

ESTIMATION DES CONCENTRATIONS DE SEDIMENTS EN SUSPENSION DANS LES EAUX COTIERES A PARTIR D'IMAGES PLEIADES

Yacine Bouroubi¹, Marc Desrosiers², Thuy Nguyen-Xuan³

1: Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, yacine.bouroubi@usherbrooke.ca

2: Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, Québec, QC, Canada

3: Effigis Géo-solutions, Montréal, QC, Canada

Résumé

Les travaux de dragage peuvent occasionner la remise en suspension de sédiments contaminés dans la colonne d'eau et leur transport vers les sites aquacoles. Effigis, en collaboration avec Travaux publics et Services gouvernementaux Canada et l'Agence spatiale canadienne, a développé une méthodologie de suivi des concentrations de sédiments en suspension (CSS) en mer à partir d'imagerie satellitaire. Un examen de l'état de l'art a permis de passer en revue les méthodes existantes pour l'estimation des CSS, les capteurs qui répondent aux besoins et les protocoles d'échantillonnage terrain permettant de valider l'approche. La méthodologie retenue repose sur l'utilisation d'un modèle empirique pour l'estimation de la CSS à partir des réflectances de l'eau. La constellation Pléiades a été retenue en raison de son potentiel à estimer la CSS, sa capacité à acquérir des images à des dates spécifiques et à mettre en place une application opérationnelle. Les résultats montrent que les corrélations entre les mesures et les estimations de CSS s'approchent des 80%, avec des erreurs RMSE de l'ordre de 25%.

Mots-clés : Concentration des sédiments en suspension dans l'eau, turbidité de l'eau, Pléiades, réflectance de l'eau

Abstract

Dredging may cause the recirculation of contaminated suspended sediments in the water column and lead to their movement to aquaculture sites. Effigis, in collaboration with Public Works and Government Services Canada and the Canadian Space Agency, has developed a methodology for monitoring the concentration of offshore suspended sediment (CSS) using satellite imagery. Reviewing the state of the art allowed identifying existing approaches to estimate CSS, selecting sensors that meet the needs and defining field sampling protocols for validation. The adopted methodology is based on the use of an empirical model that estimates CSS from water reflectance. The Pleiades constellation was selected because of its potential for CSS estimation, its ability for images acquisition at specific dates and its capacity for an operational application. The results show that correlations between CSS measurements and estimates approach 0.8, with an RMSE errors of about 25%.

Keywords: Concentrations of suspended sediment, water turbidity, Pléiades, water reflectance

1. Introduction

Chaque année, de nombreux projets de dragage sont réalisés au Canada. L'un des principaux enjeux occasionnés par cette activité est la remise en suspension de sédiments dans la colonne d'eau et leur transport vers des zones sensibles comme les herbiers ou les sites aquacoles. Le suivi des concentrations de sédiments en suspension (CSS) nécessite des efforts considérables par des méthodes conventionnelles, i.e. les mesures *in situ* par échantillonnage ou l'utilisation de station de turbidimétrie.

Dans le cadre de l'intégration des technologies d'observation de la Terre à ses activités, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, en collaboration avec l'Agence spatiale canadienne, a mandaté Effigis Géo-Solutions (une entreprise Canadienne) pour examiner le développement et la validation d'une méthodologie de suivi des CSS en mer à partir d'imagerie satellitaire. La technologie devait être suffisamment précise pour permettre de suivre l'évolution du panache dans le temps sur une base quotidienne ou hebdomadaire et d'attribuer des valeurs de CSS en mg/l aux observations. Enfin, la technologie devait permettre d'obtenir des résultats (interprétation

des images) dans un délai raisonnable dans le contexte d'un suivi de chantier.

L'étude a été réalisée dans le havre de Gaspé près du quai commercial de Gaspé – Sandy Beach (Québec, Canada) qui a fait l'objet d'importants travaux de restauration des sédiments par dragage en 2015-2016 (figure 1). La présence des rivières York et Dartmouth qui se jettent dans le havre permettait de valider la méthode, notamment en raison des CSS élevés transportées par ces deux tributaires lors de la crue printanière.

2. Méthodologie d'élaboration et de validation du modèle

2.1. Revue de littérature sur l'estimation de la CSS et choix de modèles à tester

La revue de littérature a révélé qu'il existait une bonne corrélation entre la mesure de la CSS dans l'océan et les nappes d'eau intérieure et la réflectance issue des satellites multispectraux (LANDSAT, SPOT et MODIS) corrigée des effets atmosphériques. Cette revue a

également montré que les approches pour quantifier la CSS sont empiriques ou semi-empiriques. Dans ce dernier cas, elles font appel à des modèles de transfert radiatif.

Les approches empiriques visent à établir des relations mathématiques entre les propriétés spectrales des images et la CSS. Elles sont généralement simples d'utilisation (peu de paramètres), mais nécessitent une synchronisation des mesures sur le terrain avec le passage des satellites pour établir les modèles de prédiction. De plus, les données de calibration doivent couvrir l'étendue des valeurs attendues pour le modèle de prédiction et ne sont pas nécessairement transférables à un autre site. Dans le cas des approches semi-empiriques, elles nécessitent une connaissance préalable des propriétés optiques intrinsèques de l'eau du site, mesurées en laboratoire ou par des mesures directes au terrain (par exemple, la taille des particules et leurs paramètres d'absorption et de diffusion). On parle alors de modèles de transfert radiatif qui se basent sur les lois de la physique qui gouvernent l'interaction de la lumière avec la matière. Ceci peut impliquer une certaine complexité au niveau opérationnel. Bien que ces modèles de transfert radiatif puissent être plus facilement transférables d'un site à l'autre, ils dépendent souvent aussi de mesures au terrain si on change de site, car les propriétés optiques de l'eau peuvent varier (Onderka et Rodný, 2010). Acker et al. (2005) ont présenté un aperçu de l'évolution historique des méthodes d'estimation des CSS à partir des images satellitaires, en décrivant l'essentiel des algorithmes publiés entre 1974 à 2005. Les auteurs notent la difficulté d'avoir un algorithme universel opérationnel.

Nechad et al. (2010) ont présenté la formulation détaillée d'un modèle bio-optique pour l'estimation de la CSS en mer par télédétection. Ils ont démontré que la CSS peut être estimée de manière robuste à partir d'une seule bande spectrale, si celle-ci est choisie adéquatement entre le vert et le proche infrarouge. Ils ont trouvé que la réflectance de la bande rouge de plusieurs capteurs (SeaWiFS, MERIS et MODIS) augmente lorsque la CSS augmente.

Volpe et al. (2011) ont estimé la CSS dans la lagune de Venise à l'aide d'un modèle de transfert radiatif simplifié. Ce modèle s'exprime à travers deux équations qui relient la réflectance à la surface de l'eau (obtenue à partir de mesures satellitaires corrigées pour le passage dans l'atmosphère) avec la quantité et le type de matières dans la colonne d'eau. Les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion sont influencés par les sédiments en suspension, les matières dissoutes (organiques ou inorganiques) et le phytoplancton. Compte tenu de la complexité de la mesure d'un bon nombre de ces paramètres, plusieurs hypothèses ont été faites pour simplifier la résolution des équations. On a également utilisé des valeurs de paramètres issus d'autres études. Dans le cas des images satellites utilisées, les réflectances au capteur ont été ramenées aux réflectances à la surface de l'eau par des corrections radiométriques (calcul de la radiance selon le capteur) et atmosphériques (diverses hypothèses ont été faites sur les aérosols et la vapeur d'eau dans l'atmosphère). Les auteurs arrivent à la conclusion que les procédures de validation croisée employées montrent qu'il est possible d'obtenir des estimations

cohérentes de concentration de CSS si suffisamment d'informations de terrain sont disponibles.

Shen et al. (2013) ont aussi utilisé une approche semi-empirique de transfert radiatif simplifié pour examiner les variations saisonnières et annuelles de la CSS dans l'estuaire du Yangtze (Chine). Les auteurs ont utilisé des images multispectrales MERIS (pixel de 250 m) acquises entre 2003 et 2010. Le modèle a été calibré avec 73 échantillons de CSS mesurés au terrain en synchronisation avec le passage du satellite (l'écart pouvant être d'environ 1 heure entre le passage du satellite et la mesure). En se basant sur une équation de transfert radiatif et différentes hypothèses, les auteurs arrivent à une équation simplifiée pour le calcul de la CSS qui dépend de deux constantes, α et β , à déterminer à l'aide des images et des données terrain. De plus, ces constantes varient en fonction des bandes spectrales utilisées et des niveaux de CSS. La validation du modèle avec les données terrain indique un R^2 de 0,82 et une valeur RMSE de 104 mg/l, avec une étendue des données prédites allant de 100 mg/l à 800 mg/l.

Plusieurs études ont porté sur des méthodes empiriques. Notamment, Ekercin (2007) a utilisé une image multispectrale de haute résolution IKONOS acquise en 2005 pour calculer la CSS dans le fleuve Golden Horn à Istanbul, près de l'estuaire. La zone analysée couvre 28 km² et le modèle a été calibré avec des données de huit stations permanentes de mesure de qualité de l'eau et validé avec des données d'une autre station. L'image a été orthorectifiée et a fait l'objet de corrections radiométriques et atmosphériques. L'auteur a aussi utilisé un algorithme de régression multiple pour établir la relation entre la TSS (sédiments en suspension totaux) et les données terrain de la forme : $TSS = A_0 + \sum A_i * R_i$, où R_i la réflectance associée à la bande multispectrale i . Le R^2 obtenu est de 0,97 avec des valeurs estimées de 22 mg/l à 43 mg/l. Les quatre bandes IKONOS (bleu, vert, rouge, proche infrarouge) ont été utilisées dans la régression.

Long et Pavelsky (2013) ont fait une recension de plusieurs articles utilisant des modèles empiriques pour estimer la CSS ou la turbidité en faisant appel à différentes images satellite. Le tableau 1 présente quelques études utilisant des images Landsat TM, SPOT et IKONOS. Les différents modèles proposés utilisent généralement des équations de forme non linéaire et une combinaison de bandes du visible et de l'infrarouge.

Long et Pavelsky (2013) ont aussi analysé la transférabilité de modèles mathématiques d'un site à l'autre pour la mesure de la CSS. Leurs résultats indiquent que le succès d'un tel transfert dépend 1) de l'utilisation d'une bande proche infrarouge en combinaison avec au moins une bande du visible; 2) de la présence de CSS semblables à celles du site où le modèle a été établi; et 3) d'une forme non linéaire du modèle utilisé. Cette évaluation a été réalisée en analysant 31 modèles différents de prédiction de CSS ou de turbidité à partir de 147 mesures de terrain dans 71 sites différents dans le delta de la rivière Peace–Athabasca en Alberta, Canada.

La profondeur de l'eau a un impact important sur les propriétés spectrales de la lumière. Dans le cas de l'eau pure, la pénétration de la lumière est maximale (peut atteindre jusqu'à 20 à 30 m) pour des longueurs

d'onde du visible (entre 400 et 500 nm) tandis que l'absorption domine dans l'infrarouge. La présence de particules en suspension ou de matières organiques dans l'eau augmente la dispersion et l'absorption des courtes longueurs d'onde, ce qui diminue leur pouvoir de pénétration. De façon générale, les études portent sur la mesure de la CSS près de la surface à moins d'un mètre de profondeur. La mesure alors obtenue correspond environ à une moyenne des réflexions des

ondes par les particules en suspension en haut de la colonne d'eau (Onderka et Rodny, 2010). Les études sur la mesure d'éléments plus en profondeur dans la colonne d'eau concernent principalement la détection de la végétation sous-marine. Nous n'avons trouvé aucune étude portant sur la mesure de la CSS plus en profondeur, par exemple des sédiments se trouvant à 3 ou 4 mètres de profondeur suite à un dragage hydraulique.

Étude	Satellite	Bandes spectrales	Équation d'estimer la CSS ou la turbidité (FTU)
Doxaran et al. 2003	LANDSAT TM	R1 : TM2 (vert) R2 : TM4 (proche infrarouge)	$CSS = 29,022 * e^{0,0235 * (\frac{R2}{R1})}$
	SPOT XS3	R1 : vert R2 : proche infrarouge	$CSS = 18,895 * e^{0,0222 * (\frac{R2}{R1})}$
Song et al. 2011	LANDSAT TM	R1 : TM1 (bleu) R2 : TM2 (vert) R3 : TM4 (proche infrarouge)	$FTU = 11,31 * \frac{R3}{R1} - 2,03 * R2 - 16,42$
Hellweger et al. 2007	IKONOS	R : bande rouge	$Turbidity = 0,078 * R - 8,7$

Tableau 1 : Exemples de modèles d'estimation de la CSS (mg/L) et la turbidité (NTU) selon Long et Pavelsky (2013). R représente la réflectance dans les bandes spectrales indiquées

2.2. Choix du capteur

Le choix du capteur est fonction non seulement de son potentiel à estimer la CSS, mais aussi des caractéristiques d'acquisition permettant de développer une méthodologie opérationnelle. Il faut notamment que les satellites aient :

- Une capacité à acquérir des images à des dates précises de façon à être en mesure de synchroniser l'acquisition de l'image avec la prise d'échantillons d'eau pour la validation des modèles;
- Une capacité à acquérir des images avec une résolution spatiale (dimensions du pixel) suffisante pour mesurer des CSS dans la zone potentiellement affectée par le dragage.

Le tableau 2 montre la liste des satellites (commerciaux ou non), en activité au moment de l'étude, munis de capteurs multispectraux qui présentent des résolutions spatiales plus fines ou égales à 30 mètres. En nous appuyant sur la capacité à acquérir des images à des

jours précis pour permettre de synchroniser les relevés de terrain pour la calibration avec l'acquisition des images, la constellation Pléiades (deux satellites) se démarquait avec un potentiel fort, puisqu'elle permettait en plus un mode de programmation 'urgence'.

Les deux satellites en constellation Pléiades 1A et 1B présentaient les capacités d'acquisition les plus favorables pour la mise en place d'une méthodologie opérationnelle. Ces deux satellites opèrent sur la même orbite, à 180° l'un de l'autre. Ils sont parfaitement identiques et fournissent des produits multispectraux avec une capacité de revisite quotidienne avec le mode de programmation instantanée. De plus, la résolution de 2 mètres en multispectral est bien adaptée à l'échelle d'une zone de dragage. Notons aussi que la revue de littérature avait révélé que les bandes les plus propices pour l'identification de la CSS sont une combinaison des bandes du visible et du proche infrarouge, toutes disponibles dans Pléiades.

Satellites avec capteurs multispectraux	Nombre de bandes spectrales	Résolution (m)	Date de lancement	Capacité d'acquisition	Potentiel pour l'estimation des sédiments
GeoEye-1	4	1,7	2009	Passage tous les 1 à 3 jours, acquisition à une date précise non assurée	Moyen
WorldView-2	8	1,8	2009	Passage tous les 1 à 3 jours, acquisition à une date précise non assurée	Moyen
Pléiades 1A-1B	4	2,0	2011	Passage quotidien à une date assurée	Fort
IKONOS-2	4	4,0	1999	Passage tous les 2 à 4 jours, acquisition à une date précise non assurée	Moyen
Kompsat-2	4	4,0	1999	Une fois tous les 28 jours	Faible
SPOT-6	4	6,0	2012	Passage tous les 2 à 4 jours, acquisition à une date précise non assurée	Moyen
Formosat-2	4	8,0	2004	Passage quotidien en Asie, mais limité en Amérique du Nord	Faible
RapidEye	5	5,0	2008	Passage quotidien, acquisition à une date précise non assurée	Faible
SPOT-5	4	10,0	2002	Passage tous les 2 à 4 jours, acquisition à une date précise non assurée	Moyen
Sentinel-2 A et B (MSI)	4 (+2)	10,0	2015 (A) et 2017 (B)	Passage tous les 5 jours	Moyen
LANDSAT-8 (OLI)	7	30,0	2013	Une fois tous les 16 jours	Faible
DEIMOS-1	3	22,0	2009	Passage toutes les semaines, acquisition à une date précise non assurée	Moyen

Tableau 2 : Satellites munis de capteurs multispectraux (30 m et moins) et potentiel pour estimer la CSS.

2.3. Méthodologie de validation

La méthodologie pour la validation repose sur l'acquisition d'images Pléiades 1A et 1B à l'intérieur d'un délai de 24 à 48 heures ainsi que sur l'utilisation d'un modèle empirique. Compte tenu des résultats de la revue de littérature, cette approche semble plus simple à mettre en place que celle basée sur un modèle de transfert radiatif. Les études indiquent également que les R^2 obtenus avec l'approche empirique sont généralement élevés et qu'il est possible de transférer les modèles empiriques sur d'autres sites si certaines conditions sont remplies. La zone d'acquisition d'une superficie de 100 km² est illustrée à la figure 1. La zone en pointillés bleus correspond à la partie de l'image qui servira à la collecte des échantillons d'eau pour la mesure de terrain de la CSS de source naturelle. Les prévisions météorologiques étaient également surveillées afin d'éviter la présence de nuages ou les conditions de vent qui peuvent avoir un effet parasite causé par la formation de vagues à la surface de l'eau.

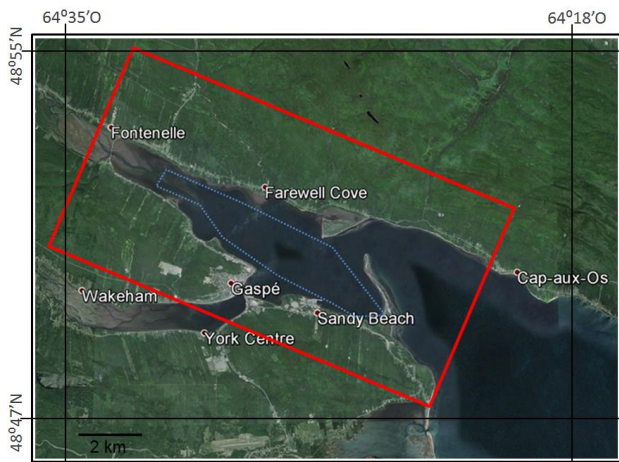


Figure 1 : Localisation géographique de l'étude avec la zone d'acquisition des images Pléiades (en rouge) et de collecte des échantillons d'eau (en bleu)

Des sorties de terrain étaient synchronisées avec les acquisitions des images satellite (environ une heure avant et après) pour la collecte des échantillons d'eau. Dans le cadre de l'estimation des CSS avec l'imagerie satellitaire, la collecte des échantillons se fait généralement près de la surface. On mentionne notamment des collectes à 15 cm (Long et Pavelsky, 2013) et à 30 cm (Froidefond et al., 2004) sous la surface. Une étude mentionne également que les échantillons sont collectés à l'aide d'un contenant de 275 ml (Long et Pavelsky, 2013). Il est également important de synchroniser la collecte le plus possible avec la prise de l'image satellite (Shen et al., 2013).

Dans le cadre de la présente étude, 15 points de collecte étaient répartis dans la zone marine de l'aire d'acquisition pour les trois premières dates d'acquisition Pléiades (8 et 16 juin 2014 et 14 mai 2015) qui visaient la prise d'échantillon d'un litre pour l'analyse des CSS de source naturelle en laboratoire. La quatrième image (4 juillet 2015) a été prise au début des travaux de dragage. Ainsi, sept mesures ont été réalisées à

l'intérieur du rideau de confinement déployé lors des travaux de dragage et cinq à l'extérieur. Les échantillons étaient prélevés (à 25 cm de profondeur) le plus près possible de l'heure d'acquisition de l'image, soit environ une heure avant et après. La localisation exacte de chaque prise d'échantillons a été déterminée à l'aide d'un GPS (Garmin 78S).

Pour la mesure de la CSS au laboratoire, les échantillons sont filtrés (filtre de 1,5 µm) pour recueillir les sédiments. Le filtre utilisé est séché et pesé avant et après la filtration et la CSS est calculée comme la différence entre le poids du filtre avant et après filtration divisée par le volume d'eau recueilli (Méthode MA 115-S.S. 1.2 du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2008).

3. Les images Pléiades utilisées

Les images Pléiades ont été orthorectifiées à partir de points de contrôle précis (1 m) afin de positionner précisément chacun des pixels de l'image et d'assurer une bonne concordance avec la position des échantillons d'eau. Ceci est particulièrement important dans le cadre de projet de dragage en raison de la présence d'infrastructures portuaires. Le calcul de la réflectance de surface est une opération importante qui assure la robustesse du modèle. En effet, les valeurs numériques (images brutes) sont affectées par plusieurs facteurs indépendants de l'information recherchée dont : le gain du capteur, les conditions d'éclairage solaire (date et heure d'acquisition) et d'observation (angles de visée) ainsi que les conditions atmosphériques (épaisseur optique des aérosols AOD et vapeur d'eau). Les corrections radiométriques et atmosphériques ont été réalisées à l'aide du logiciel REFLECT (Bouroubi, 2009) basé sur les routines du code 6S.

Les figures 2 à 5 illustrent les images Pléiades acquises les 8 et 16 juin 2014, le 14 mai 2015 et le 4 juillet 2015, avec une indication des points de mesure *in situ*. La réflectance de l'eau montre une variabilité importante dans les bandes du visible; cette réflectance dépend fortement de la CSS. Cette affirmation est appuyée par le fait que les patrons observés sur les images sont différents de la bathymétrie (figures 2 à 4).

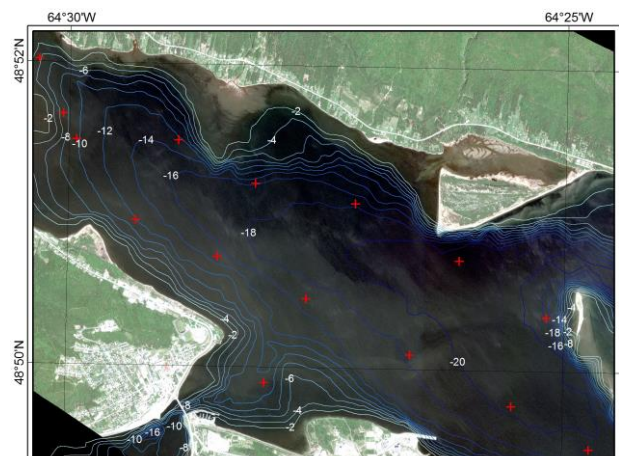


Figure 2 : Image du 08 juin 2014 (vraies couleurs) avec indication des points de mesure *in situ*

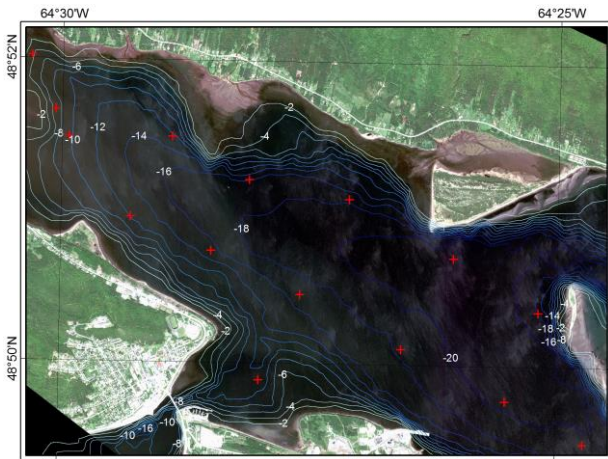


Figure 3 : Image du 16 juin 2014 (vraies couleurs) avec indication des points de mesure *in situ*

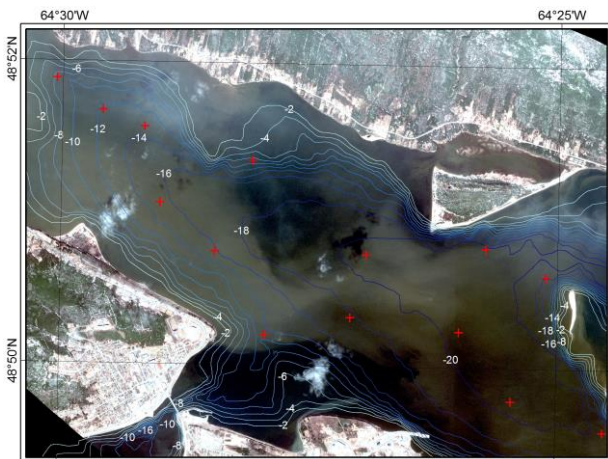


Figure 4 : Image du 14 mai 2015 (vraies couleurs) avec indication des points de mesure *in situ*.



Figure 5 : Image du 04 juillet 2015 (vraies couleurs) et points de mesure *in situ*

4. Calcul des réflectances

Le calcul des réflectances est réalisé à l'aide de trois opérations :

- Calcul des luminances au niveau du satellite L_{sat} à partir des valeurs numériques VN :

$$L_{sat} = VN / Gain + Offset$$

Les valeurs de 'Gain' et 'Offset' sont fournies dans les fichiers auxiliaires de l'image pour les différentes bandes spectrales.

- Calcul des réflectances apparentes :

$$R_{sat} = \pi \cdot L_{sat} / (E_0 \cdot \sin\theta_s)$$

L'éclairement solaire hors atmosphère E_0 et l'élévation solaire θ_s sont calculés à partir de la date et l'heure d'acquisition ainsi que les coordonnées du lieu.

- Calcul des réflectances de surface (corrections atmosphériques) :

$$R_{sol} = (R_{sat} - R_{atm}) / (T_{gaz} * T_{up} * T_{down})$$

Cette étape nécessite la connaissance des paramètres atmosphériques liés à l'absorption gazeuse (T_{gaz}) et à la diffusion des gaz et des aérosols (R_{atm} , T_{up} et T_{down}) dans les trajets descendant et ascendant. Ces paramètres sont calculés à partir d'un code atmosphérique (le 6S) et d'un certain nombre d'intrants (Tableau 3).

Ces traitements sont réalisés automatiquement dans le logiciel REFLECT développé par Bouroubi (2009). REFLECT est basé sur le code 6S pour le calcul des paramètres atmosphériques. Il permet d'estimer l'épaisseur optique des aérosols (AOD, aerosol optical depth) à partir des cibles obscures de type « eau claire et profonde », très abondantes dans la zone d'étude. Pour la transmittance de la vapeur d'eau, le contenu en eau dans l'atmosphère est estimé à partir de l'humidité relative et de la température de l'atmosphère par le modèle de Leckner (Iqbal, 1984).

À titre d'exemple, les paramètres atmosphériques de l'image du 08 juin 2014 sont :

Bande bleue: $R_{atm}=0.07$; $T_{gaz}=0.99$; $T_{down}=0.87$; $T_{up}=0.85$

Bande verte: $R_{atm}=0.05$; $T_{gaz}=0.97$; $T_{down}=0.92$; $T_{up}=0.91$

Bande rouge: $R_{atm}=0.02$; $T_{gaz}=0.95$; $T_{down}=0.96$; $T_{up}=0.95$

Bande PIR: $R_{atm}=0.01$; $T_{gaz}=0.91$; $T_{down}=0.97$; $T_{up}=0.98$

Les travaux de Bouroubi (2009) ont montré que la précision de restitution de la réflectance à la surface par REFLECT est de l'ordre de 0.01.

Date de l'image	Heure GMT (TL+4)	Coordonnées	Atmosphère (10h – 12h)				
			Station météo	T° C	Hr %	Visibilité (km) & AOD	Vent (km/h)
2014-06-08	15:26:03	64d27'26.52"W 48d50'43.64"N	Gaspé A 64°28'47"O 48°46'31"N	21	20	24 & 0.05	13
2014-06-16	15:13:54			18	42	24 & 0.06	21
2015-05-14	15:09:30			20	25	24.1 & 0.06	28
2015-07-04	15:17:57			20	64	24 & 0.07	15 à 23

Tableau 3 : Intrants pour calculer les paramètres utilisés dans les corrections atmosphériques des images Pléiades.

5. Relations des réflectances de surface avec la turbidité et la CSS

La figure 6 montre les relations entre les réflectances issues des images Pléiades et les mesures de turbidité de l'eau et de CSS pour les données des quatre dates agrégées ensemble. Les niveaux de réflectances de l'eau semblent adéquats dans toutes les bandes spectrales. Les réflectances sont plus élevées pour des surfaces d'eau plus turbides et plus riches en sédiments, même si la gamme dynamique de la CSS est relativement faible dans notre cas (la CSS peut dépasser les 100 mg/l). La bande bleue de l'image du 14 mai 2015 semble très affectée par la présence des nuages. La bande PIR de cette image est possiblement affectée par les vaguelettes (la vitesse du vent était élevée selon les données météo d'Environnement Canada). Deux mesures de turbidité s'écartent du nuage de points (bandes verte et rouge) à cette date.

Les réflectances de la bande rouge donnent les meilleures corrélations avec les mesures *in situ*; ce résultat a été rapporté par plusieurs auteurs, tel que mentionné par Long et Pavelsky (2013). Cette observation est importante pour la définition du modèle.

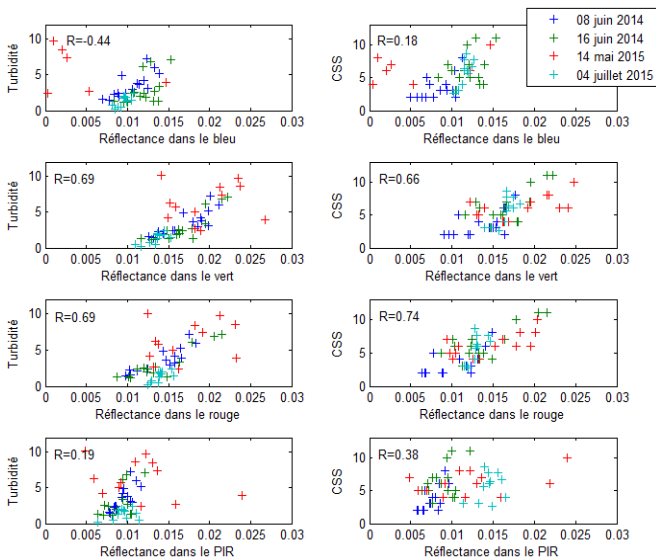


Figure 6 : Corrélations (R) entre les réflectances de surface issues des quatre images Pléiades et les mesures de turbidité de l'eau et de CSS (mg/L)

6. Test de quelques modèles

Tel qu'indiqué dans la revue littérature présentée ci-haut, plusieurs approches ont été proposées afin d'estimer la turbidité de l'eau ou la concentration des matières en suspension à partir des images. Certains de ces modèles ont été répertoriés par Long et Pavelsky (2013). Dans cette section, nous avons testé quelques-uns de ces modèles avec les images Pléiades acquises en 2014. Le modèle retenu a été ajusté par la suite pour l'ensemble des images de 2014 et 2015 (voir section 7). Nous avons utilisé les réflectances de surface afin d'améliorer la robustesse (répétitivité) du modèle en éliminant les erreurs systématiques dues au gain du capteur, l'angle de

visée, la date et l'heure d'acquisition ainsi qu'aux conditions atmosphériques.

6.1. Modèles avec rapports de bandes spectrales

Les modèles basés sur les rapports de bande peuvent être linéaires de type : $a \cdot \exp(b \cdot R_1/R_2)$ (Doxaran et al., 2003 ; Lathrop et al., 1991), ou quadratiques de type $a + b \cdot R_1/R_2 + c \cdot (R_1/R_2)^2$ (Topliss et al., 1990 ; Ritchie & Cooper, 1991). Ces modèles seraient plus sensibles aux variations de la réflectance au dénominateur. Comme ces réflectances sont de très faibles valeurs, les erreurs dues aux corrections atmosphériques peuvent causer des écarts plus élevés au niveau de la sortie du modèle. Ces modèles sont donc moins intéressants pour les besoins de l'étude. De plus, les tests réalisés avec nos données n'ont montré aucun résultat intéressant avec cette approche (Figure 7). Les erreurs RMSE sont de 1.82 (soit 56%) pour la turbidité et de 2.61 mg/l (soit 52%) pour la CSS.

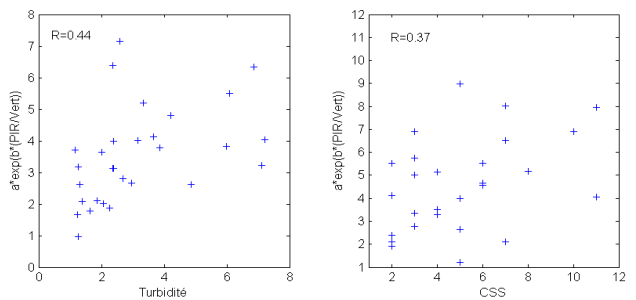


Figure 7 : Test du modèle basé sur le rapport des bandes PIR et verte (Doxaran et al., 2003). Les coefficients des modèles sont : $a=255$ et $b=-8$ pour la turbidité ; $a=320$ et $b=-8$ pour CSS.

6.2. Modèle de régression en fonction de plusieurs réflectances

Ekerin (2007) propose d'utiliser une régression multiple du type : $CSS = A_0 + \sum(A_i \cdot R_i)$, où R_i représente les réflectances d'une image IKONOS dans les bandes bleue, verte, rouge et proche infrarouge. Ce modèle donne de très bonnes corrélations (Figure 8). Les erreurs RMSE sont de 0.7 (soit 18%) pour la turbidité et de 1.32 (soit 25%) pour la CSS. Toutefois, la robustesse de cette approche n'est pas garantie, car l'erreur sur l'output semble affectée par la combinaison des erreurs sur tous les inputs.

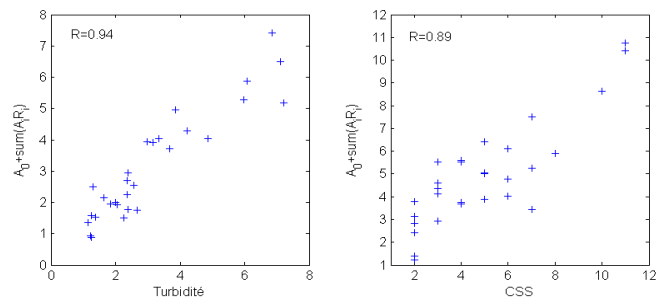


Figure 8 : Test d'un modèle basé sur une régression en fonction des bandes bleue, verte, rouge et PIR. Les modèles sont : $Turbidité = -2.3 - 373 R_{bleu} + 183 R_{vert} + 611 R_{rouge} - 210 R_{PIR}$; $CSS = 3.7 + 424 R_{bleu} - 849 R_{vert} + 1325 R_{rouge} - 771 R_{PIR}$.

6.3. Modèle utilisant une seule bande spectrale

Plusieurs auteurs (Hellweger et al. 2007 ; Wang et al., 2008 ; Chu et al., 2009 ; Dekker et al., 2001 ; Keiner & Yan, 1998) proposent des modèles de type $a + b \cdot R_{\text{Rouge}}$ pour la turbidité et des variantes en exponentielle (ou en logarithme) pour la CSS. Cette approche, en plus d'être simple et peu sensible aux erreurs, donne d'assez bons résultats (Figure 9). L'erreur RMSE est de 0.85 (soit 23%) pour la turbidité et de 1.3 (soit 27%) pour la CSS. Un modèle quadratique ($a + b \cdot R_{\text{Rouge}} + c \cdot R_{\text{Rouge}}^2$) améliore légèrement les corrélations (Figure 10), avec des erreurs RMSE de 0.83 (soit 22%) pour la turbidité et 1.2 mg/l (soit 26%) pour la CSS.

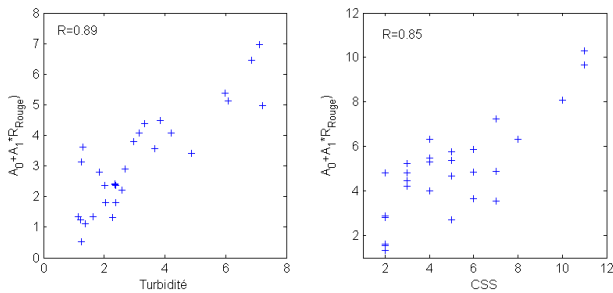


Figure 9 : Test d'un modèle linéaire en fonction de réflectance rouge. Les modèles sont : Turbidité = $-3.87 + 507 R_{\text{Rouge}}$; CSS = $-1.87 + 561 R_{\text{Rouge}}$.

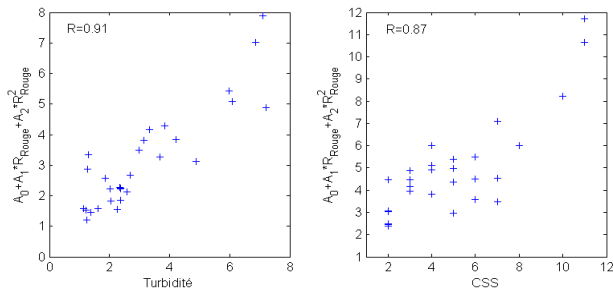


Figure 10 : Test d'un modèle quadratique en fonction de réflectance rouge. Les modèles sont : Turbidité = $-1 - 211 R_{\text{Rouge}} + 24378 R_{\text{Rouge}}^2$; CSS = $3 - 186 R_{\text{Rouge}} + 27914 R_{\text{Rouge}}^2$.

Nous avons testé également la combinaison des bandes spectrales rouge et verte, tel que proposé par Dekker et al. (2001). Cette approche complique le modèle et donne des corrélations plus faibles entre les mesures et les estimations par rapport à l'utilisation de la bande rouge uniquement (Figure 11). Les erreurs RMSE sont également plus élevées (26% pour la turbidité et 30% pour la CSS).

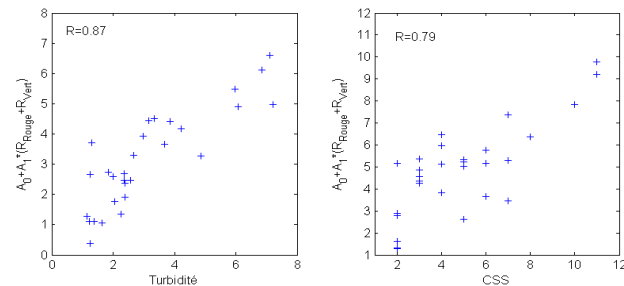


Figure 11 : Test d'un modèle linéaire en fonction de la combinaison des réflectances verte et rouge. Les modèles sont : Turbidité = $-5 + 267 (R_{\text{rouge}} + R_{\text{vert}})$; CSS = $-3 + 288 (R_{\text{rouge}} + R_{\text{vert}})$.

7. Ajustement du modèle retenu avec toutes les images Pléiades acquises

Le modèle retenu est de type $a + b \cdot R_{\text{Rouge}}$. Cette approche, en plus d'être simple et peu sensible aux erreurs, donne d'assez bons résultats. L'intégration des images de 2015 a permis d'ajuster les paramètres du modèle et de montrer sa stabilité en fonction de l'utilisation de deux, trois ou quatre images Pléiades (voir figures 12 et 13 et tableau 4).

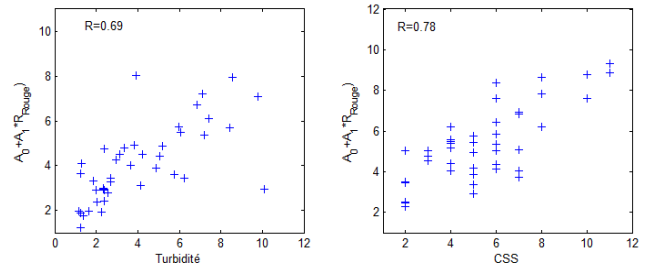


Figure 12 : Modélisation linéaire en fonction de la réflectance rouge des trois premières images (08 et 16 juin 2014 et 14 mai 2015). Les modèles sont : Turbidité = $-2.84 + 476 R_{\text{rouge}}$; CSS = $-0.89 + 465 R_{\text{rouge}}$.

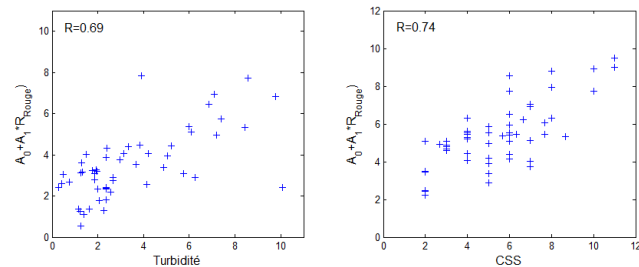


Figure 13 : Modélisation linéaire en fonction de la réflectance rouge des quatre images (08 et 16 juin 2014; 14 mai et 04 juillet 2015). Les modèles sont : Turbidité = $-3.8 + 496 R_{\text{rouge}}$; CSS = $-0.79 + 477 R_{\text{rouge}}$.

Images Pléiades	Modèle de CSS		Qualité du modèle	
	Intercept	Pente	Corrél.	RMSE
08 et 16 juin 2014	-1.87	561	0.85	1.2 mg/l (26%)
08 et 16 juin 2014 et 14 mai 2015	-0.89	465	0.78	1.48 mg/l (27%)
08 et 16 juin 2014; 14 mai et 04 juil. 2015	-0.79	477	0.74	1.46 mg/l (26%)

Tableau 4 : Paramètres du modèle développé et qualité des prévisions de CSS

8. Cartographie de la CSS

Des cartes de CSS estimée ont pu être produites, à partir des images Pléiades disponibles, pour une partie des surfaces aquatiques de la région d'étude. Elles montrent la variabilité spatiale des valeurs de CSS aux quatre dates indiquées (Figures 14 à 17).

La carte montrant les niveaux les plus élevés de sédiments en suspension est celle du 14 mai 2015 (Figure 14). Des concentrations supérieures à 10 mg/l sont surtout observées dans la partie nord-ouest du Havre de Gaspé, à l'embouchure de la rivière Dartmouth. Cette date suit de peu la dernière observation de neige au sol à la station météorologique d'Environnement Canada de Gaspé (28 avril 2015) et

correspond à la période suivant la fonte des neiges dans le bassin versant de cette rivière, et conséquemment, à une charge élevée de sédiments dans cette rivière. La dilution de cette charge de sédiments se fait en fonction des courants et des marées présents dans le Havre de Gaspé. L'image du 14 mai 2015 a été prise lors d'une marée montante et la carte semble indiquer que les eaux chargées de sédiments suivent un courant de surface sortant qui passe par le centre de la baie.

À l'exception des zones de rivages, la carte du 8 juin 2014 est celle qui montre les niveaux de sédiments en suspension les moins élevés (Figure 15). Cette image a été prise plus d'un mois après la dernière observation de neige au sol (2 mai 2014) et suggère que la période de charge élevée de sédiments dans la rivière Dartmouth suite à la fonte des neiges est terminée. Des valeurs de CSS de 5 à 7 mg/l peuvent être observées dans la partie centrale du Havre de Gaspé. Comme pour le cas de l'image du 14 mai 2015, l'image du 8 juin 2014 a été captée à marée haute.

La carte du 16 juin 2016 (Figure 16) montre des niveaux de sédiments en suspension supérieurs à 8 mg/l à l'embouchure de la rivière Dartmouth. Cette résurgence d'une charge importante de sédiments dans cette rivière est probablement associée aux précipitations importantes observées dans la région la journée précédente : 53,5 mm de pluie ont été enregistrés à la station météorologique d'Environnement Canada de Gaspé le 15 juin 2014. L'image du 16 juin 2014 a été captée à marée descendante. Le mélange des eaux chargées de sédiments provenant de la rivière avec celles de la baie semble s'effectuer sur une superficie plus étendue que lorsque la marée est montante (Figures 14 et 15).

Finalement, la carte illustrant les niveaux de sédiments en suspension dans le secteur du quai de Gaspé-Sandy Beach lors des activités de dragage du 4 juillet 2015 (Figure 17) montre des CSS généralement inférieures à 5 mg/l. Elle semble indiquer que les travaux de dragage de cette journée n'ont pas généré des hausses importantes de sédiments en suspension, du moins en surface.

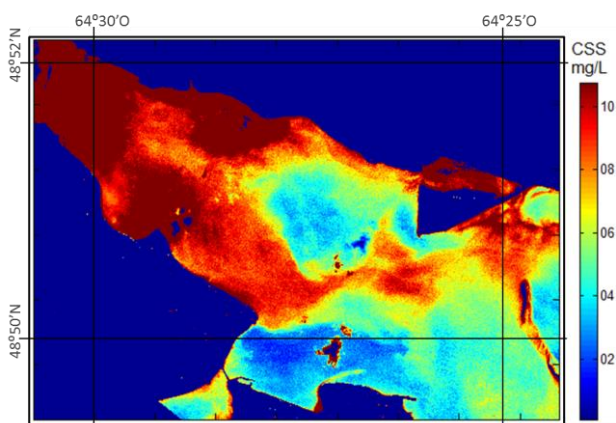


Figure 14 : Concentration des sédiments en suspension (CSS) calculée à partir de la bande rouge de l'image Pléiades du 14 mai 2015

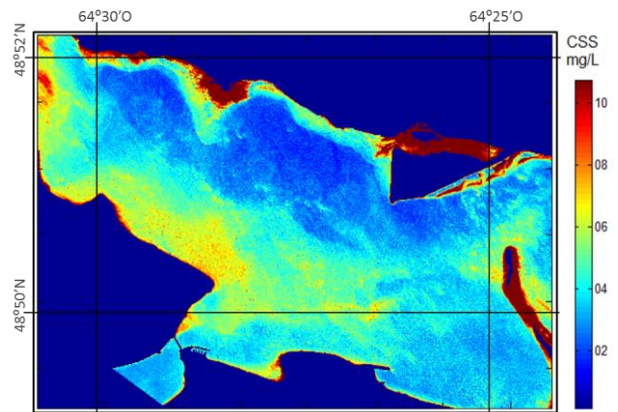


Figure 15 : Concentration des sédiments en suspension (CSS) calculée à partir de la bande rouge de l'image Pléiades du 08 juin 2014

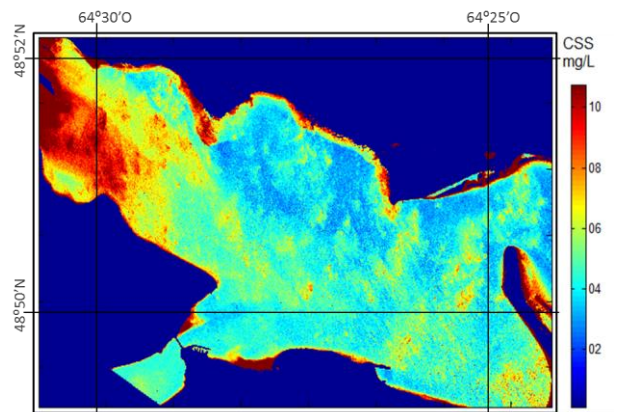


Figure 16 : Concentration des sédiments en suspension (CSS) calculée à partir de la bande rouge de l'image Pléiades du 16 juin 2014

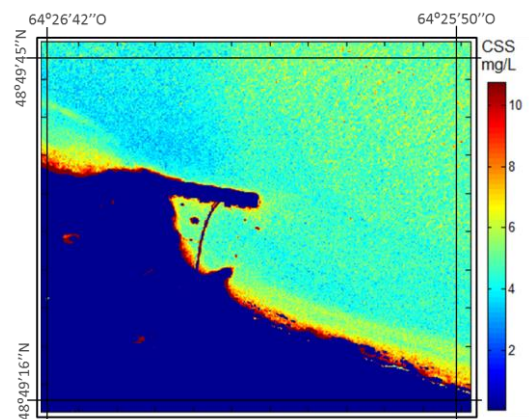


Figure 17 : Concentration des sédiments en suspension (CSS) calculée pour la zone de dragage à partir de la bande rouge de l'image Pléiades du 04 juillet 2015

Notons que les valeurs de CSS sont probablement surestimées dans les zones de faible profondeur d'eau (le long des rivages et à l'embouchure de la rivière Dartmouth). En effet, lorsque le fond est assez haut pour réfléchir une partie de l'éclairage solaire, les réflectances des surfaces d'eau sont plus élevées, entraînant une surestimation de la CSS calculée par le modèle utilisé ici. L'inclusion de la bathymétrie dans la modélisation pourrait servir à réduire cet effet.

9. Conclusion

Nous pouvons conclure que les images Pléiades offrent une bonne source de données (en termes de revisite et de résolution radiométrique, entre autres) permettant de dériver la concentration des sédiments en suspension (CSS). Les corrélations entre les mesures et les estimations obtenues à partir d'une modélisation s'approchent des 80%, avec des erreurs RMSE de l'ordre de 25%, et ce, malgré la faible gamme dynamique de CSS qui variant entre 2 et 11 mg/l dans notre cas. Les images Pléiades constituent potentiellement un outil intéressant pour le suivi des panaches de turbidité pour les projets de dragage ou d'immersion en mer. D'autres capteurs satellites multispectraux ayant des résolutions spatiales et radiométriques suffisantes (WorldView-2 et -3, SPOT-6 et -7, Landsat-8 OLI, etc.) pourraient probablement servir pour les mêmes objectifs, si les images sont acquises aux dates désirées. Concernant les concentrations des CSS observées lors des opérations de dragage (le 4 juillet 2015), les estimations appuyées par les mesures montrent que les concentrations ne sont pas très élevées, notamment en comparaison avec les niveaux de CSS naturelles observés à l'aide des trois premières images.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence spatiale canadienne (M. Guy Aubé) pour leur support financier et WSP Canada inc. (Mélanie Lévesque, Marie Eve Cotton et Jonathan Pouliot de WSP et l'équipage des Moules de Gaspé inc.) pour les travaux d'échantillonnage.

Références

- Acker J., Ouillon, S., Gould R., Arnone R., 2005. Measuring marine suspended sediment concentrations from space: history and potential. 8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, 17–19 May 2005, Halifax, NS, Canada.
- Bouroubi Y., 2009. REFLECT : logiciel de restitution des réflectances au sol pour l'amélioration de la qualité de l'information extraite des images satellitaires à haute résolution. Thèse de doctorat, Université de Montréal (<https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/3264>)
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), 2008. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, Cahier 1- Généralités*. 2^e éd. Gouvernement du Québec. 58 p.
- Chu V.W., Smith L.C., Rennermalm A.K., Forster R.R., Box J.E., Reehy N., 2009. *Sediment plume response to surface melting and supraglacial lake drainages on the Greenland ice sheet*. J. of Glaciology, 55: 1072–1082.
- Dekker A.G., Vos R.J., Peters S.W.M., 2001. *Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes*. Science of the Total Environment, 268(1–3): 197–214.
- Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P., 2003. *Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by Use of reflectance ratios*. Applied Optics, 42(15): 2623–2634.
- Ekercin S., 2007. *Water Quality Retrievals from High Resolution Ikonos Multispectral Imagery: A Case Study in Istanbul, Turkey*. Water Air Soil Pollut, 183:239–251.
- Froidefond J.M., Lahet F., Huc C., Doxaran D., Guiral D., Prost M.T., Ternon J.-F., 2004. *Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana*. Marine Geology 208: 153–168.
- Hellweger F., Miller W., Oshodi K., 2007. *Mapping turbidity in the Charles River, Boston using a high-resolution satellite*. Environmental Monitoring and Assessment, 132(1): 311–320.
- Iqbal, 1984. *Introduction to solar radiation*, Academic Press Inc., U.S.
- Keiner L.E., Yan X.-H., 1998. *A neural network model for estimating Sea surface chlorophyll and sediments from thematic mapper imagery*. Remote Sensing of Environment, 66(2): 153–165.
- Lathrop R.G., Lillesand T.M., Yandell B.S., 1991. *Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters*. International Journal of Remote Sensing, 12(10): 2045–2063.
- Long C.M., Pavelsky T.M., 2013. *Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment*, Remote Sensing of Environment 129: 197–209.
- Nechad B., Ruddick K., Park Y., 2010. *Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters*. Remote Sensing of Environment, 114: 854–866.
- Onderka M., Rodný M., 2010. *Can Suspended Sediment Concentrations be estimated from Multispectral Imagery using only Image-derived Information?* J. Indian Soc. Remote Sens., 38: 85–97.
- Ritchie J.C., Cooper C.M., 1991. *An algorithm for estimating surface suspended sediment concentrations with Landsat MSS digital data*. J. of the American Water Resources Association, 27(3): 373–379.
- Shen F., Zhou Y., Li J., He Q., Verhoef W., 2013. *Remotely sensed variability of the suspended sediment concentration and its response to decreased river discharge in the Yangtze estuary*. Continental Shelf Research, 69: 52–61.
- Song K., Wang Z., Blackwell J., Zhang B., Li F., Zhang Y., 2011. *Water quality monitoring using Landsat Thematic Mapper data with empirical algorithms in Chagan Lake, China*. Journal of Applied Remote Sensing, 5: 053506–053516.
- Topliss B.J., Almos C.L., Hill, P.R., 1990. *Algorithms for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment*. International Journal of Remote Sensing, 11(6): 947–966.
- Volpe V., Silvestri S., Marani M., 2011. *Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters*. Remote Sensing of Environment, 115:44–54.
- Wang F., Zhou B., Xu J., Song L., Wang X., 2008. *Application of neural network and MODIS 250 m imagery for estimating suspended sediments concentration in Hangzhou Bay, China*. Environmental Geology, 56(6): 1093–1101.