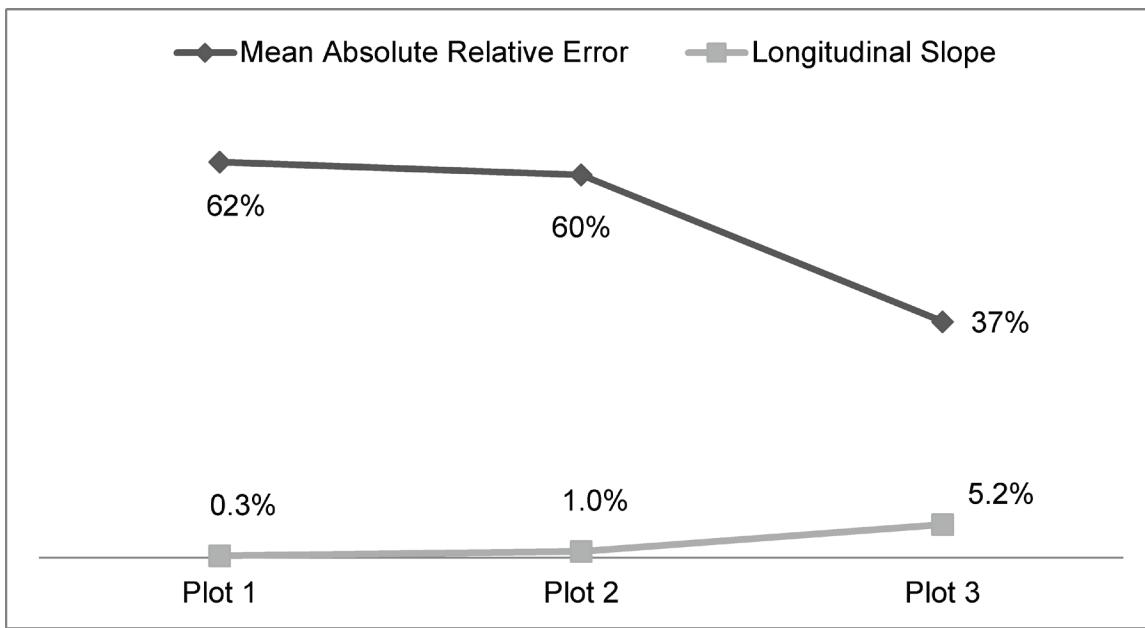


Figure 17: Mean Absolute Relative Errors and longitudinal slopes of sample plots.

Présentation orale Julio Novoa. *Riparian Buffer Strips Management Using WorldView-2 Images*. 34e Symposium canadien de Télédétection. Victoria, BC. 27-29 août 2013.



Riparian Buffer Strips Management Using WorldView-2 Images

Julio Novoa, Karem Chokmani, Rody Nigel
August 27-29, 2013
34th Canadian Symposium on Remote Sensing

Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avant-garde

The poster is a presentation slide for a remote sensing symposium. It features a background of topographic maps and satellite imagery. In the center, there is a graph showing the relationship between $[Cd^{2+}]$ and $\ln \left(\frac{P_1 Q_2}{P_2 - P_1} \right)$. The title "Riparian Buffer Strips Management Using WorldView-2 Images" is prominently displayed. The authors' names, "Julio Novoa, Karem Chokmani, Rody Nigel", and the date "August 27-29, 2013" are listed below the title. The event name "34th Canadian Symposium on Remote Sensing" is also present. The bottom left corner contains the text "Centre - Eau Terre Environnement". The bottom right corner features the INRS logo with the tagline "Université d'avant-garde".

Introduction

Riparian Buffer Strips (RBS)

- Interface (vegetated area) between terrestrial and aquatic ecosystems
- Retention of sediments, nutrients and contaminants
- Protection against soil erosion and flood damage
- Wildlife corridors

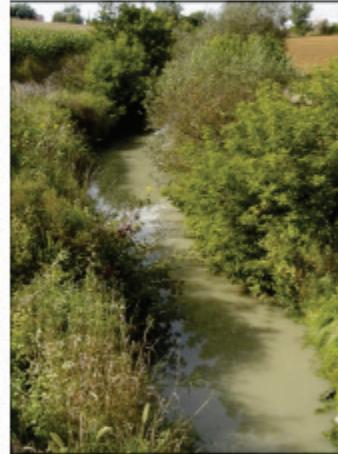


Photo : Bruno Lavoie, MLI 03/07

RBS in Quebec

- MDDEFP (Water Protection Law)
- Quality Index

5

Introduction

RBS Quality Index

- Saint-Jacques, N., Richard Y. (1996)
 - Positive correlation between the **RBS Quality Index** and the ecological conditions of the aquatic habitats, using health indicators of fish and benthic communities
- RBS Quality Index is based on 9 components (land use classes)

7

Problem Statement

- Lack of a simple methodology, replicable over time, to foster/improve management of RBS:**

- Use of very high spatial satellite imagery
 - Quality Index (environmental compliance)
 - Efficiency Index (metric in agricultural areas)



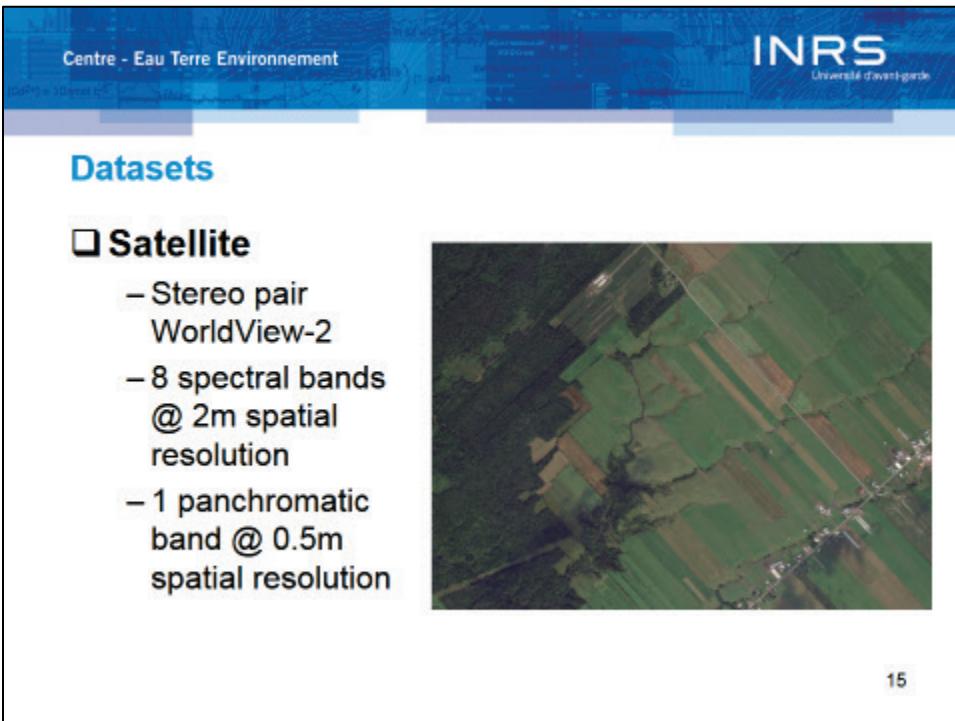
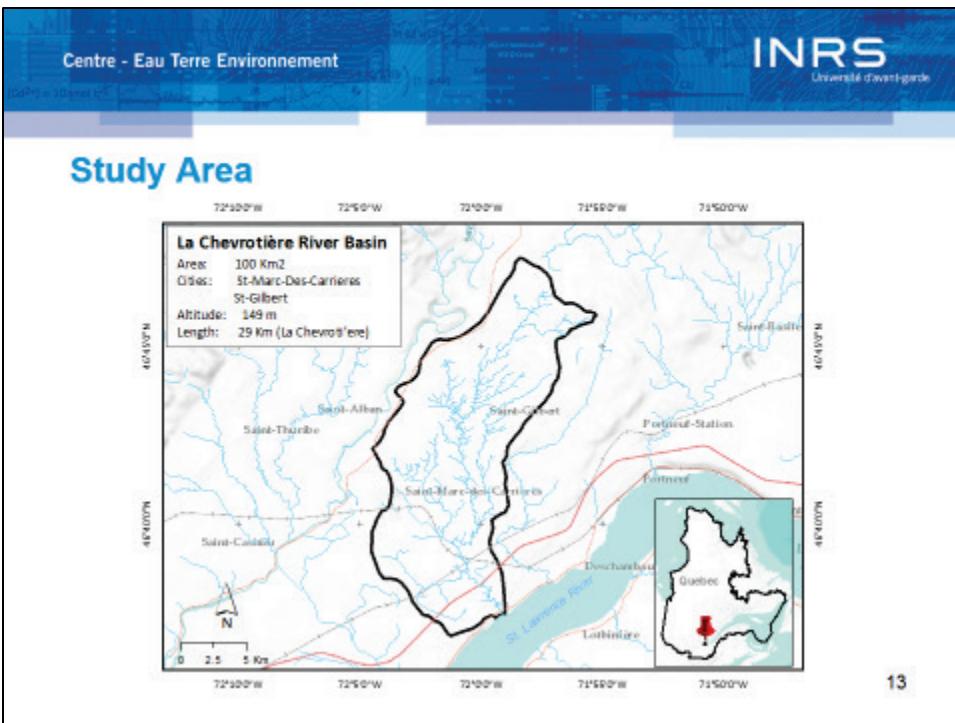
Source: digitalglobe.com

9

Objective

- Develop an operational methodology to inventory and analyze the quality and efficiency of riparian buffer strips using very high spatial resolution satellite imagery**
 - Inventory riparian land use
 - Evaluate the environmental quality of RBS
 - Evaluate the efficiency of RBS in agricultural areas

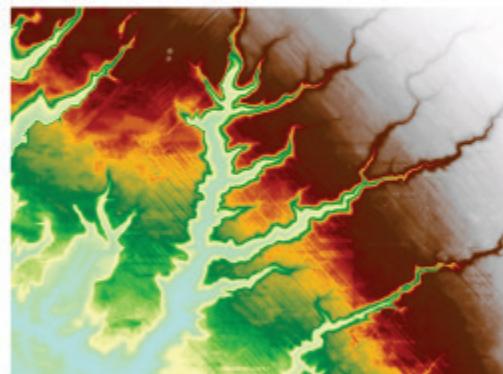
11



Datasets

□ Satellite

- Stereo pair WorldView-2
- Digital elevation model
 - 1-m spatial resolution
 - Vertical accuracy* = 0.45m



* Novoa, J., Chokmani, K., Nigel, R., Dufour, P. Quality assessment from a hydrologic perspective of a digital elevation model derived from WorldView-2 remote sensing data. Submitted to the Hydrological Sciences Journal on June 12, 2013.

17

Datasets

□ Fieldwork

- DEM Validation
 - GPS-RTK
- Assessment of the RBS Quality Index
- 80 training sites for the land use inventory



19

Methodology: Land use inventory

Preprocessing:

- Atmospheric Correction, Pansharpening, Orthorectification



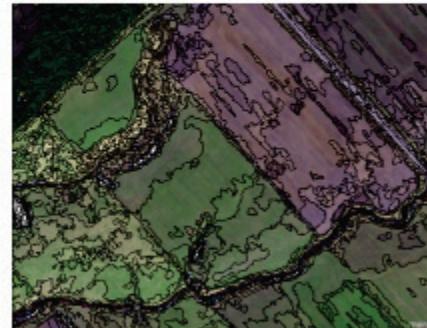
50-m buffer

21

Methodology: Land use inventory

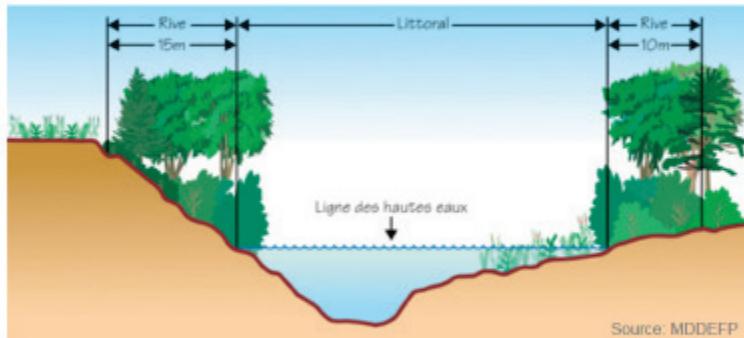
Object-based Classification:

- Images: Summer 2011, Spring 2012
- Bands: 1st Principal Component, NDVI
- 80 training sites
- NN algorithm



23

Methodology: RBS Quality Index



If Slope > 30%:
RBS Width = 15m

If Slope < 30%:
RBS Width = 10m

25

Methodology: RBS Quality Index

- Calculated in every 500-m section
 - % of each land use class

$$\text{RBS Quality Index} = \frac{10T + 8.2S + 5.8H + 4.3LZ + 3G + 1.9C + 1.7BS + 3.8R + 1.9I}{10}$$

Trees	T
Shrubs	S
Herbs	H
Logging Zones	LZ
Grasslands	G
Crops	C
Bare Soil	BS
Rocks	R
Infrastructure	I

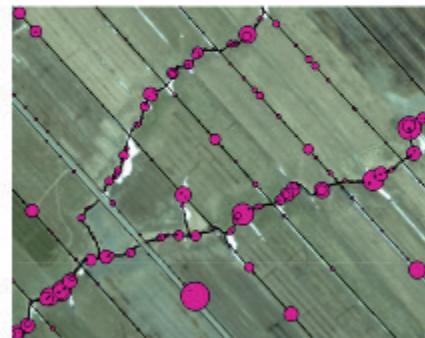
27

Methodology: RBS Efficiency Index

Efficiency based

on:

- Land use coverage (RBS Quality Index)
- Flow accumulation of extreme drainage points (RBS Drainage Quality Index)



29

Methodology: RBS Efficiency Index

From DEM: extraction of surface runoff variables

- Flow direction, flow accumulation, drainage points, ...

$$\text{RBS Drainage Quality Index} = \frac{\text{Flow accumulation of extreme drainage points}}{\text{Plot area}}$$

- ### **RBS Efficiency Index = min (RBS Quality Index, RBS Drainage Quality Index)**

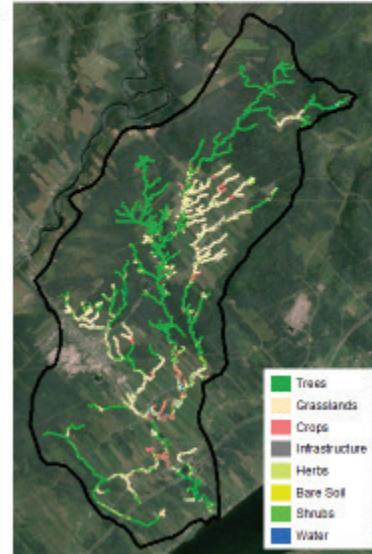
31

Results: Land use inventory

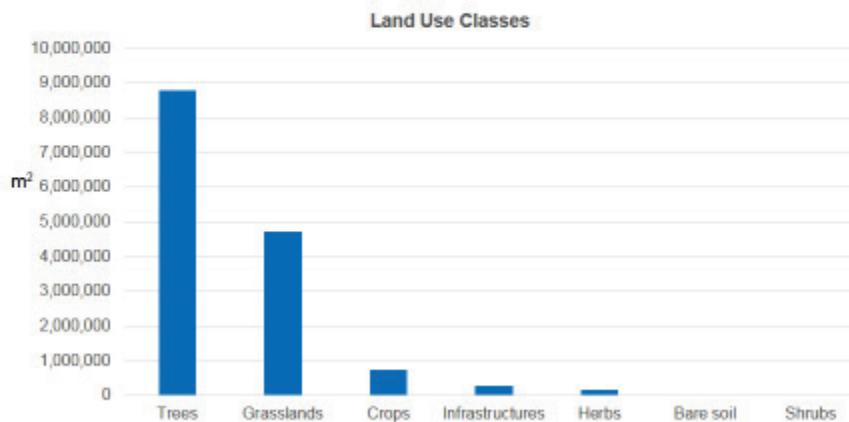
Kappa per class

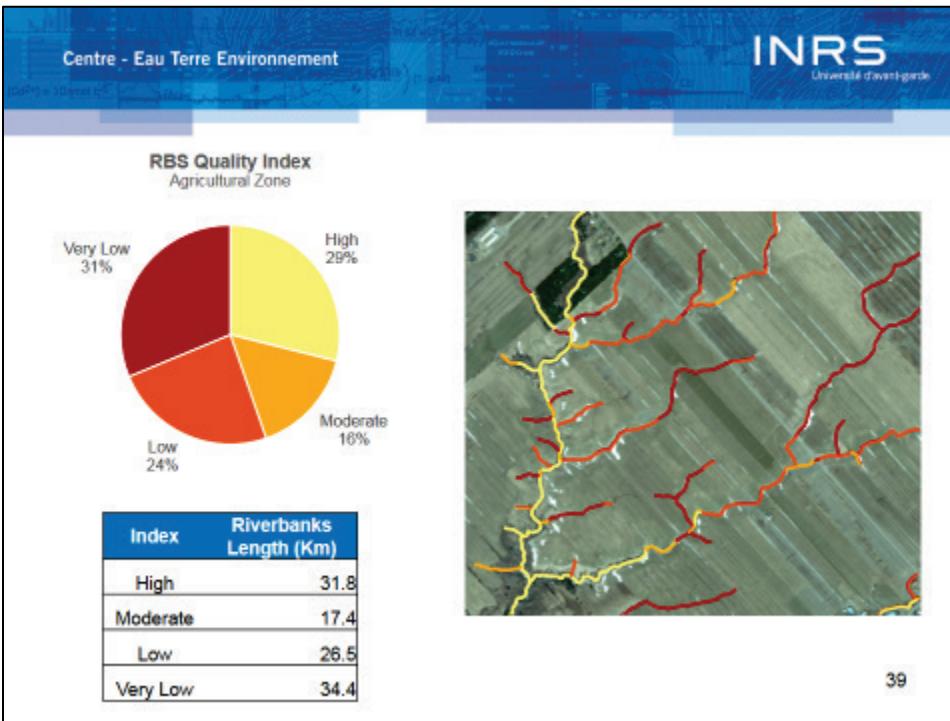
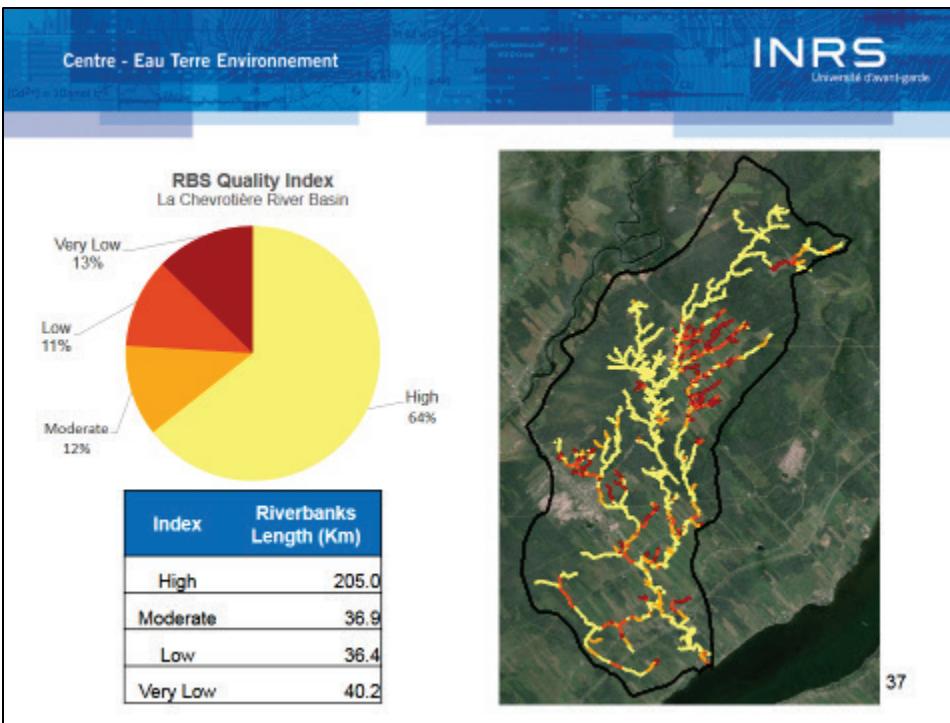
- Trees, Crops, Bare Soil, Infrastructure > 0.92
- Grasslands: 0.67
- Shrubs: 0.54
- Herbs: 0.39

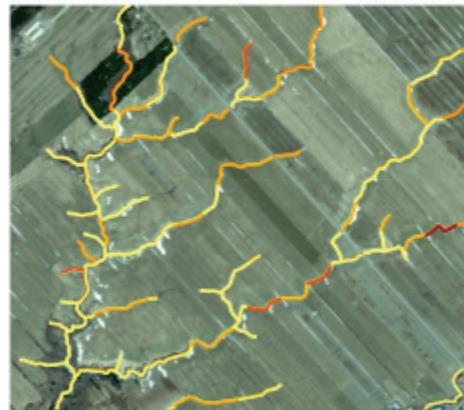
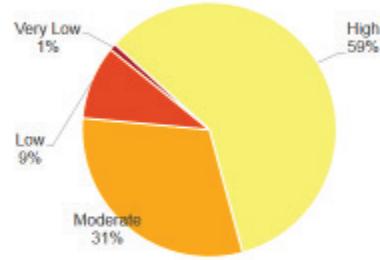
Kappa = 0.82



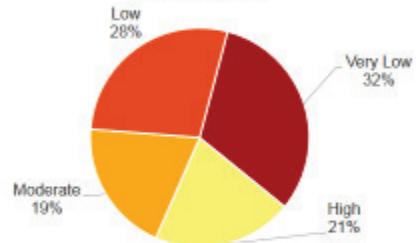
Results: Land Use Inventory



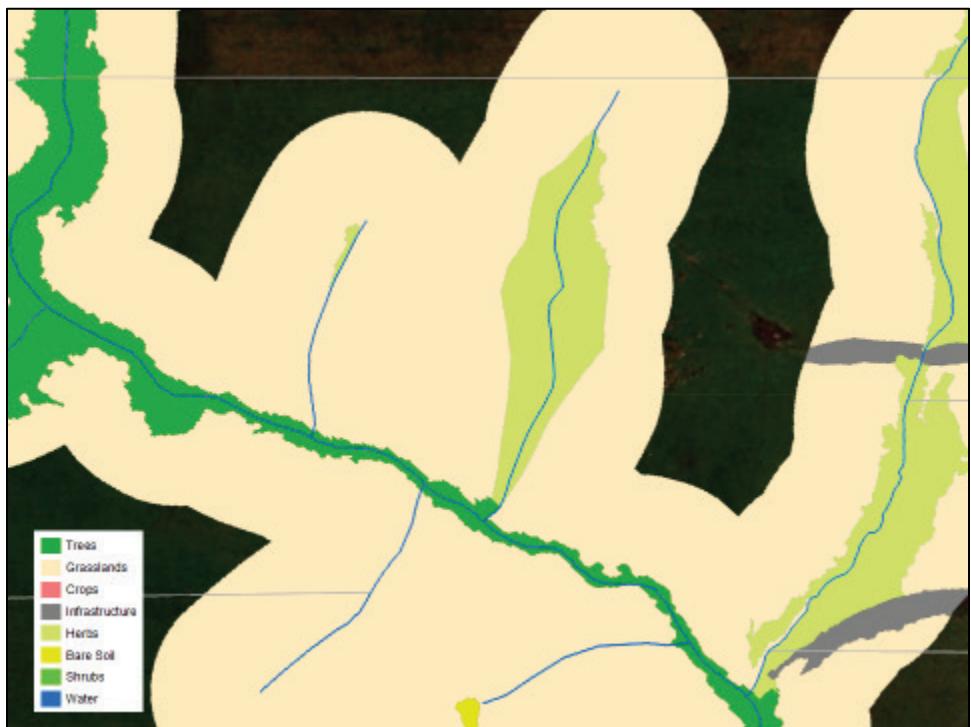
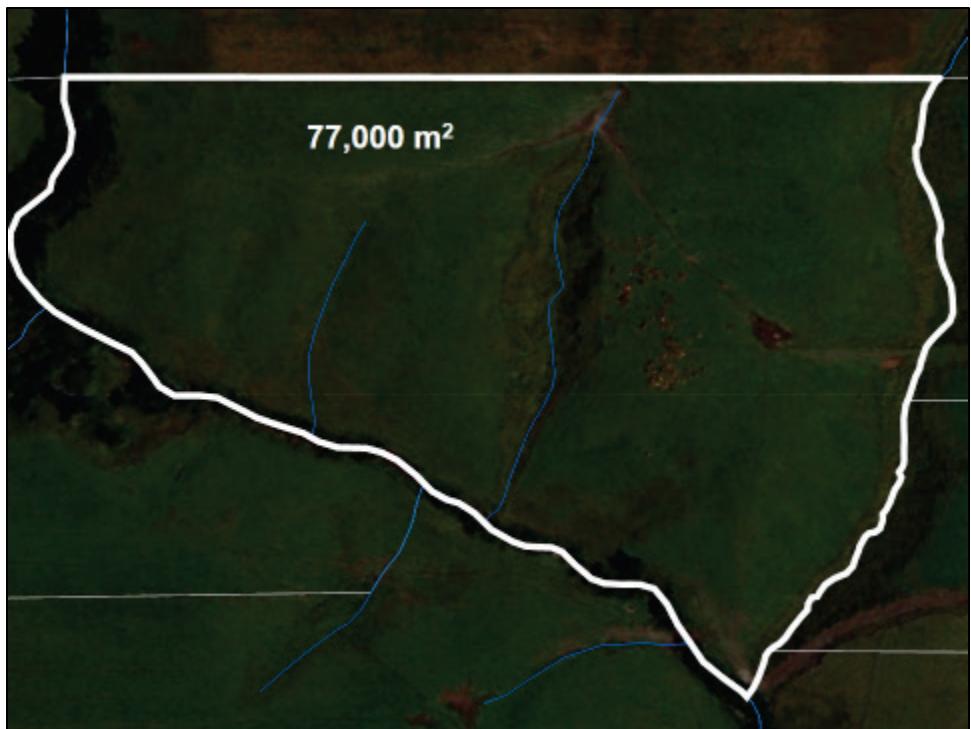


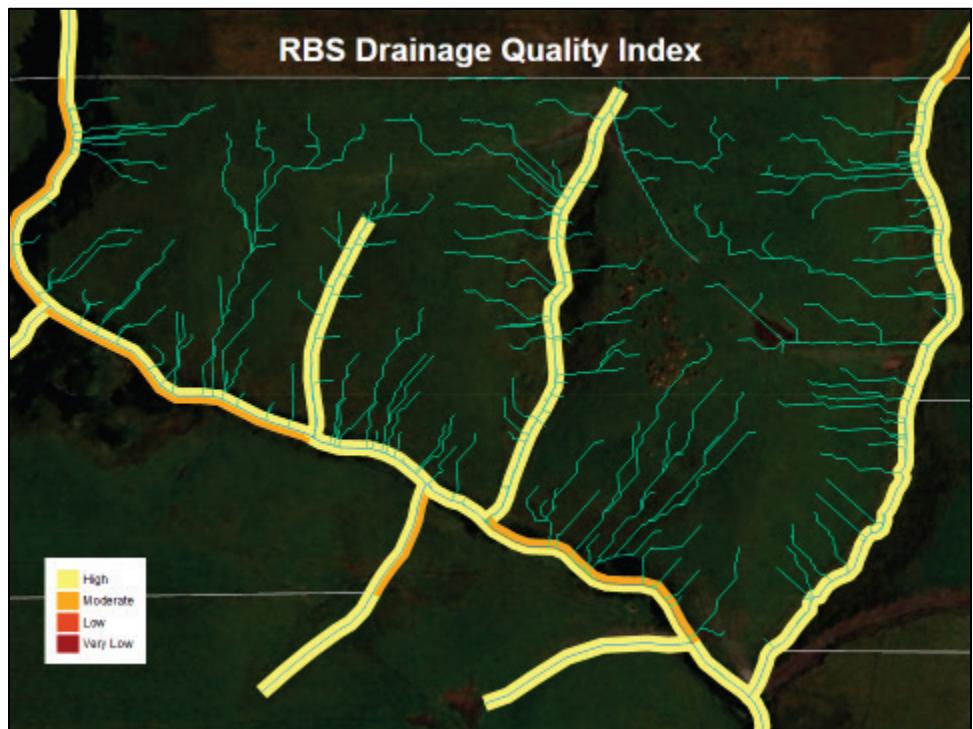
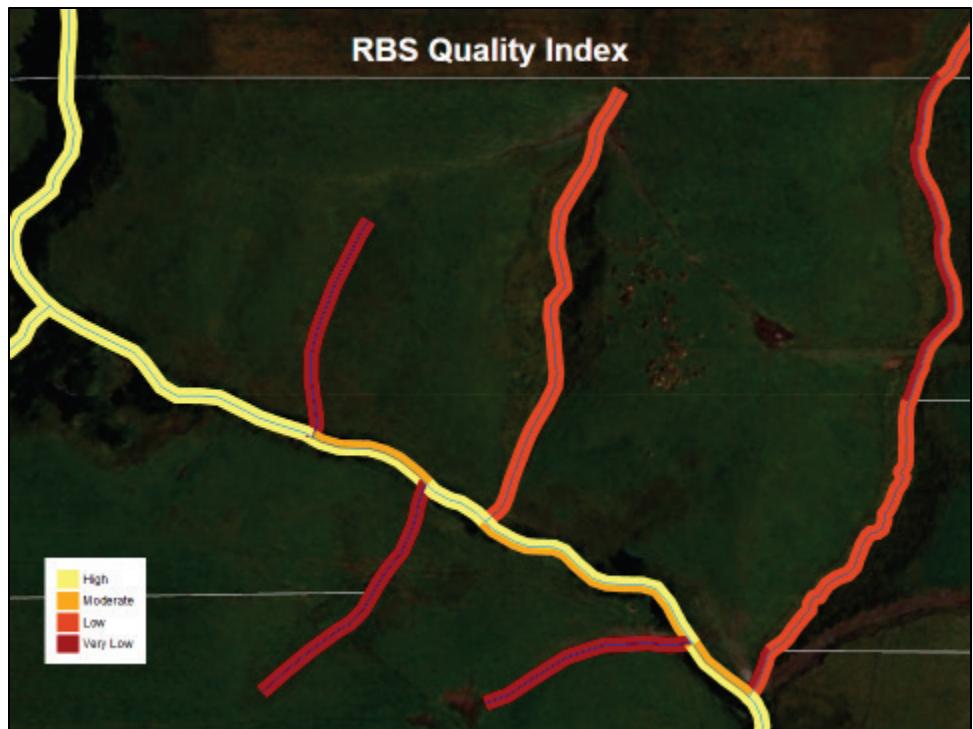
RBS Drainage Quality Index
Agricultural Zone

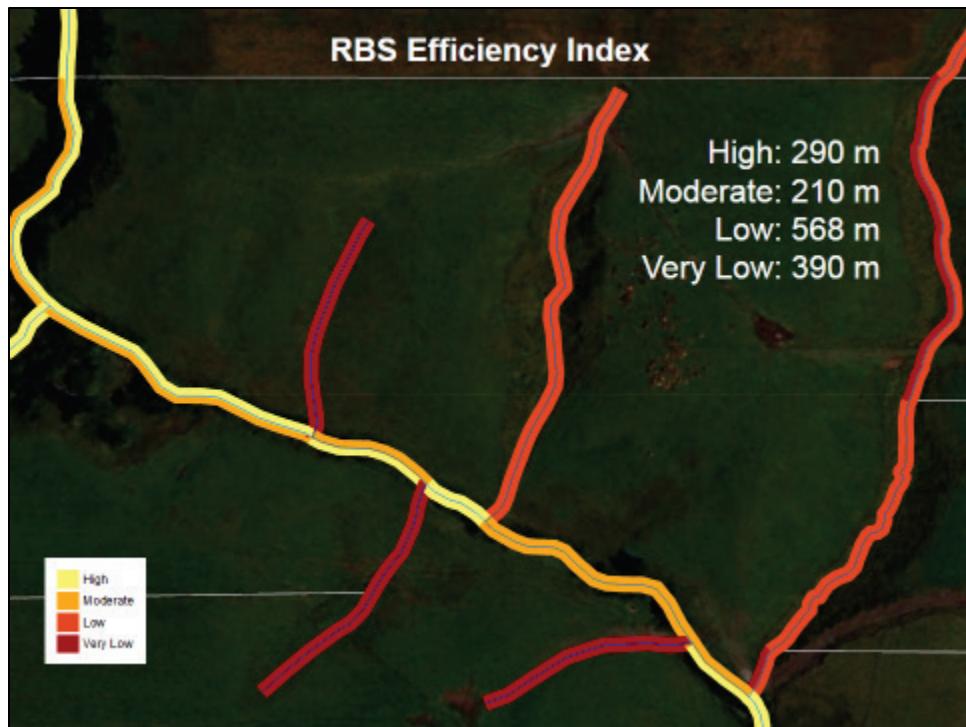
41

RBS Efficiency Index
Agricultural Zone

43







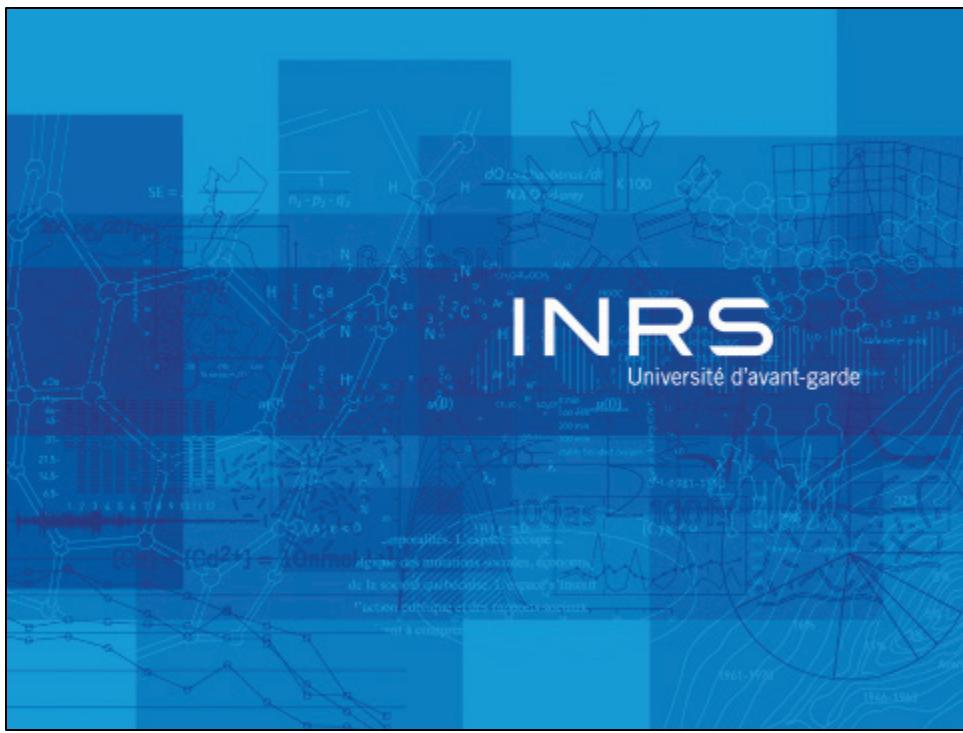
Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avant-garde

Conclusions

- Operational methodology**
 - Land use inventory ($\kappa = 0.82$)
 - RBS Quality Index
 - RBS Efficiency Index
- Management Tool**
 - Analysis/Monitoring
 - Reinforce environmental policies

55



Présentation orale Karem Chokmani. *Modélisation de l'érosion en zones riveraines cultivées à l'aide de la télédétection satellitaire optique à Très Haute Résolution Spatiale.* 15e Congrès de l'Association québécoise de télédétection. Rimouski, QC. 25-27 septembre 2013.



Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avant-garde

Introduction

□ L'érosion hydrique des terres agricoles constitue un problème environnemental et économique majeur

- Sur site: perte de sol fertile qui entraîne un appauvrissement des sols (dont remplacement est très coûteux) → baisse des rendements
- Hors site: les sols détachés et déplacés deviennent une source de polluants (sédiments et nutriment) → affecte négativement les écosystèmes aquatiques
 - dégradation de la qualité de l'eau par eutrophisation
 - dégradation de l'habitat des organismes aquatiques par envasement

15e congrès de l'AQT

3

Introduction

- Les programmes de conservation des sols requièrent la concentration des ressources sur des sites ciblés (action prioritaires)**
- L'érosion est un processus très complexe → rend difficile l'identification à grande échelle des sites d'action prioritaires**
- Les techniques traditionnelles (visites sur le terrain) se présentent comme une solution envisageable:**
 - très exigeantes en termes de ressources matérielles et humaines
 - ne permettent pas de couvrir de grandes superficies
 - sans être précises en raison de la vue partielle du phénomène

Introduction

- Des méthodes axées sur les données géospatiales et les outils géomatiques sont de plus en plus utilisées**
 - l'équation universelle de perte en sol (USLE - Universal Soil Loss Equation, et sa version révisée, le RUSLE) largement utilisée avec les données de haute-moyenne résolution (5-15m)
 - Processus d'érosion ayant cours à l'échelle de la parcelle et à proximité des zones riveraines se situent à une échelle < 1m
- L'avènement de l'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale (THRS) offrent la possibilité de la modélisation de l'érosion à des échelles très fines**

Objectifs

- **Modéliser l'érosion en zones riveraines cultivées à l'aide de la télédétection satellitaire optique à Très Haute Résolution Spatiale (THRS)**
 - Validation des données altimétriques satellites
 - Modèle d'érosion RUSLE-CAN
 - Simuler 2 scénarios de pertes en sol :
 - Situation actuelle
 - Scénario de conservation: bandes riveraines élargie

Méthodologie

- **Modélisation de l'érosion:**
 - le climat
 - le sol
 - la topographie
 - la végétation ou la culture
 - les pratiques d'utilisation des sols.

 Agriculture et
Agri-Food Canada
RUSLE - CAN

Équation universelle révisée des pertes de sol
pour application au Canada

$$A=R \times K \times LS \times C \times P$$

- **A:** pertes de sol annuelles moyennes possibles à long terme (t/ha/année)
-
- **R:** facteur de pluviosité (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)
- **K:** facteur d'érodabilité du sol (t h MJ⁻¹ mm⁻¹)
- **L:** facteur de longueur de la pente (adimensionnel)
- **S:** facteur d'inclinaison de la pente (adimensionnels)
- **C:** facteur de gestion des cultures (adimensionnel)
- **P:** facteur des pratiques de soutien (adimensionnel)

Méthodologie

Site d'étude:

- Le bassin de la rivière la Chevrotière dans la région de Portneuf
- Organisme du bassin versant: CAPSA
- Superficie: 108-km²
- Rivière 29-km long
- Occupation du territoire:
 - Forêt (60%)
 - Agriculture (élevage et grandes cultures) (34%)
 - Urbain (5%)
 - Zones humides, eaux (1%)
- Climat et hydrologie
 - Précipitation annuelle 1132 mm
 - Pluie annuelle 932 mm [1]
 - Ruissellement de surface le plus élevé en Avril: fonte de neige, sols saturés, et avec peu de couverture végétale
→ risque élevé d'érosion



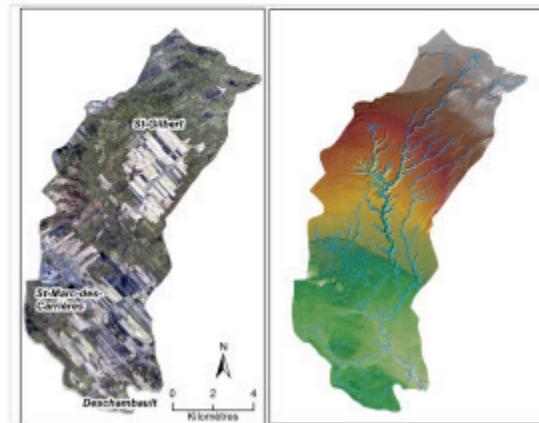
15e congrès de l'AQT

13

Méthodologie

Données

- MNT (1-m) produit par stéréoscopie d'une paire d'images WorldView2 (14 April 2012)
- Images WorldView2 :
 - Multispectrales à 2-m résolution
 - panchromatique à 50-cm résolution.
 - Fusion des images pour produire une image multispectrale à 50-cm
- Sols, cadastre
- Infrastructures



15e congrès de l'AQT

15

Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avenir-garde

Méthodologie

Satellite WorldView-2



Collection Scenarios (30° off-nadir angle)

1 bande panchromatique @ 0.5 m

8 bandes multispectrales @ 2.0 m

LONG STRIP

LARGE AREA COLLECT

10 km

108 km

STEREO AREA COLLECT

10 km

43 km

MULTIPOINT TARGETS

16.4 km

16.4 km

Wavelength (nm)

400 500 600 700 800 900 1000 1100

15e congrès de l'AQT

17

Qualité

Panchromatique Multispectral

WorldView-2 Panchromatique

WorldView-2 Panchromatique Multispectral

Wavelength (nm)

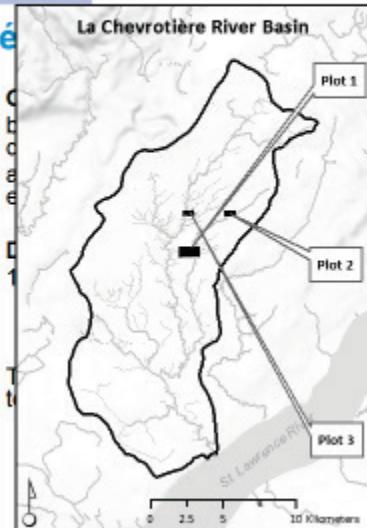
Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avenir-garde

Méthodologie

Géomorphologie et hydrologie

La Chevrotière River Basin



Plot 1

Plot 2

Plot 3

St Lawrence River

Longitude Slope 0.5% Area: 46,425 m²

Longitude Slope 1.2% Area: 15,763 m²

Longitude Slope 5.1% Area: 52,561 m²

Parcille 1

Basin 1

Basin 2

Basin 3

Prof longitudinal

15e congrès de l'AQT

Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avenir-garde

Méthodologie

Modélisation de l'érosion:

Situation actuelle

- Terres agricoles (28 km²)
- RUSLE-CAN
 - MNT-WV2 → LS
 - Classification supervisée de l'image WV2 → C
 - Grille de 0,5m x 0,5 m

15e congrès de l'AQT

21

Centre - Eau Terre Environnement

INRS
Université d'avenir-garde

Méthodologie

Modélisation de l'érosion: Scénario de conservation

- Bandes riveraines élargies (BRE):
 - 10-120 m: couvrir toutes les pentes > 8% jusqu'au replat
 - 5 -10 m: zones plus plates (pente < 8%)
- RUSLE-CAN
 - MNT-WV2 → LS
 - Facteur C
 - BRE: Couvert végétal développé
 - Hors BRE: résultats de classification

Bandes riveraines réglementaires (1-3 m)

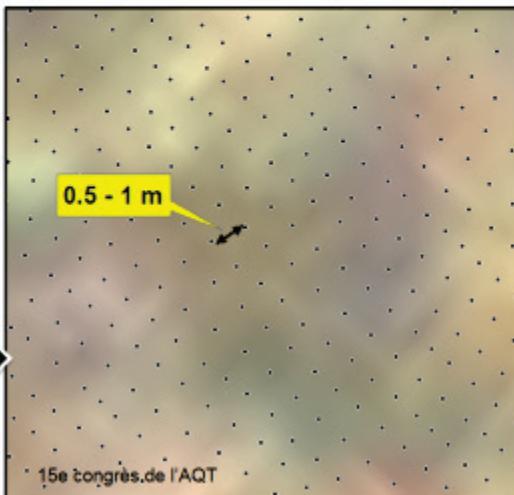
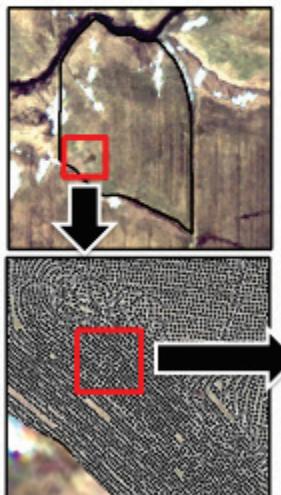
Bandes riveraines élargies (5-120 m)

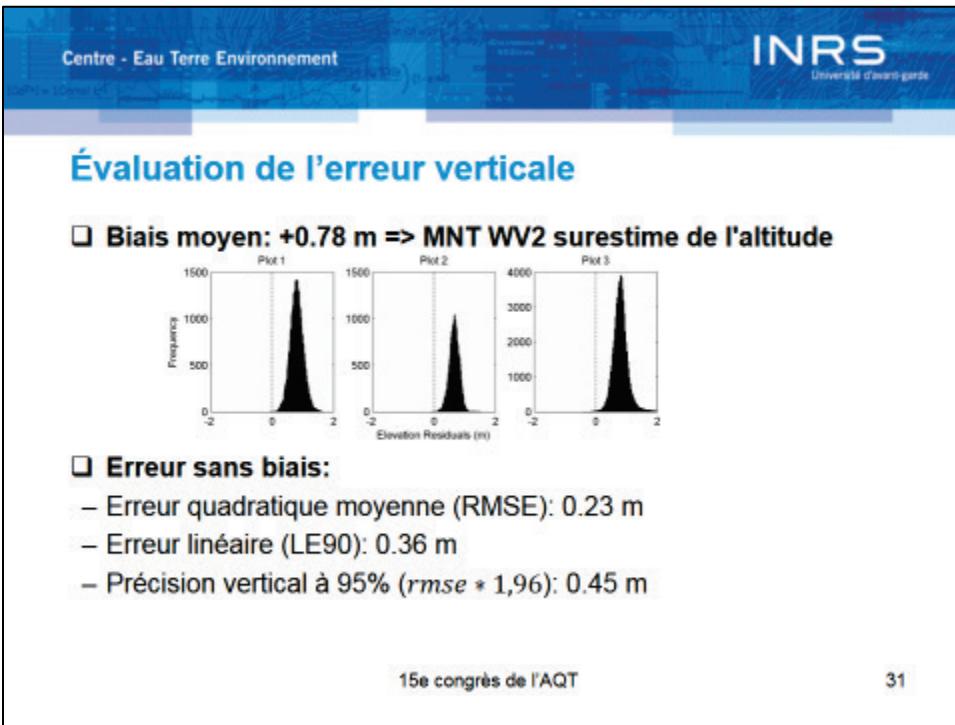
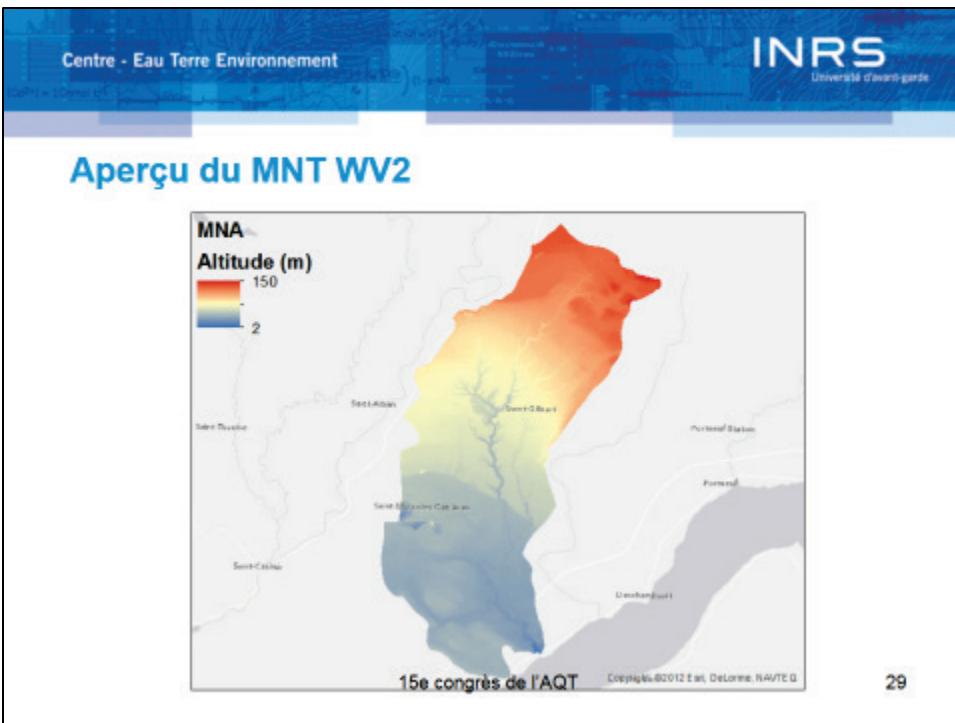
15e congrès de l'AQT

23

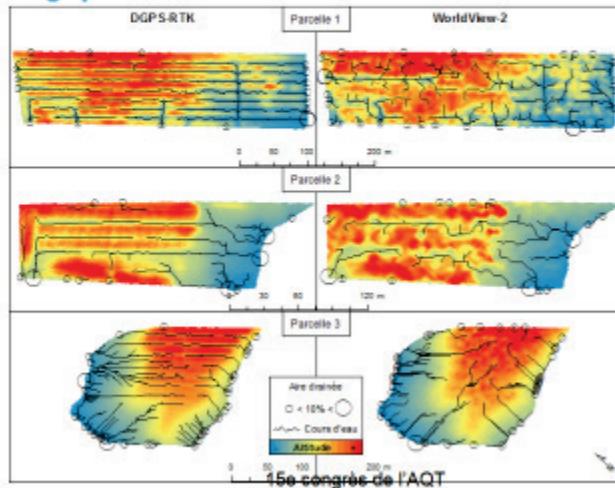
Résultats

Aperçu des données DGPS-RTK





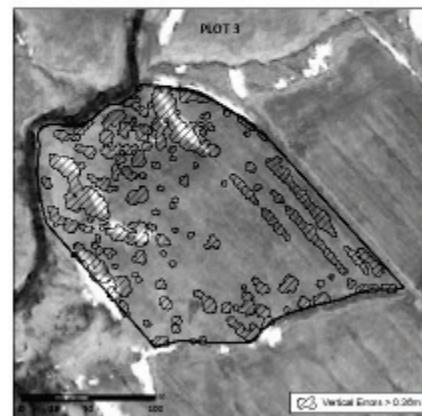
Capacité du MNT WV2 à représenter les processus hydrologiques de surfaces



33

Capacité du MNT WV2 à représenter les processus hydrologiques de surfaces

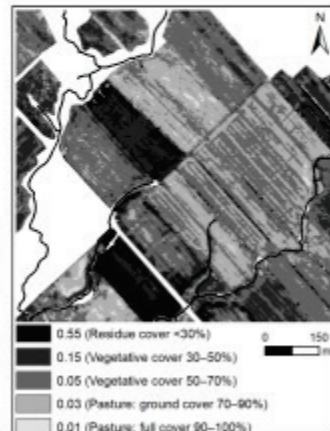
- zones avec des erreurs verticales > à l'erreur linéaire ($LE90 = 0.36 \text{ m}$)
 - Erreur systématique (au niveau spatial)
 - Dépressions du terrain, naturelles ou artificielles (fossés),
 - Neige résiduelle



Classification de l'image WV2 en facteur C

- Classification supervisée**
 - 5 classes selon le pourcentage de couverture végétale
 - Taux de succès globale de 88%
- Conversion des 5 classes en valeurs du facteur C**
 - État du sol d'Avril 2012
 - utilisé comme un reflet du scénario annuel «pire cas»
 - Avril-mai: période de fonte des neiges et des causer le plus haut risque d'érosion

Classe de couverture du sol	Facteur C	Superficie	
		km ²	%
Résidus de culture <30%	0.55	1.4	8%
Couvert végétal 30–50%	0.15	10.1	38%
Couvert végétal 50–70%	0.05	12.1	42%
Couvert végétal 70–90%	0.03	4.8	17%
Couvert végétal (90–100%)	0.01	0.4	1%



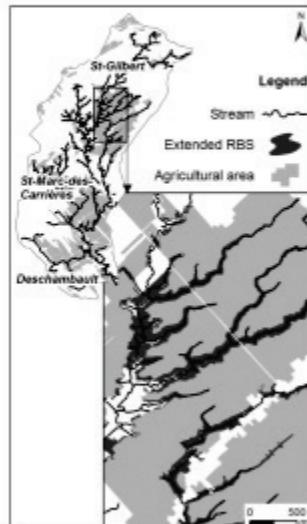
15e congrès de l'AQT

37

Bandes riveraines élargies

- Convertir 1,9 km² des 28,8 km² terres agricoles en zones de conservation**

- Situés dans les zones riveraines
- Un corridor fluvial longue de 117 km
- Représente seulement 7% des terres agricoles



15e congrès de l'AQT

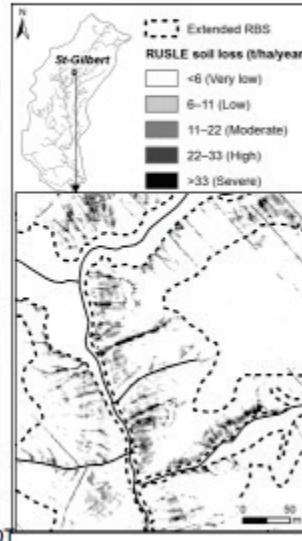
39

Résultats de la RUSLE

- L'érosion très faible prédomine sur les terrains plats.
- Dans les zones correspondant à l'emplacement des BRE, présence plus marquée de l'érosion de faible à sévère
- L'implantation des BRE permettrait de réduire l'érosion dans les zones agricoles de 360 t/an (soit une réduction de 40%)

Classe d'érosion	Conditions actuelles		Scénario de conservation	
	Superficie (km ²)	Pertes en sol (tonnes/ha)	Superficie (km ²)	Pertes en sol (tonnes/ha)
Très faible	27.83	370	28.11	269
Faible	0.48	94	0.36	58
Modérée	0.27	101	0.19	58
Élevée	0.08	54	0.05	30
Sévère	0.14	289	0.09	134
Total	28.8	909	28.8	549

15e congrès de l'AQT



41

Conclusions

- Données satellitaires à THRS constituent une alternative très intéressante pour la modélisation de l'érosion à l'échelle de la parcelle**
 - Source unique de 2 types d'information (spectrale et altimétrique)
 - Permet la réduction des coûts (1,5\$/ha) à comparer avec l'utilisation conjointe de la photo aérienne (1,3\$/ha) et le Lidar (0,75-3\$/ha)
 - Permet une modélisation très fine à proximité des bandes riveraines (source de près de 40% de l'érosion) irréalisable à l'aide des données de télédétection conventionnelle
 - Données altimétriques de qualité variable: Utile dans les zones riveraines où la pente est généralement élevée.
- Données satellitaires à THRS ont permis de tester et valider avec succès du concept de bandes riveraines élargie**

15e congrès de l'AQT

43

Remerciements

Soutien financier (PSIA)

Cultivons l'avenir; une initiative fédérale-provinciale-territoriale



CAPSA : soutien logistique / technique

- Philippe Dufour, Directeur.
- Stéphane Blouin, Technicien



Équipe de recherche:

- Rody Nagel, post doc
- Julio Novoa, candidat MSc
- Anas El Alem, candidat PhD
- Magali Wirtensohn, stagiaire
- Jimmy Poulin, professionnel de recherche

15e congrès de l'AQT

45

INRS

Université d'avant-garde