

**RETURN BIDS TO:**  
**RETOURNER LES SOUMISSIONS À:**  
**Réception des soumissions - TPSGC / Bid**  
**Receiving - PWGSC**  
**1550, Avenue d'Estimauville**  
**1550, D'Estimauville Avenue**  
**Québec**  
**Québec**  
**G1J 0C7**

**REQUEST FOR PROPOSAL**  
**DEMANDE DE PROPOSITION**

**Proposal To: Public Works and Government  
Services Canada**

We hereby offer to sell to Her Majesty the Queen in right of Canada, in accordance with the terms and conditions set out herein, referred to herein or attached hereto, the goods, services, and construction listed herein and on any attached sheets at the price(s) set out therefor.

**Proposition aux: Travaux Publics et Services  
Gouvernementaux Canada**

Nous offrons par la présente de vendre à Sa Majesté la Reine du chef du Canada, aux conditions énoncées ou incluses par référence dans la présente et aux annexes ci-jointes, les biens, services et construction énumérés ici sur toute feuille ci-annexée, au(x) prix indiqué(s).

**Comments - Commentaires**

<b>Title - Sujet</b> Suiv. mat. en susp. via images sat.	
<b>Solicitation No. - N° de l'invitation</b> EE010-151984/A	<b>Date</b> 2015-02-23
<b>Client Reference No. - N° de référence du client</b> EE010-151984	
<b>GETS Reference No. - N° de référence de SEAG</b> PW-\$QCN-015-16346	
<b>File No. - N° de dossier</b> QCN-4-37315 (015)	<b>CCC No./N° CCC - FMS No./N° VME</b>
<b>Solicitation Closes - L'invitation prend fin</b> <b>at - à 02:00 PM</b> <b>on - le 2015-04-07</b>	
<b>Time Zone</b> <b>Fuseau horaire</b> Heure Avancée de l'Est HAE	
<b>F.O.B. - F.A.B.</b> <b>Plant-Usine:</b> <input type="checkbox"/> <b>Destination:</b> <input type="checkbox"/> <b>Other-Autre:</b> <input type="checkbox"/>	
<b>Address Enquiries to: - Adresser toutes questions à:</b> Legendre, Sylvie	
<b>Buyer Id - Id de l'acheteur</b> qcn015	
<b>Telephone No. - N° de téléphone</b> (418) 649-2860 ( )	<b>FAX No. - N° de FAX</b> (418) 648-2209
<b>Destination - of Goods, Services, and Construction:</b> <b>Destination - des biens, services et construction:</b> TPSGC/PWGSC 1550 AVE D'ESTIMAUVILLE, NEQ CE-SPT-ENVIRONNEMENT COE-PTS-ENVIRONNEMENT QUEBEC Québec G1J0C7 Canada	

**Instructions: See Herein**

**Instructions: Voir aux présentes**

**Vendor/Firm Name and Address**

**Raison sociale et adresse du  
fournisseur/de l'entrepreneur**

<b>Delivery Required - Livraison exigée</b> voir doc	<b>Delivery Offered - Livraison proposée</b>
<b>Vendor/Firm Name and Address</b> <b>Raison sociale et adresse du fournisseur/de l'entrepreneur</b>	
<b>Telephone No. - N° de téléphone</b> <b>Facsimile No. - N° de télécopieur</b>	
<b>Name and title of person authorized to sign on behalf of Vendor/Firm</b> <b>(type or print)</b> <b>Nom et titre de la personne autorisée à signer au nom du fournisseur/ de l'entrepreneur (taper ou écrire en caractères d'imprimerie)</b>	
<b>Signature</b>	<b>Date</b>

**Issuing Office - Bureau de distribution**

TPSGC/PWGSC  
601-1550, Avenue d'Estimauville  
Québec  
Québec  
G1J 0C7

Solicitation No. - N° de l'invitation

EE010-151984/A

Amd. No. - N° de la modif.

Buyer ID - Id de l'acheteur

qcn015

Client Ref. No. - N° de réf. du client

EE010-151984

File No. - N° du dossier

QCN-4-37315

CCC No./N° CCC - FMS No/ N° VME

---

---

## TABLE OF CONTENTS

### PART 1 - GENERAL INFORMATION

1. Statement of Work
2. Summary
3. Debriefings

### PART 2 - BIDDER INSTRUCTIONS

1. Standard Instructions, Clauses and Conditions
2. Submission of Bids
3. Former Public Servant - Competitive - Bid
4. Enquiries - Bid Solicitation
5. Applicable Laws

### PART 3 - BID PREPARATION INSTRUCTIONS

1. Bid Preparation Instructions:

### PART 4 - EVALUATION PROCEDURES AND BASIS OF SELECTION

1. Evaluation Procedures
2. Basis of Selection

### PART 5 - CERTIFICATIONS

1. Certifications Required Precedent to Contract Award

### PART 6 - RESULTING CONTRACT CLAUSES

1. Security Requirement
2. Statement of Work
2. Standard Clauses and Conditions
3. Security Requirement
4. Term of Contract
5. Authorities
6. Proactive Disclosure of Contracts with Former Public Servants
7. Payment
8. Invoicing Instructions
9. Certifications
10. Applicable Laws
11. Priority of Documents
12. Insurance

#### List of Annexes:

- Annex A Statement of Work  
Annex B Basis of Payment  
Annex C References

#### List of Attachments:

- Attachment 1 Mandatory and Point Rated Technical Criteria

## **PART 1 - GENERAL INFORMATION**

### **1.1 Statement of Work**

PWGSC wishes to conduct a large-scale SM monitoring demonstration project at sea using multispectral satellite imagery during an actual dredging project. In 2015, Transport Canada will undertake the sediment remediation directly south of the Gaspé (Sandy Beach) commercial wharf by dredging. One of the anticipated impacts of the restoration project is the resuspension of sediments during the dredging operations and their transport to marine aquaculture sites northwest of Gaspé harbour.

As detailed in Annex A – Statement of Work, the Contractor must:

- perform calibration of multispectral bands from satellite imagery in spring 2015 before the start of the work;
- develop and apply SM prediction model(s);
- monitor SM at sea while dredging work is done in the summer and fall of 2015; and
- map the information and present the results in report form and a Powerpoint presentation.

### **1.2 Debriefings**

Bidders may request a debriefing on the results of the bid solicitation process. Bidders should make the request to the Contracting Authority within 15 working days from receipt of the results of the bid solicitation process. The debriefing may be in writing, by telephone or in person.

### **1.3 Trade Agreements**

The requirement is subject to the North American Free Trade Agreement and the Agreement on Internal Trade.

## **PART 2 - BIDDER INSTRUCTIONS**

### **2.1 Standard Instructions, Clauses and Conditions**

All instructions, clauses and conditions identified in the bid solicitation by number, date and title are set out in the *Standard Acquisition Clauses and Conditions Manual* (<https://buyandsell.gc.ca/policy-and-guidelines/standard-acquisition-clauses-and-conditions-manual>) issued by Public Works and Government Services Canada.

Bidders who submit a bid agree to be bound by the instructions, clauses and conditions of the bid solicitation and accept the clauses and conditions of the resulting contract.

The 2003 (2014-09-26) Standard Instructions - Goods or Services - Competitive Requirements, are incorporated by reference into and form part of the bid solicitation.

### **2.2 Submission of Bids**

Bids must be submitted only to Public Works and Government Services Canada (PWGSC) Bid Receiving Unit by the date, time and place indicated on page 1 of the bid solicitation.

## 2.3 Former Public Servant

Contracts awarded to former public servants (FPS) in receipt of a pension or of a lump sum payment must bear the closest public scrutiny, and reflect fairness in the spending of public funds. In order to comply with Treasury Board policies and directives on contracts awarded to FPS, bidders must provide the information required below before contract award. If the answer to the questions and, as applicable the information required have not been received by the time the evaluation of bids is completed, Canada will inform the Bidder of a time frame within which to provide the information. Failure to comply with Canada's request and meet the requirement within the prescribed time frame will render the bid non-responsive.

### Definitions

For the purposes of this clause, "*former public servant*" is any former member of a department as defined in the Financial Administration Act, R.S., 1985, c. F-11, a former member of the Canadian Armed Forces or a former member of the Royal Canadian Mounted Police. A former public servant may be:

- (i) an individual;
- (ii) an individual who has incorporated;
- (iii) a partnership made of former public servants; or
- (iv) a sole proprietorship or entity where the affected individual has a controlling or major interest in the entity.

*"lump sum payment period"* means the period measured in weeks of salary, for which payment has been made to facilitate the transition to retirement or to other employment as a result of the implementation of various programs to reduce the size of the Public Service. The lump sum payment period does not include the period of severance pay, which is measured in a like manner.

*"pension"* means a pension or annual allowance paid under the Public Service Superannuation Act (PSSA), R.S., 1985, c.P-36, and any increases paid pursuant to the Supplementary Retirement Benefits Act, R.S., 1985, c.S-24 as it affects the PSSA. It does not include pensions payable pursuant to the Canadian Forces Superannuation Act, R.S., 1985, c.C-17, the Defence Services Pension Continuation Act, 1970, c.D-3, the Royal Canadian Mounted Police Pension Continuation Act, 1970, c.R-10, and the Royal Canadian Mounted Police Superannuation Act, R.S., 1985, c.R-11, the Members of Parliament Retiring Allowances Act, R.S., 1985, c.M-5, and that portion of pension payable to the Canada Pension Plan Act, R.S., 1985, c.C-8.

### Former Public Servant in Receipt of a Pension

As per the above definitions, is the Bidder a FPS in receipt of a pension?

Yes ( )

No ( )

If so, the Bidder must provide the following information, for all FPS in receipt of a pension, as applicable:

- (i) name of former public servant;
- (ii) date of termination of employment or retirement from the Public Service.

By providing this information, Bidders agree that the successful Bidder's status, with respect to being a former public servant in receipt of a pension, will be reported on departmental websites as part of the published proactive disclosure reports in accordance with Contracting Policy Notice: 2012-2 and the Guidelines on the Proactive Disclosure of Contracts.

### Work Force Adjustment Directive

Is the Bidder a FPS who received a lump sum payment pursuant to the terms of the Work Force Adjustment Directive?

Yes ( )

No ( )

If so, the Bidder must provide the following information:

- (i) name of former public servant;
- (ii) conditions of the lump sum payment incentive;
- (iii) date of termination of employment;
- (iv) amount of lump sum payment;
- (v) rate of pay on which lump sum payment is based;
- (vi) period of lump sum payment including start date, end date and number of weeks;
- (vii) number and amount (professional fees) of other contracts subject to the restrictions of a work force adjustment program.

For all contracts awarded during the lump sum payment period, the total amount of fees that may be paid to a FPS who received a lump sum payment is \$5,000, including Applicable Taxes

## **2.4 Enquiries - Bid Solicitation**

All enquiries must be submitted in writing to the Contracting Authority no later than seven (7) calendar days before the bid closing date. Enquiries received after that time may not be answered.

Bidders should reference as accurately as possible the numbered item of the bid solicitation to which the enquiry relates. Care should be taken by bidders to explain each question in sufficient detail in order to enable Canada to provide an accurate answer. Technical enquiries that are of a proprietary nature must be clearly marked "proprietary" at each relevant item. Items identified as "proprietary" will be treated as such except where Canada determines that the enquiry is not of a proprietary nature. Canada may edit the question(s) or may request that the Bidder do so, so that the proprietary nature of the question(s) is eliminated, and the enquiry can be answered to all bidders. Enquiries not submitted in a form that can be distributed to all bidders may not be answered by Canada.

## **2.5 Applicable Laws**

Any resulting contract must be interpreted and governed, and the relations between the parties determined, by the laws in force in Québec.

Bidders may, at their discretion, substitute the applicable laws of a Canadian province or territory of their choice without affecting the validity of their bid, by deleting the name of the Canadian province or territory specified and inserting the name of the Canadian province or territory of their choice. If no change is made, it acknowledges that the applicable laws specified are acceptable to the bidders.

## **PART 3 - BID PREPARATION INSTRUCTIONS**

### **3.1 Bid Preparation Instructions**

Canada requests that bidders provide their bid in separately bound sections as follows:

Section I: Technical Bid (3 hard copies)

---

**Section II: Financial Bid ( 1 hard copy)**

**Section III: Certifications (1 hard copy)**

Prices must appear in the financial bid only. No prices must be indicated in any other section of the bid.

Canada requests that bidders follow the format instructions described below in the preparation of their bid:

- (a) use 8.5 x 11 inch (216 mm x 279 mm) paper;
- (b) use a numbering system that corresponds to the bid solicitation.

In April 2006, Canada issued a policy directing federal departments and agencies to take the necessary steps to incorporate environmental considerations into the procurement process Policy on Green Procurement (<http://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/ecologisation-greening/achats-procurement/politique-policy-eng.html>). To assist Canada in reaching its objectives, bidders should:

- 1) use 8.5 x 11 inch (216 mm x 279 mm) paper containing fibre certified as originating from a sustainably-managed forest and containing minimum 30% recycled content; and
- 2) use an environmentally-preferable format including black and white printing instead of colour printing, printing double sided/duplex, using staples or clips instead of cerlox, duotangs or binders.

**Section I: Technical Bid**

In their technical bid, bidders should demonstrate their understanding of the requirements contained in the bid solicitation and explain how they will meet these requirements. Bidders should demonstrate their capability and describe their approach in a thorough, concise and clear manner for carrying out the work.

The technical bid should clearly address and in sufficient depth the points that are subject to the evaluation criteria against which the bid will be evaluated. Simply repeating the statement contained in the bid solicitation is not sufficient. In order to facilitate the evaluation of the bid, Canada requests that bidders address and present topics in the order of the evaluation criteria under the same headings. To avoid duplication, bidders may refer to different sections of their bids by identifying the specific paragraph and page number where the subject topic has already been addressed.

**Section II: Financial Bid**

Bidders must submit their financial bid in accordance with the Basis of Payment at Annex B. Prices must be in Canadian dollars, applicable taxes excluded, FOB destination, Canadian customs duties and excise taxes included.

**3.1.1 Exchange Rate Fluctuation**

C3011T (2013-11-06), Exchange Rate Fluctuation

**Section III: Certifications**

Bidders must submit the certifications required under Part 5.

---

## PART 4 - EVALUATION PROCEDURES AND BASIS OF SELECTION

### 4.1 Evaluation Procedures

- (a) Bids will be assessed in accordance with the entire requirement of the bid solicitation including the technical and financial evaluation criteria.
- (b) An evaluation team composed of representatives of Canada will evaluate the bids.

#### 4.1.1 Technical Evaluation

##### 4.1.1.1 Mandatory Technical Criteria

Each Bid will be reviewed to determine compliance with the mandatory requirements of the request for proposal. All elements of the request for proposal that are mandatory requirements are precisely designated by the terms "must" or "mandatory". Bids that do not respect all mandatory requirements will be declared non responsive and rejected. The mandatory requirements are described in **Attachment 1**, Mandatory and Point Rated Technical Criteria.

##### 4.1.1.2 Point Rated Technical Criteria

Each Bid will be rated by assigning a score to the rated criteria, which are described in **attachment 1**, Point Rated Technical Criteria. Any bid that is not complete and does not contain all the information required on the Request for proposal will be scored accordingly.

#### 4.1.2 Financial Evaluation

Bidders must submit their financial bid in accordance with the Basis of Payment at Annex B. Prices must be in Canadian dollars, applicable taxes excluded, FOB destination, Canadian customs duties and excise taxes included.

### 4.2 Basis of Selection

#### 4.2.1 Basis of Selection - Highest Combined Rating of Technical Merit and Price

1. To be declared responsive, a bid must:
  - (a) Comply with all the requirements of the bid solicitation;
  - (b) Meet all mandatory criteria;
  - (c) Obtain the required minimum points for each criterion and each group of criteria with a pass mark;
  - (d) Obtain the required minimum of points overall for the technical evaluation criteria which are subject to point rating.
2. Bids not meeting (a) or (b) or (c) or (d) will be declared non-responsive.
3. The selection will be based on the highest responsive combined rating of technical merit and price. The ratio will be 70 % for the technical merit and 30 % for the evaluated price.



4. To establish the technical merit score, the overall technical score for each responsive bid will be determined as follows: total number of points obtained / maximum number of points available multiplied by 70.
5. To establish the pricing score, each responsive bid will be prorated against the lowest evaluated price and the ratio of 30%.
6. For each responsive bid, the technical merit score and the pricing score will be added to determine its combined rating.
7. Neither the responsive bid obtaining the highest technical score nor the one with the lowest evaluated price will necessarily be accepted. The responsive bid with the highest combined rating of technical merit and price will be recommended for award of a contract.

The table below illustrates an example where all three bids are responsive and the selection of the contractor is determined by a 70/30 ratio of technical merit and price, respectively. The total available points equal 100 and the lowest evaluated price is \$175,000.00.

**Basis of Selection - Highest Combined Rating Technical Merit (70%) and Price (30%)**

	<b>Bidder</b>		
	<b>Bidder 1</b>	<b>Bidder 2</b>	<b>Bidder 3</b>
<b>Overall Technical Score</b>	80/100	65/100	85/100
<b>Bid Evaluation Value (Attachment 3 –Bid Evaluation Value)</b>	\$200,00.00	\$175,000.00	\$185,000.00
	<b>Calculations</b>		
<b>Technical Merit Score</b>	$80/100 \times 70 = 56$	$65/100 \times 70 = 45.5$	$85/100 \times 70 = 59.5$
<b>Pricing Score</b>	$175000/200000 \times 30 = 26.25$	$175000/175000 \times 30 = 30$	$175000/185000 \times 30 = 28.38$
<b>Combined Rating</b>	86	75.5	87.88
<b>Overall Rating</b>	<b>2nd</b>	<b>3rd</b>	<b>1<sup>st</sup> (Winner)</b>

---

## PART 5 - CERTIFICATIONS

Bidders must provide the required certifications and associated information to be awarded a contract.

The certifications provided by bidders to Canada are subject to verification by Canada at all times. Canada will declare a bid non-responsive, or will declare a contractor in default in carrying out any of its obligations under the Contract, if any certification made by the Bidder is found to be untrue whether made knowingly or unknowingly, during the bid evaluation period or during the contract period.

The Contracting Authority will have the right to ask for additional information to verify the Bidder's certifications. Failure to comply and to cooperate with any request or requirement imposed by the Contracting Authority may render the bid non-responsive or constitute a default under the Contract.

### 5.1 Certifications Precedent to Contract Award

The certifications listed below should be completed and submitted with the bid, but may be submitted afterwards. If any of these required certifications is not completed and submitted as requested, the Contracting Authority will inform the Bidder of a time frame within which to provide the information. Failure to comply with the request of the Contracting Authority and to provide the certifications within the time frame provided will render the bid non-responsive.

#### 5.1.1 Integrity Provisions - Associated Information

By submitting a bid, the Bidder certifies that the Bidder and its Affiliates are in compliance with the provisions as stated in Section 01 Integrity Provisions - Bid of Standard Instructions 2003. The associated information required within the Integrity Provisions will assist Canada in confirming that the certifications are true.

#### 5.1.2 Federal Contractors Program for Employment Equity - Bid Certification

By submitting a bid, the Bidder certifies that the Bidder, and any of the Bidder's members if the Bidder is a Joint Venture, is not named on the Federal Contractors Program (FCP) for employment equity "FCP Limited Eligibility to Bid" list ([http://www.labour.gc.ca/eng/standards\\_equity/eq/emp/fcp/list/inelig.shtml](http://www.labour.gc.ca/eng/standards_equity/eq/emp/fcp/list/inelig.shtml)) available from Employment and Social Development Canada (ESDC) - Labour's website.

Canada will have the right to declare a bid non-responsive if the Bidder, or any member of the Bidder if the Bidder is a Joint Venture, appears on the "FCP Limited Eligibility to Bid" list at the time of contract award.

N° de l'invitation - Solicitation No.  
EE010-151984/A  
N° de réf. du client - Client Ref. No.  
EE010-151984

N° de la modif - Amd. No.  
File No. - N° du dossier  
QCN-4-37315

Id de l'acheteur - Buyer ID  
QCN015  
N° CCC / CCC No. / N° VME - FMS

---

## PART 6 - RESULTING CONTRACT CLAUSES

The following clauses and conditions apply to and form part of any contract resulting from the bid solicitation.

### 6.1 Security Requirements

6.1.1 There is no security requirement applicable to this Contract.

### 6.2 Statement of Work

The Contractor must perform the Work in accordance with the Statement of Work at Annex A and the Contractor's technical bid entitled \_\_\_\_\_, dated \_\_\_\_\_.

### 6.3 Standard Clauses and Conditions

All clauses and conditions identified in the Contract by number, date and title are set out in the *Standard Acquisition Clauses and Conditions Manual* (<https://buyandsell.gc.ca/policy-and-guidelines/standard-acquisition-clauses-and-conditions-manual>) issued by Public Works and Government Services Canada.

#### 6.3.1 General Conditions

2010B (2014-09-25), General Conditions - Professional Services (Medium Complexity) apply to and form part of the Contract.

### 6.4 Term of Contract

#### 6.4.1 Period of the Contract

The period of the Contract is from date of Contract to March 31, 2016 inclusive.

### 6.5 Authorities

#### 6.5.1 Contracting Authority

The Contracting Authority for the Contract is:

Sylvie Legendre  
Public Works and Government Services Canada  
601-1550 D'Estimauville  
Québec, QC.  
G1J 0C7

Telephone: 418-649-2860  
Facsimile: 418-648-2209  
E-mail address: [sylvie.legendre@tpsgc-pwgsc.gc.ca](mailto:sylvie.legendre@tpsgc-pwgsc.gc.ca)

The Contracting Authority is responsible for the management of the Contract and any changes to the Contract must be authorized in writing by the Contracting Authority. The Contractor must not perform work in excess of or outside the scope of the Contract based on verbal or written requests or instructions from anybody other than the Contracting Authority.

N° de l'invitation - Solicitation No.  
EE010-151984/A  
N° de réf. du client - Client Ref. No.  
EE010-151984

N° de la modif - Amd. No.  
File No. - N° du dossier  
QCN-4-37315

Id de l'acheteur - Buyer ID  
QCN015  
N° CCC / CCC No./ N° VME - FMS

---

### 6.5.2 Project Authority

The Project Authority for the Contract is:

Name: \_\_\_\_\_  
Title: \_\_\_\_\_  
Organization: \_\_\_\_\_  
Address: \_\_\_\_\_  
  
Telephone : \_\_\_\_\_  
Facsimile: \_\_\_\_\_  
E-mail address: \_\_\_\_\_

The Project Authority is the representative of the department or agency for whom the Work is being carried out under the Contract and is responsible for all matters concerning the technical content of the Work under the Contract. Technical matters may be discussed with the Project Authority, however the Project Authority has no authority to authorize changes to the scope of the Work. Changes to the scope of the Work can only be made through a contract amendment issued by the Contracting Authority.

### 6.5.3 Contractor's Representative

Name: \_\_\_\_\_  
Telephone : \_\_\_\_\_  
Facsimile: \_\_\_\_\_  
E-mail address: \_\_\_\_\_

## 6.6 Proactive Disclosure of Contracts with Former Public Servants

SACC Manual Clause A3025C (2013-03-21)

## 6.7 Payment

### 6.7.1 Basis of Payment

#### 6.7.1.1 For the calibration of images and for monitoring dredging work, as detailed in Annex A :

In consideration of the Contractor satisfactorily completing all of its obligations under the Contract, the Contractor will be paid the firm prices, as specified in Annex B. Customs duties are included and Applicable Taxes are extra.

Canada will not pay the Contractor for any design changes, modifications or interpretations of the Work, unless they have been approved, in writing, by the Contracting Authority before their incorporation into the Work.

#### 6.7.1.2 For additional images:

##### 6.7.1.2.1 In consideration of the Contractor satisfactorily completing all of its obligations under the Contract, the Contractor will be paid the firm prices, as specified in Annex B. Customs duties are included and Applicable Taxes are extra.

Canada will not pay the Contractor for any design changes, modifications or interpretations of the Work, unless they have been approved, in writing, by the Contracting Authority before their incorporation into the Work.

#### 6.7.2 Limitation of Expenditure for additional images

1. Canada's total liability to the Contractor for the acquisition of additional images must not exceed \$ \_\_\_\_\_ **(amount to be inserted at contract award)** . Customs duties are included and Applicable Taxes are extra.
2. No increase in the total liability of Canada or in the price of the Work resulting from any design changes, modifications or interpretations of the Work, will be authorized or paid to the Contractor unless these design changes, modifications or interpretations have been approved, in writing, by the Contracting Authority before their incorporation into the Work. The Contractor must not perform any work or provide any service that would result in Canada's total liability being exceeded before obtaining the written approval of the Contracting Authority. The Contractor must notify the Contracting Authority in writing as to the adequacy of this sum:
  - (a) when it is 75 percent committed, or
  - (b) four (4) months before the Contract expiry date, or
  - (c) as soon as the Contractor considers that the contract funds provided are inadequate for the completion of the Work,whichever comes first.
3. If the notification is for inadequate contract funds, the Contractor must provide to the Contracting Authority a written estimate for the additional funds required. Provision of such information by the Contractor does not increase Canada's liability.

#### 6.7.3 Method of Payment

The schedule of milestones for which payments will be made in accordance with the Contract is as follows:

Milestones	Description or Deliverable	Percentage of Firm Price	Due Date or Delivery Date
No. 1	Deliverables 1 and 2: Start-up and work planning meetings and preliminary progress report and preliminary work meeting, as set out in Appendix "A" – Statement of Work sections 2.1 and 2.2.  Four (4) raw panchromatic and multispectral images as well as the orthorectified images	50% of the firm price as set out in Article 1 of Appendix B – Basis of Payment	By June 25, 2015
No. 2	Deliverable 3: Final progress report, as set out in Appendix "A" – Statement of Work section 2.3.	50% of the firm price as set out in Article 1 of Appendix B – Basis of Payment	10 days following the date that comments by the PWGSC project lead on the preliminary version

			were sent or by July 15
No. 3	Deliverable 4: Ten (10) first technical reports after each satellite image acquisition as set out in Appendix "A" – Statement of Work section 2.4.  Twelve (12) raw panchromatic and multispectral images as well as the orthorectified images	30% of the firm price as set out in Article 2 of Appendix B – Basis of Payment	8 weeks following the planned start of dredging work in July 2015.
No. 4	Deliverable 5: Preliminary report as set out in Appendix "A" – Statement of Work section 2.5.  Additional panchromatic and multispectral images as well as the orthorectified images	30% of the firm price as set out in Article 2 of Appendix B – Basis of Payment	15 days following the completion of dredging work or October 30, 2015.
No. 5	Deliverable 6: Final report as set out in Appendix "A" – Statement of Work section 2.6.	40% of the firm price as set out in Article 2 of Appendix B – Basis of Payment	10 days following the date that comments by the PWGSC project lead on the preliminary version were sent or by December 31, 2015

## 6.8 Invoicing Instructions

1. The Contractor must submit invoices in accordance with the section entitled "Invoice Submission" of the general conditions. Invoices cannot be submitted until all work identified in the invoice is completed.
2. Invoices must be distributed as follows:
  - (a) The original and one (1) copy must be forwarded to the address shown on page 1 of the Contract for certification and payment.

## 6.9 Certifications

### 6.9.1 Compliance

The continuous compliance with the certifications provided by the Contractor in its bid and the ongoing cooperation in providing associated information are conditions of the Contract. Certifications are subject to verification by Canada during the entire period of the Contract. If the Contractor does not comply with any certification, fails to provide the associated information, or if it is determined that any certification made by the Contractor in its bid is untrue, whether made knowingly or unknowingly, Canada has the right, pursuant to the default provision of the Contract, to terminate the Contract for default.

N° de l'invitation - Solicitation No.  
EE010-151984/A  
N° de réf. du client - Client Ref. No.  
EE010-151984

N° de la modif - Amd. No.  
File No. - N° du dossier  
QCN-4-37315

Id de l'acheteur - Buyer ID  
QCN015  
N° CCC / CCC No./ N° VME - FMS

---

#### **6.10 Applicable Laws**

The Contract must be interpreted and governed, and the relations between the parties determined, by the laws in force in \_\_\_\_\_. (will be inserted at contract award)

#### **6.11 Priority of Documents**

If there is a discrepancy between the wording of any documents that appear on the list, the wording of the document that first appears on the list has priority over the wording of any document that subsequently appears on the list.

- (a) the Articles of Agreement;
- (b) the general conditions 2010B (2014-09-25), Professional Services (Medium Complexity)
- (c) Annex A, Statement of Work;
- (d) Annex B, Basis of Payment;
- (e) the Contractor's bid dated \_\_\_\_\_ .

#### **6.12 Insurances**

SACC Manual Clause G1005C (2008-05-12), Insurances

## ANNEX "A"

### STATEMENT OF WORK

Over the past few years, Public Works and Government Services Canada (PWGSC) and the Canadian Space Agency have worked together to develop Earth observation (EO) technology applications for the PWGSC's activities. This work has demonstrated strong potential in the monitoring of plumes of suspended matter (SM) at sea in projects involving dredging.

A study conducted recently by Effigis Geosolutions (2014a) has confirmed that there are several commercial satellites equipped with multispectral sensors that make it possible to estimate SM at sea. Last spring, a validation test performed using Pleiades imagery and calibration field measurements was able to confirm the potential of using spectral bands of satellite images to measure SM at sea (Effigis Geosolutions, 2014b and WSP, 2014).

PWGSC wishes to conduct a large-scale SM monitoring demonstration project at sea using multispectral satellite imagery during an actual dredging project. In 2015, Transport Canada will undertake the sediment remediation directly south of the Gaspé (Sandy Beach) commercial wharf by dredging. One of the anticipated impacts of the restoration project is the resuspension of sediments during the dredging operations and their transport to marine aquaculture sites northwest of Gaspé harbour.

Specifically, the Project is to:

- perform calibration of multispectral bands from satellite imagery in spring 2015 before the start of the work;
- develop and apply SM prediction model(s);
- monitor SM at sea while dredging work is done in the summer and fall of 2015; and
- map the information and present the results in report form and a Powerpoint presentation.

#### 1. Detailed Methodology

The Contractor will be required to monitor SM at sea during dredging work in summer and fall 2015 using a minimum of three (3) different satellite sensors, including LANDSAT-8. The results must determine whether the satellite imagery of different sensors with different resolutions can be useful to track the SM at sea during dredging.

With the exception of the LANDSAT-8 sensor, two (2) other multispectral satellite sensors used must, have the following characteristics of Table 1. Figure 1 shows the study area, which is an approximate area of 100 km<sup>2</sup>. The satellites must be capable of capturing an entire daytime image of the study site in a single pass.

Multispectral satellite sensors	Minimum number of spectral bands	Resolution	Acquisition capacity
1-LANDSAT-8	4	± 30 m	Every 16 Day
2-to be determined	4	< 4 m	A minimum of two (2)



by the Contractor			times a week at a specific time $\pm$ 15 min.
3- to be determined by the Contractor	4	Between 4 et 10 m	A least once a week

**Table 1 : Characteristics of Multispectral satellite sensors to respect**

### 1.1 Calibration of multispectral bands

In spring 2015, the Contractor will be required to perform the calibration of multispectral bands from satellite images from the field data collected by PWGSC. The blue dotted area in Figure 1 corresponds to the location where water samples must be collected for SM field measurements. Four (4) acquisition dates, the first between ice-out and no later than 10 days before the start of the work scheduled for July 1, 2015, are scheduled to calibrate the model(s) used to estimate SM. The Contractor shall normally provide at least one single calibration image per sensor. The Contractor can use a fourth image to improve the calibration of the sensor 2 or 3, according to the results of the first acquisitions.

Ideally the calibration period should take place during the spring freshet, which is usually in May. These dates must be synchronized with the data collected on PWGSC's SM site. The Contractor will be responsible for notifying PWGSC at least 24 hours in advance of the exact time of the satellite pass so the field team can collect water samples for calibration at the exact same time. The Contractor must take the necessary measure to the technical conditions (satellite angle, the day's overpass time, etc.), the weather (presence of clouds, etc.) and oceanographic condition (presence of waves, etc.) will be met to obtain quality satellite images. PWGSC will collect the water samples only if the conditions are optimal. In anticipation that the conditions are not met, the Contractor will propose a new date to PWGSC. Images that do not provide an adequate estimate of SM at sea will be taken at the expense of the Contractor.

A total of 15 collection points in the marine section of the acquisition area will be selected. Results must be sent to the Contractor in the days following collection, as soon as they become available.

The Contractor must conduct orthorectification on images with specific control points provided by PWGSC (1 m) and from a digital terrain model (DTM). This step will ensure good agreement with the positions of water sample collection. The coordinates of the eight (8) ground control points must be provided to the Contractor when the contract is awarded.

The Contractor must conduct radiometric and atmospheric corrections on the images using appropriate software in order to estimate the reflectance at the surface of the water using a reflectance sensor (available with the original images) by minimizing the effects of scattering and absorption by atmospheric constituents.

### 1.2 Implementation and application of the SM prediction model

Initially, the Contractor shall use, from information he will find himself in the literature empirical SM estimation models empirical approach. The parameters of these models should be adjusted to optimize the prediction.

Multiple regression analyses will also be performed by the Contractor using reflectance of visible and near infrared bands (or reflectance reports) on the surface of the water.  $R^2$  analysis will permit to the

Contractor to identify the most appropriate regressions and an estimate of the prediction model accuracy will be made from the surveys. Finally, the most effective prediction model(s) will be proposed by the Contractor for monitoring SM during dredging.

The contractor will present the full results for the calibration images in a progress report (see section 2.2).

### 1.3 Monitoring SM at sea during dredging

Restoration work at the Gaspé (Sandy Beach) commercial wharf will begin on July 1, 2015, and continue for 15 to 20 weeks. To conduct comprehensive SM monitoring during the entire work period, the Contractor will provide satellite images approximately every five (5) days. The Contractor shall submit a schedule for monitoring of dredging taking into account the technical parameters of the satellite overpass and atmospheric and oceanographic conditions. Ideally, since the Contractor will be using at least two (2) different sensors in addition to the LANDSAT-8 images, the Contractor shall alternate from one sensor to the other during the monitoring. With the exception of LANDSAT-8 images, those supplied by the Contractor shall be free of cloud cover (<15%) above the sea within the acquisition area. Bad quality images, with clouds or that do not provide an adequate estimate of SM at sea will be taken again at the expense of the Contractor.

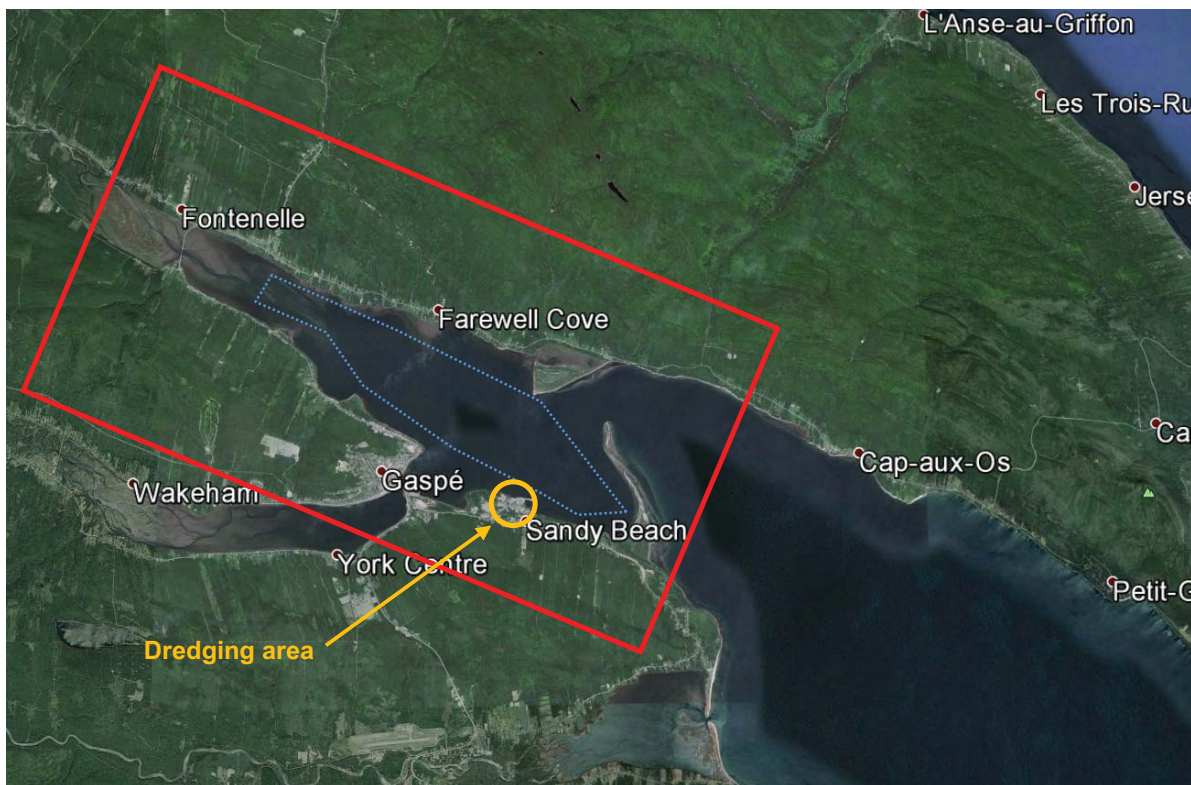


Figure 1: Planned satellite image acquisition area (red line) and water collection area (blue dotted line)

#### 1.4 SM Mapping, technical report and Powerpoint presentation

The contractor will product detailed SM maps from the estimated values using the optimal prediction model developed. The maps will show the evolution of natural sediment plumes from the rivers, those resulting from dredging as well the most accurate sediment values as possible by class (e.g. 2, 4, 6 mg/L, etc.) over the entire study area throughout the dredging work. The Contractor shall also provide one (1) or two (2) large-scale inset maps (close ups) that show the distribution of SM near the wharf and near mariculture ponds. These maps will be generated in paper and in digital format (ArcGIS). All the results should be presented in technical reports during construction (see section 2.4) and in a report at the end of work (see sections 2.5 and 2.6).

At the end of the work, the contractor will present all results in a Powerpoint presentation 25 minimum overheads.

## 2. Deliverables

### 2.1 Deliverable 1 – Start-up meeting and work plan

Within five (5) days of contract award, the Contractor shall submit a work plan for the calibration work at a start-up meeting at PWGSC offices in Quebec City. The work plan should include, among other others, the proposed approach to coordinate the sampling work with PWGSC, the satellite sensors used a schedule of satellite pass in anticipation of calibration activities in spring 2015.

### 2.2 Deliverable 2 – Preliminary progress report and working meeting

The Contractor shall submit a progress report following analysis of the first four images used for calibration. This first report, which is mainly of a technical nature, should allow a decision to be made on the most effective prediction model(s) proposed for SM monitoring during the summer 2015 dredging work for each sensor and the various detailed SM maps will be produced from the values estimated using the optimal prediction model developed. The appropriately scaled maps show different SM concentrations, the evolution of natural sediment plumes in the harbor and the most accurate sediment values as possible by class. The report will include an update of the work plan with a schedule of satellite passes for SM monitoring during dredging at sea. One (1) copy of this first report will be delivered in electronic format within 10 days following the transmission of SM data by PWGSC following the third campaign by June 25, 2015, at the latest. A working meeting is scheduled at the PWGSC office in Quebec City to plan SM monitoring during dredging.

### 2.3 Deliverable 3 – Final progress report

The final progress report must be delivered in five (5) double-sided hard copies and two (2) electronic copies, including the complete version in PDF format and all of the original Word, Excel, JPEG formats as well as in AutoCAD format for the plans. The Contractor shall sign the report. The final version must be submitted 10 working days following receipt of comments from PWGSC or before July 15, 2015.

## **2.4 Deliverable 4 – Technical Report on SM monitoring at sea from satellite images**

Within 48 hours of each acquisition during the monitoring of dredging work, the Contractor shall submit via FTP (or other means) raw multispectral images, the orthorectified image and a map showing the SM concentrations at sea measured from the most recent image. The email must identify the technical elements with respect to the date of image acquisition, etc., the sensor type used, a brief description of the image and compared with previous pictures and special circumstances, if any.

## **2.5 Deliverable 5 – Complete report of preliminary work**

The preliminary report and the Powerpoint presentation must be delivered in one (1) electronic copy, including the complete version in PDF and Word formats within fifteen days of acquisition of the last image at the end of dredging work in fall 2015 or, at the latest, on October 30. The report must contain all the information specified in Section 3, and all maps and photographs needed to properly understand the report. The report must be written in French.

## **2.6 Deliverable 6 – Final work report**

The final report and the Powerpoint presentation must be produced in five (5) double-sided hard copies and two (2) electronic copies on computer media, including the complete version in PDF format and all of the original Word, Excel, JPEG formats as well as in AutoCAD format for the plans. The Contractor shall sign the report. The final version must be submitted 10 working days following receipt of comments from PWGSC or by December 31, 2015 at the latest.

# **3. Work Reports**

## **3.1 Progress and work reports**

The progress report and work report shall include, but not be limited to the following:

- An executive summary;
- A table of contents;
- A description of the context and the work;
- A description of the steps required to implement the project supported by literature;
- A complete description of the project's progress, including satellite image processing (geometric, radiometric and atmospheric corrections), a description of the various implementation and application models and the pros and cons of the various software used and map processing, equations and coefficients, etc.;
- A summary of field work done by PWGSC for measuring SM at sea, including, water sampling methodology, position (latitude and longitude), date and time, water and the sample (bottle) depth, site number and other pertinent observations (the presence of algae, etc.), weather, speed and direction of wind, sea conditions, waves, visibility in the water, etc., and geographic location (information will be provided by PWGSC);
- A project location map that includes the sampling stations within the Gaspé Harbour;
- Presentation of the results in table form, results of analyses per campaign and correlations/regressions carried out with MS;

- Presentation of the results on large maps, in colour, (e.g. A0 showing SM concentrations measured at sea for each satellite image;
- Descriptive presentation of results;
- A discussion;
- Final decision on the potential of using satellite imagery to monitor SM at sea, a comparison between different sensors used as well as any recommendations, if necessary.
- Electronic appendix containing the raw and orthorectified multispectral images;
- Etc.

3.2 The technical report shall include, but not be limited to the following:

- Multispectral raw and orthorectified images along with a plan showing SM concentrations measured at sea;
- Summary of key elements concerning the image acquisition date, the sensor type and any special circumstances, etc.

All satellite images must be placed by the Contractor in the identified government catalogs and archives along with all appropriate licences for later use by Canada. The address is:

Natural Resources Canada  
588 Booth Street  
Ottawa, Ontario  
CANADA K1A 0Y7

#### 4. References

**Effigis Geosolutions** (2014a) Development of application methods and demonstration specifications: Monitoring of sediment concentration at sea, final report presented to Public Works and Government Services Canada, 20 pages + appendix.

**Effigis Geosolutions** (2014b) Development of application methods and demonstration specifications: Monitoring of sediment concentration at sea, preliminary modeling report presented to Public Works and Government Services Canada, 13 pages.

**WSP** (2014) Measurement of application methods and demonstration specifications: Monitoring of sediment concentration at sea for calibrating satellite images, progress report presented to Public Works and Government Services Canada, 25 pages.

**A copy of the documents is reproduced at Annex C.**

**ANNEXE B –  
BASIS OF PAYMENT**

**1. Firm price for the calibration of images**

Item	Description	Firm All-Inclusive Price (excluding applicable taxes) CAN\$
1	For the performance of the work for the calibration of images, as described in sections 1.1 and 1.2 of Annex A – Statement of Work.	\$ _____/lot (to be completed by the bidder)

**1.1 Breakdown of firm price (item 1) for the calibration of images** (Note that this section will not be included in the final version of the contract.)

**Breakdown**

The bidder **should** provide, for information purposes, a breakdown of its price for item 1 in table form. At a minimum and if applicable, it **should** include the items below. The total breakdown should equal the firm price indicated in item 1.

- Fees from the various categories of personnel;
- Report-related fees;
- Meeting-related fees;
- Acquisition fee for one (1) image LANDSAT-8;
- Acquisition fee for one (1) image for satellite sensor 2;
- Acquisition fee for one (1) image for satellite sensor 3;
- Acquisition fee for one (1) additional image for satellite sensor 2 or 3 for calibration;
- Etc.



## **2. Firm price for monitoring dredging work**

<b>Item</b>	<b>Description</b>	<b>Firm All-Inclusive Price (excluding Applicable taxes) CAN\$</b>
2	For the performance of the work for monitoring dredging work, as described in Sections 1.3 and 1.4 of Annex A – Statement of Work.	\$_____/lot (to be completed by the bidder)

### **2.1 Breakdown of firm price for monitoring dredging work** (Note that this section will not be included in the final version of the contract.)

#### **Breakdown**

The bidder **should** provide, for information purposes, a breakdown of its price for item 2 in table form. At a minimum and if applicable, it **should** include the items below. The total breakdown shall equal the firm price indicated in item 2.

- Fees from the various categories of personnel;
- Report-related fees;
- Meeting-related fees;
- Acquisition fee for two (2) LANDSAT-8 images;
- Acquisition fee for five (5) images for satellite sensor 2;
- Acquisition fee for five (5) images for satellite sensor 3;
- Etc.

### 3. Firm unit prices for the acquisition of additional images

Items	Description	Unit	Estimated Quantity (Note 1) (A)	Firm All-Inclusive Price (Excluding applicable taxes) CAN\$ (B)	Total Estimated Cost (A x B)
3.1	Raw panchromatic and multispectral images as well as orthorectified images –satellite sensor 2	image	4	\$_____/image (to be completed by the bidder)	\$_____ (to be completed by the bidder)
3.2	Raw panchromatic and multispectral images as well as orthorectified images –satellite sensor 3	image	4	\$_____/image (to be completed by the bidder)	\$_____ (to be completed by the bidder)
<b>Total estimated price – Limitation of expenditure (excluding applicable taxes) CAN\$</b>					\$_____ (to be completed by the bidder)

Note 1: Estimated quantity for bidding purposes only. These quantities will be adjusted based on the actual number of images acquired over the course of the dredging work. The price for each additional image includes all processing costs (fees and acquisition fee, etc.), orthorectification and presentation in the form of a technical report as described in Section 3 of Appendix A. Additional quantities must be approved in advance by the PWGSC lead. The Contractor will be paid only for quantities actually acquired.

#### 4. Total estimated price:

\$\_\_\_\_\_  
(excluding applicable taxes)

**Total estimated price = Firm price for image calibration (item 1) + Firm price for monitoring work during dredging (item 2) + Total estimated Price for the acquisition of additional images (item 3).**



## ATTACHEMENT 1

### MANDATORY AND POINT RATED TECHNICAL CRITERIA

#### A. Mandatory Technical Criteria

At the closing date and time of the bid solicitation, the Bidder must meet the following Mandatory Requirements and provide the necessary supporting documentation. Any bid that fails to meet any of the following Mandatory Requirements will be declared non-responsive.

With the exception of the LANDSAT-8 sensor, the multispectral satellite sensors proposed must, at minimum, have the following characteristics:

Multispectral satellite sensors	Minimum number of spectral bands	Resolution	Acquisition capacity
Sensor - 2	4	< 4 m	A minimum of two (2) times a week at a specific time $\pm$ 15 min.
Sensor - 3	4	Between 4 et 10 m	A least once a week

**The Bidder must identify in its bid the name and characteristics of the sensors and of the supplier that it will use to carry out the work.**

Name and characteristics of Sensor - 2 :	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
Name and characteristics of Sensor – 3 :	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
Name and address of the supplier that the Bidder will use :	<hr/> <hr/> <hr/> <hr/>

## B. Rated Technical Criteria

### Evaluation of the experience of the proposed resources

Each main resource will be evaluated according to criteria established for the category for which it was given. To enable the evaluation team to properly assess each of the technical evaluation criteria (mandatory and rated), the Bidder must clearly indicate the name of the proposed resources and the categories for which they are proposed.

For each proposed resource, the Bidder should indicate experience in terms of months of experience and should specify whether the resource was full-time or not. This experience should be demonstrated in a clear, precise and concrete manner.

To determine whether the experience is acceptable, the Bidder should supply a detailed description of projects and work in which the available resources have acquired experience.

Criteria	Max.	Min.
<b>1- TECHNICAL PROPOSAL</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
<b>1.1 Comprehension of the scope of services</b>	<b>10</b>	<b>—</b>
<b>1.2 Methodology</b>	<b>20</b>	<b>—</b>
<b>1.3 Allocation of resources</b>	<b>10</b>	<b>—</b>
<b>2. BIDDER'S ACHIEVEMENTS</b>	<b>30</b>	<b>15</b>
<b>3. PROPOSED RESOURCES</b>	<b>30</b>	<b>15</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>50</b>

Criteria	Evaluation Grid	Max.	Min.
<b>1- TECHNICAL PROPOSAL</b>		<b>40</b>	<b>20</b>
<b>1.1 Comprehension of the scope of services</b> The Bidder should clearly demonstrate in its own words that it thoroughly understands the scope of services requested.	The qualitative criteria evaluation grid (Table 1) will be used to determine the score for this criterion.	<b>10</b>	
<b>1.2 Methodology</b> The Bidder should propose an approach that will meet the requirements and provide quality services. It should explain how it intends to go about meeting the constraints.	The qualitative criteria evaluation grid (Table 1) will be used to determine the score for this criterion.	<b>20</b>	
<b>1.3 Allocation of resources</b> The Bidder should submit the project team. It should indicate the tasks assigned to each of the proposed resources and present an org chart showing job titles and the names of resources, and their roles, responsibilities and reporting relationships (Bidder's team, suppliers and subcontractors).	The qualitative criteria evaluation grid (Table 1) will be used to determine the score for this criterion.	<b>10</b>	
<b>2- BIDDER'S ACHIEVEMENTS</b>		<b>30</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Bidder's achievements</b> The Bidder should demonstrate that it has completed in the past five (5) years a minimum of two (2) projects related to the statement of work as the primary Contractor.  <u>Information that should be provided for each project:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Title and nature of the project;</li> <li>Scope of services rendered and desired objectives;</li> </ul>	<b>i. <u>Project 1 included:</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) The use and processing of multispectral data from more than three (3) satellite images from a given sensor (<b>4 pts</b>), only two (2) satellite images from a given sensor (<b>2 pts</b>), only one (1) satellite image (<b>1 pt</b>)</li> <li>b) The use and processing of multispectral data from satellite images originating</li> </ul>	<b>15</b>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>Project start and end dates (enter months); and</li> <li>Detailed and concise description of project to demonstrate the various elements of the evaluation grid.</li> </ul>	<p>from a minimum of two (2) different sensors <b>(3 pts)</b></p> <p>c) The application of radiometric and atmospheric corrections <b>(2 pts)</b></p> <p>d) Orthorectification from the land control point <b>(3 pts)</b></p> <p>e) The calibration of spectral bands from ground data <b>(3 pts)</b></p>		
	<p>ii. <b><u>Project 2 included:</u></b></p> <p>a) The use and processing of multispectral data from more than three (3) satellite images from a given sensor <b>(4 pts)</b>, only two (2) satellite images from a given sensor <b>(2 pts)</b>, only one (1) satellite image <b>(1 pt)</b></p> <p>b) The use and processing of multispectral data from satellite images originating from a minimum of two (2) different sensors <b>(3 pts)</b></p> <p>c) The application of radiometric and atmospheric corrections <b>(2 pts)</b></p> <p>d) Orthorectification from the land control point <b>(3 pts)</b></p> <p>e) The calibration of spectral bands from ground data <b>(3 pts)</b></p>	15	

<b>3 - PROPOSED RESOURCES</b>		<b>30</b>	<b>15</b>
<p>Information that should be provided for each resource category:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Academic and professional training</li> <li>• Number of years of experience; and</li> <li>• Main duties.</li> </ul> <p>Bidders should submit all of the resources' resumes.</p>			
<p><b>3.1 Project director</b></p> <p>The Bidder should propose a resource for the position of project director, geomatics or remote sensing.</p> <p>The project director is the person responsible for the completion of various geomatics or remote sensing projects. The project director monitors the progress of the budget, ensures that deadlines are met, assigns various tasks to the resources, takes various specifics into account, ensures quality control and manages conflicts.</p> <p><u>Information that should be provided for each project:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Title and nature of the project;</li> <li>• Scope of services rendered and desired objectives;</li> <li>• Project start and end dates (enter months);</li> <li>• Detailed and concise description of the project to demonstrate the various elements of the evaluation grid.</li> </ul>	<p><b>i. <u>Project director's experience</u></b></p> <p><b>8 points:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- has more than 60 months of experience as a project director in geomatics or remote sensing;</li> </ul> <p><b>6 points:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- has more than 48 but less than 60 months of experience as a project director in geomatics or remote sensing;</li> </ul> <p><b>4 points:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- has more than 24 but less than 48 months of experience as a project director in geomatics or remote sensing;</li> </ul> <p><b>2 points:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- has more than 24 but less than 36 months of experience as a project director in geomatics or remote sensing;</li> </ul> <p><b>0 points:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- has less than 24 months of experience as a project director in geomatics or remote sensing.</li> </ul>	8	
	<p><b>ii. <u>Participation of the project director in applied EO technology development projects using satellite images</u></b></p> <p>The project director has participated in a minimum of 6 projects (<b>7 pts</b>); 4 projects (<b>5 pts</b>); 3 projects (<b>3 pts</b>); 2 projects (<b>2 pts</b>) or 1 project (<b>1pt</b>).</p> <p>To be considered, the project must</p>		

	have been completed in the past five years.	7	
<b>3.2 Project lead</b> The Bidder should propose a resource for the position of Project Lead.  The project lead is the person responsible completing the technical component of various geomatics or remote sensing projects and ensuring that they run smoothly in every way. Under the direction of the project director, the project lead effectively coordinates a team of professionals, technicians and subcontractors until the project is completed.  <u>Information that must be provided for each project:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Title and nature of the project;</li> <li>Scope of services rendered and desired objectives;</li> <li>Project start and end dates (enter months);</li> <li>Detailed and concise description of the project to demonstrate the various elements of the evaluation grid.</li> </ul>	<b>i. <u>University education</u></b>  <b>6 points:</b> - has a graduate degree (masters or doctoral) in geomatics or remote sensing or a field related to the analysis and processing of satellite images	4	
	<b>ii. <u>Experience of the project lead</u></b>  <b>6 points:</b> - has over 48 months of experience as a project lead in geomatics or remote sensing; <b>4 points:</b> - has more than 36 but less than 48 months of experience as a project lead in geomatics or remote sensing; <b>3 points:</b> - has more than 24 but less than 36 months of experience as a project lead in geomatics or remote sensing; <b>1 point:</b> - has more than 12 but less than 24 months of experience as a project lead in geomatics or remote sensing; <b>0 points:</b> - has less than 12 months of experience as a project lead in geomatics or remote sensing.	6	
	<b>iii. <u>Participation of the Project Lead in applied EO technology development projects using satellite images</u></b>  The project lead has participated in a minimum of 5 projects ( <b>5 pts</b> ); 4 projects ( <b>4 pts</b> ); 3 projects ( <b>3 pts</b> ); 2 projects ( <b>2 pts</b> ) or 1 project ( <b>1 pt</b> ).  To be considered, the project must have been completed in the past five years.	5	

N° de l'invitation - Solicitation No.  
EE010-151984/A  
N° de réf. du client - Client Ref. No.  
EE010-151984

N° de la modif - Amd. No.  
File No. - N° du dossier  
QCN-4-37315

Id de l'acheteur - Buyer ID  
QCN015  
N° CCC / CCC No./ N° VME - FMS

		<b>100</b>	<b>50</b>

**Table 1: Qualitative Criteria Evaluation Grid**

<b>Non responsive</b>	<b>Extremely Weak</b>	<b>Very weak</b>	<b>Weak</b>	<b>Acceptable</b>	<b>Average</b>	<b>Above Average</b>	<b>Exceptional</b>
0 points	1-2 points	3 points	4 points	5 points	6-7 points	8-9 points	10 points
Did not submit information that could be evaluated	Does not meet the requirements	In general, does not meet the requirements	Lack of details	Barely meets the requirements	Meets the requirements	Exceeds the requirements	Significantly exceeds the requirements
	Shows minor weaknesses that cannot be corrected	In general, shows weaknesses that can unlikely be corrected	Shows minor weaknesses that can be corrected	Shows weaknesses that can easily be corrected	No significant weakness	No apparent weaknesses	No weaknesses
	Unacceptable	Extremely weak, impossible to meet the performance requirements	Weak Ability to meet the performance requirements	Minimum acceptable ability, should meet the minimum performance requirements	Average ability, results should be capable of delivering effective results	Superior ability, should ensure delivery of effective results	Exceptional ability, should ensure delivery of extremely effective results

N° de l'invitation - Solicitation No.  
EE010-151984/A  
N° de réf. du client - Client Ref. No.  
EE010-151984

N° de la modif - Amd. No.  
File No. - N° du dossier  
QCN-4-37315

Id de l'acheteur - Buyer ID  
QCN015  
N° CCC / CCC No./ N° VME - FMS

---

## ANNEXE C – REFERENCES





*Travaux publics et Services  
gouvernementaux Canada (TPSGC)*

**Développement des méthodologies d'application et des devis  
de validation et de démonstration :**  
Le suivi des concentrations de sédiments en mer

*Rapport final*

*Mai 2014*

## SOMMAIRE EXÉCUTIF

Le Centre d'expertise des Services professionnels et techniques du ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux du Canada (TPSGC) a mandaté VIASAT GéoTechnologies (aujourd'hui Effigis Géo-Solutions) pour développer une méthodologie de suivi des panaches de turbidité pour des projets de dragage et d'immersion en mer des sédiments, et plus particulièrement dans le cadre de la restauration des sédiments au quai de Sandy Beach à Gaspé au Québec. TPSGC souhaite mettre en place un programme de suivi des matières en suspension (MES) à partir d'images satellite prises avant et pendant les travaux afin d'observer et mesurer, le cas échéant, le panache de sédiments remis en suspension et sa distribution dans le havre. Le présent projet (Phase II) fait suite à un premier (Phase I) qui avait été réalisé en collaboration avec l'Agence spatiale canadienne en 2010/2011 pour examiner le potentiel des technologies d'observation de la Terre (OT) pour quelques-unes de ses activités clés. L'analyse effectuée avait démontré un fort potentiel pour trois applications, dont celle du suivi des panaches de sédiments.

De façon plus spécifique, le projet visait à :

- Mettre à jour l'évaluation du potentiel des capteurs identifiés en phase I;
- Identifier d'autres capteurs potentiels permettant de recueillir l'information pertinente au contexte spécifique du projet;
- Comparer, pour la liste des capteurs identifiés, les limites et les performances de chacun et faire la sélection des capteurs présentant les meilleures caractéristiques en fonction du contexte spécifique du domaine d'application;
- Développer les méthodologies et les protocoles de traitement des images satellitaires en fonction du contexte spécifique du domaine d'application;
- Préparer les plans et devis nécessaires pour faire la validation des méthodologies et des protocoles d'interprétation à partir de données recueillies sur le terrain;
- Préparer les échéanciers et le détail des coûts associés aux étapes de validation et de démonstration faisant l'objet des plans et devis.

Pour la mise à jour de la revue de littérature, plusieurs articles scientifiques récents ont été consultés pour notamment identifier de nouveaux capteurs qui répondent aux besoins du suivi des panaches et pour préciser 1) les approches concernant la mesure des concentrations de sédiments en suspension (CSS) à partir de la réflectance mesurée par les satellites ainsi que 2) les protocoles d'échantillonnage terrain à prélever pour valider les méthodologies.

La méthodologie identifiée lors de la revue de littérature et qui semble la plus appropriée dans le contexte du projet, est l'utilisation d'un modèle empirique qui fait appel à des équations non linéaires pour la mesure de la CSS à partir de satellites d'observation de la Terre de haute résolution. Les études indiquent que les  $R^2$  obtenus sont généralement élevés et qu'il est

possible de transférer les modèles empiriques sur d'autres sites si certaines conditions sont remplies.

Le choix du capteur est fonction non seulement de son potentiel à estimer la CSS, mais aussi de sa capacité à acquérir des images à des dates spécifiques 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 mathématiques utilisés pour estimer les CSS. Les bandes les plus propices pour l'identification de la CSS sont une combinaison des bandes du visible et du proche infrarouge. Ainsi, les deux satellites en constellation Pléiades 1A et 1B présentent actuellement 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 (*Instant Tasking*). Ce mode permet de programmer le satellite 24 à 48 heures à l'avance pour une acquisition sur un site spécifique. Ces satellites possèdent non seulement les bandes spectrales requises, mais aussi une résolution spatiale (2 mètres en mode multispectral) adaptée à l'échelle de la zone de dragage.

La collecte des échantillons d'eau dans le cadre de l'estimation des CSS avec l'imagerie satellitaire est faite généralement près de la surface, car la capacité de pénétration des ondes lumineuses dans le visible et le proche infrarouge est plus faible en présence de matières en suspension dans l'eau. Les études de mesure de la CSS à l'aide des images multispectrales indiquent que les prises d'échantillons d'eau se font généralement à moins de 50 cm de la surface. Il est important de consigner des renseignements sur le contexte environnemental lors de la prise de données et de s'assurer de synchroniser autant que possible la collecte avec le moment de la prise de l'image satellite.

### Méthodologie de validation

La méthodologie de validation proposée comprend plusieurs étapes. Elle vise principalement à établir un modèle de prédiction de la CSS à partir de matières en suspension naturelles dans la baie de Gaspé entre les mois de mai et d'août.

- 1- Planification, programmation et acquisition de six images Pléiades couvrant 100 km<sup>2</sup> entre les mois de mai et d'août de façon à couvrir une bonne amplitude de variation de concentration de matières en suspension (MES);
- 2- Collecte et analyse en laboratoire de 75 échantillons d'eau, réparties sur 15 sites, dont 50 seront utilisés pour établir les modèles de prédiction de la CSS et 25 pour en estimer la précision;
- 3- Collecte des points de contrôle au terrain par GPS pour l'orthorectification des images satellite;

- 4- Traitement des images satellitaires incluant l'orthorectification ainsi que des corrections radiométriques et atmosphériques pour estimer la réflectance à la surface de l'eau à partir de la réflectance au capteur;
- 5- Mise en place et application d'un modèle de prédiction des CSS pour la zone d'étude;
- 6- Cartographie de la CSS et rapport de projet.

Les coûts de réalisation des activités prévues pour la validation de la méthodologie d'estimation de la CSS à partir d'imagerie satellitaire multispectrale sont estimés à 81 950 \$, dont 30 000 \$ pour l'acquisition d'images Pléiades. Les efforts requis sont de 42 jours-personnes. Les travaux se déroulent de la mi-avril à la fin septembre 2014.

#### Méthodologie de démonstration

La méthodologie de démonstration vise à appliquer le modèle de prédiction de la CSS établi lors de la phase de validation au suivi des CSS lors des opérations de dragage qui auront lieu dans le cadre de la restauration des sédiments au quai de Sandy Beach à Gaspé. L'approche est simplifiée par rapport à celle développée pour la validation, car la collecte d'échantillons d'eau n'est pas requise et les points de contrôle pour l'orthorectification des images seront les mêmes que ceux déjà utilisés pour la validation. La méthodologie comprend les étapes suivantes :

1. Planification, programmation et acquisition de 12 images Pléiades de 100 km<sup>2</sup> durant les travaux de dragage (1 par semaine en moyenne);
2. Traitement des images satellitaires incluant l'orthorectification ainsi que des corrections radiométriques et atmosphériques pour estimer la réflectance à la surface de l'eau à partir de la réflectance au capteur;
3. Estimation de la CSS dans la zone de dragage et cartographie;
4. Rapport de projet.

Les coûts de réalisation des activités prévues pour l'application de la méthodologie d'estimation de la CSS à partir d'imagerie satellitaire multispectrale en 2015 sont estimés à 70 250 \$, dont 51 600 \$ en acquisition d'images Pléiades. Les efforts requis sont de 27 jours-personnes. Les travaux se dérouleront approximativement de la mi-juin à la fin septembre 2015. Ces informations seront validées dans le rapport final.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CONTEXTE.....</b>	<b>1</b>
<b>3. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....</b>	<b>2</b>
<b>4. MISE À JOUR DE LA REVUE DE LITTÉRATURE ET DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>2</b>
4.1. Mise à jour de la revue de littérature.....	2
<b>4.1.1. Estimation de la CSS .....</b>	<b>2</b>
<b>4.1.2. Collecte des échantillons d'eau.....</b>	<b>6</b>
4.2. Développement de la méthodologie .....	7
<b>4.2.1. Choix du capteur.....</b>	<b>7</b>
<b>4.2.2. Méthodologie pour la validation .....</b>	<b>9</b>
<b>5. PLAN ET DEVIS POUR LA VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>13</b>
5.1. Objectifs .....	13
5.2. Méthodologie.....	13
5.3. Coûts et échéancier .....	16
<b>6. PLAN ET DEVIS POUR LA DÉMONSTRATION DE LA MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>17</b>
6.1. Objectifs .....	17
6.2. Méthodologie.....	17
6.3. Coûts et échéancier .....	18
<b>7. RÉFÉRENCES.....</b>	<b>20</b>

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : LISTE DES SATELLITES COMMERCIAUX ACTUELLEMENT EN ACTIVITÉ ET MUNIS DE CAPTEURS MULTISPECTRAUX (30 M ET MOINS) ET POTENTIEL POUR ESTIMER LA CSS .....		8
TABLEAU 2 : EFFORTS ET COÛTS DE RÉALISATION DES ACTIVITÉS PRÉVUES POUR LA VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE D'ESTIMATION DE LA CSS .....		16
TABLEAU 3 : EFFORTS ET COÛTS DE RÉALISATION DES ACTIVITÉS PRÉVUES POUR L'APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE D'ESTIMATION DE LA CSS EN 2015 .....		19

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : ZONE D'ACQUISITION PRÉVUE DES IMAGES PLÉIADES (EN ROUGE) ET DE COLLECTE DES ÉCHANTILLONS D'EAU (EN BLEU) .....		10
--	--	----

## 1. Introduction

Le projet réalisé en collaboration avec l'Agence spatiale canadienne en 2010/2011 (Phase I) constituait la première étape de l'élaboration de la stratégie de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) pour développer des applications des technologies d'observation de la Terre (OT) pour quelques-unes de ses activités clés. Cette première étape a permis d'évaluer le potentiel d'application des technologies d'OT en lien avec neuf domaines d'activités du Centre d'expertise des Services professionnels et techniques (CE-SPT) de TPSGC. L'analyse effectuée par VIASAT GéoTechnologies (aujourd'hui Effigis Géo-Solutions) a démontré un fort potentiel pour trois de ces domaines, soit :

- Le suivi des panaches de turbidité dans le cadre de projets de dragage et d'immersion en mer des sédiments;
- La surveillance de l'érosion littorale liée aux infrastructures riveraines;
- L'observation des sites d'accès au fleuve Saint-Laurent et la surveillance de leur utilisation.

Suite à cette analyse, le CE-SPT a mandaté Effigis pour (1) développer une méthodologie d'application liée aux capteurs les plus appropriés pour les deux premiers domaines identifiés ci-dessus; (2) élaborer, pour ceux-ci, les plans et devis pour procéder à la validation des méthodologies et (3) mettre en œuvre les projets de démonstration. Ce rapport décrit les résultats obtenus pour l'application « Suivi des panaches de turbidité dans le cadre de la restauration des sédiments au quai de Sandy Beach à Gaspé ».

## 2. Contexte

Transports Canada compte entreprendre en 2015 la restauration de sédiments contaminés au cuivre et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques situés directement au sud du quai commercial de Gaspé – Sandy Beach. L'un des impacts anticipés de ce projet de restauration qui impliquera le dragage d'un volume de 27 000 m<sup>3</sup> sur une superficie d'environ 50 000 m<sup>2</sup>, est la remise en suspension de sédiments contaminés dans la colonne d'eau et le transport de ceux-ci vers les sites aquicoles situés au nord-ouest du havre de Gaspé lors des activités de dragage. Afin d'évaluer les impacts réels du projet, Transports Canada s'est engagé à développer et mettre en œuvre, lors des travaux, un programme de suivi des matières en suspension (MES) et de la contamination de la chair des mollusques cultivés dans le havre de Gaspé.

TPSGC souhaite mettre en place un programme de suivi des matières en suspensions (MES) à partir d'images satellite prises avant et pendant les travaux afin d'observer et mesurer, le cas échéant, le panache de sédiments remis en suspension et sa distribution dans le havre. La technologie devra 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

(concentration de MES en mg/l)) aux observations. Enfin, la technologie devra permettre d'obtenir des résultats (interprétation des images) dans un délai raisonnable dans le contexte d'un suivi de chantier.

### 3. Objectifs spécifiques

De façon plus spécifique, le projet vise à :

- Mettre à jour l'évaluation du potentiel des capteurs identifiés en phase I;
- Identifier d'autres capteurs potentiels permettant de recueillir l'information pertinente au contexte spécifique du projet;
- Pour la liste des capteurs identifiés, comparer les limites et les performances de chacun et faire la sélection des capteurs présentant les meilleures caractéristiques en fonction du contexte spécifique du domaine d'application;
- Développer les méthodologies et les protocoles de traitement des images satellitaires en fonction du contexte spécifique du domaine d'application;
- Préparer les plans et devis nécessaires pour faire la validation des méthodologies et des protocoles d'interprétation à partir de données recueillies sur le terrain;
- Préparer les échéanciers et le détail des coûts associés aux étapes de validation et de démonstration faisant l'objet des plans et devis.

### 4. Mise à jour de la revue de littérature et développement de la méthodologie

#### 4.1. *Mise à jour de la revue de littérature*

##### 4.1.1. *Estimation de la CSS*

Lors de la phase I, la revue de littérature a fait ressortir qu'il existait une bonne corrélation entre la mesure de la concentration de sédiments en suspension (CSS) dans l'océan et les nappes d'eau intérieure et la réflectance des satellites multispectraux (LANDSAT, SPOT et MODIS) corrigée pour les effets atmosphériques. De plus, il en est ressorti 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. Cette approche est généralement simple d'utilisation (peu de paramètres), mais elle nécessite 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,



les paramètres de transmittance et d'absorption). On parle alors de modèle de transfert radiatif qui se base sur les lois physiques 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, 2009).

Volpe et coll. (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  $R_{rs}$  (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).

Réflectance sous la surface  $r_{rs}$ :

$$r_{rs} = r_{rs}^{dp} \left[ 1 - e^{-(K_d + K_u^C)H} \right] + \frac{\rho_b}{\pi} e^{-(K_d + K_u^B)H}$$

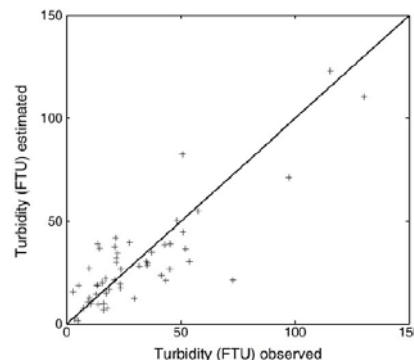
- où
- $r_{rs}$  : subsurface remote sensing reflectance (réflectance sous la surface)
  - $r_{rs}^{dp}$  :  $r_{rs}$  value for optically deep waters (valeur pour les eaux optiquement profondes)
  - $K_d$  : vertically averaged diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance (coefficient d'atténuation verticale diffuse moyen pour l'irradiance en pénétration)
  - $K_u^C$  : vertically averaged diffuse attenuation coefficient for upwelling radiance from water column scattering (coefficient d'atténuation verticale diffuse moyen pour l'irradiance en remontée à partir de la diffusion de la colonne d'eau)
  - $K_u^B$  : vertically averaged diffuse attenuation coefficient for upwelling radiance from bottom reflectance (coefficient d'atténuation verticale diffuse moyen pour l'irradiance en pénétration pour la réflectance du fond)
  - $H$  : water depth (profondeur de l'eau)
  - $\rho_b$  : bottom albedo (albédo du fond)

Réflectance à la surface de l'eau  $R_{rs}$ :

$$R_{rs} = \frac{0.5r_{rs}}{1 - 1.5r_{rs}}$$

Compte tenu de la complexité de la mesure de plusieurs de ces paramètres, plusieurs hypothèses ont été faites pour simplifier la résolution des équations. On a également utilisé des valeurs de paramètres tirées d'autres d'études. Dans le cas des images satellite 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).

Le site d'étude couvre environ 550 km<sup>2</sup> avec une profondeur moyenne de 1,3 mètre. Le modèle a été validé avec des données de 10 stations permanentes (53 observations) et 13 images satellite incluant Landsat TM et ETM, Aster et ALOS AVNIR. L'analyse a été faite avec la bande spectrale du rouge (environ 0,63-0,69 µm). On a mesuré la turbidité de l'eau (qui permet de calculer directement la CSS). La figure ci-contre montre les valeurs estimées de turbidité exprimées en FTU (Formazine Turbidity Units) et celles mesurées au terrain pour l'ensemble des images satellite. On observe une erreur type de 14,3 FTU (turbidité) pour une plage de valeurs s'étendant de 1 à 125 FTU. 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 coll. (2013) ont aussi utilisé une approche par transfert radiatif simplifié de type semi-empirique pour examiner les variations saisonnières et annuelles de la CSS dans l'estuaire du Yangtze (Chine). On a 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 (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, on arrive à une équation simplifiée pour le calcul de la CSS :

$$C_{ss} = \frac{(2\alpha/\beta)R_{rs}}{(\alpha - R_{rs})^2}$$

où  $R_{rs}$  : remote sensing reflectance (réflectance) (avec correction atmosphérique)  
 $C_{ss}$  : concentration of suspended sediments (mg/l) (concentration des sédiments en suspension)  
 $\alpha$  and  $\beta$  : empirical parameters (paramètres empiriques)

On doit cependant déterminer les constantes  $\alpha$  et  $\beta$  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. Le tableau ci-dessous montre les valeurs proposées :

Bandes MERIS	$\alpha$	$\beta$	CSS (mg/l)
560 nm	0,0493	35,3352	< 20
620 nm	0,0652	20,4711	20-80
709 nm	0,0760	10,6100	80-250
779 nm	0,0904	3,5027	> 250

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 km<sup>2</sup> 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 station. L'image a été orthorectifiée et a fait l'objet de corrections radiométrique et atmosphérique pour minimiser les effets de l'atmosphère. On 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  $A_0$  et  $A_i$  sont des constantes de l'équation de régression à déterminer à partir de données de terrain et  $R_i$  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. Le tableau ci-contre permet de comparer les valeurs prédites et celles qui ont été mesurées.

Total Suspended Sediment (TSS) (mg/l)	
In-situ	Estimated
23,800	23,832
28,000	28,701
25,200	24,247
23,400	23,508
29,000	28,487
25,200	26,870
33,000	31,670
40,300	40,535
22,400	24,301

Long et coll. (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 ci-dessous présente les caractéristiques d'études utilisant Landsat TM, SPOT et IKONOS.

Étude	Satellite	Bandes spectrales	Équation utilisée pour estimer la CSS ou la turbidité (FTU)
Doxaran et coll. 2003	LANDSAT TM	R1 : TM2 (vert) R2 : TM4 (proche infrarouge)	$CSS = 29,022 * e^{0,0335 * (\frac{R2}{R1})}$
	SPOT XS3	R1 : vert R2 : proche infrarouge	$CSS = 18,895 * e^{0,0322 * (\frac{R2}{R1})}$
Song et coll. 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 coll. 2007	IKONOS	R : bande rouge	$Turbidity = 0,078 * R - 8,7$

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 Pavelisky (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 faite 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.

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 400–500 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, 2009). 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.

#### **4.1.2. Collecte des échantillons d'eau**

La collecte des échantillons d'eau dans le cadre de l'estimation des CSS avec l'imagerie satellitaire 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 coll., 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). De plus, le manuel des protocoles d'échantillonnage pour l'analyse de la qualité de l'eau au Canada (CCME, 2011) recommande, notamment lors de la collecte manuelle d'échantillons d'eau (en bateau) pour la mesure de la CSS, d'utiliser une bouteille propre pour chaque échantillon de sédiments prélevé; d'orienter l'ouverture des bouteilles vers l'amont, directement dans le courant; de maintenir le système en position horizontale pendant que l'échantillonneur de sédiments est enfoncé dans le cours d'eau; et d'éviter tout obstacle qui pourrait se trouver sous l'eau immédiatement en amont. On mentionne aussi de consigner tous les renseignements habituels sur le site, dont le nom et le numéro du site, la date et l'heure, le nom de la personne prélevant les échantillons et les coordonnées du lieu avec un système GPS. Comme mentionné précédemment, il est également important de synchroniser la collecte le plus possible avec la prise de l'image satellite (Shen et coll., 2013).

Pour la mesure de la CSS au laboratoire, les échantillons sont filtrés 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 (Villar et coll., 2013, Onderka et Rodny, 2009, Shen et coll., 2013, Long et Pavelsky, 2013).

## **4.2. Développement de la méthodologie**

### **4.2.1. Choix du capteur**

Le choix du capteur est fonction non seulement de son potentiel à estimer la CSS, mais aussi des caractéristiques d'acquisition des satellites utilisés pour le développement d'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 mathématiques;
- 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 1 montre la liste des satellites commerciaux actuellement en activité et à venir et munis de capteurs multispectraux qui présentent des résolutions spatiales supérieures 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 avec l'acquisition des images, nous avons indiqué le potentiel des différents satellites pour l'estimation des sédiments dans le contexte du dragage à Sandy Beach. Deux capteurs multispectraux (Pléiades et Quickbird) se démarquent avec un potentiel fort, car ils permettent un mode de programmation en urgence, ce qui augmente le potentiel d'acquisition à une date précise. Il faut garder en tête que les coûts d'acquisition sont plus élevés dans les cas d'urgence.

Bien que les quatre satellites de haute résolution GeoEye-1, WorldView-2, IKONOS et Quickbird-2 soient opérés par le même fournisseur (DigitalGlobe), ce qui devrait augmenter les chances d'acquisition à un moment donné, on n'utilise généralement que le satellite Quickbird-2 pour les cas de commande en urgence. Étant donné que Pléiades disposent de deux satellites en constellation, les chances d'acquisition réussie à une date précise dans un cas d'urgence sont plus grandes.

Notre analyse basée sur l'expérience d'Effigis en tant que distributeur d'images satellite indique que les deux satellites en constellation Pléiades 1A et 1B présentent 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. Ce mode permet de programmer le satellite 24 à 48 heures à l'avance pour une acquisition sur un site spécifique. De plus, la résolution de 2 mètres en multispectral est adaptée à l'échelle de la zone de dragage.

Les résultats de la revue de littérature indiquent 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 avec Pléiades. Bien qu'aucune étude d'estimation de la CSS à partir de ces

images (satellites lancés en 2012) n'ait pu être répertoriée, ces dernières possèdent quatre bandes spectrales dont trois dans le visible et une dans le proche infrarouge :

Bleu	0,430 - 0,550 $\mu\text{m}$
Vert	0,500 - 0,620 $\mu\text{m}$
Rouge	0,590 - 0,710 $\mu\text{m}$
Proche IR	0,740 – 0,940 $\mu\text{m}$

Satellites avec capteurs multispectraux	Nbre de bandes spectrales	Résolution (m)	Date de lancement	Capacité d'acquisition	Potentiel pour l'estimation des sédiments
<b>Actuels</b>					
GeoEye-1	4	1,7	2009	Possibilité de passage à tous les 1 à 3 jours, mais acquisition à une date précise non assurée	Moyen
WorldView-2	8	1,8	2009	Possibilité de passage à tous les 1 à 3 jours, mais acquisition à une date précise non assurée	Moyen
Pléiades 1A-1B	4	2,0	2011	Possibilité de passage quotidien à une date assurée	Fort
QuickBird-2	4	2,4	2001	Possibilité de passage quotidien à une date assurée	Fort
IKONOS-2	4	4,0	1999	Possibilité de passage à tous les 2 à 4 jours, mais 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	Possibilité de passage à tous les 2 à 4 jours, mais 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, mais acquisition à une date précise non assurée	Faible
SPOT-5	4	10,0	2002	Possibilité de passage à tous les 2 à 4 jours, mais acquisition à une date précise non assurée	Moyen
LANDSAT-8 (OLI)	7	30,0		Une fois tous les 16 jours	Faible
DEIMOS-1	3	22,0	2009	Passage environ toutes les semaines, mais acquisition à une date précise non assurée	Moyen
<b>À venir (prévus, mais non assurés 2014-2015)</b>					
WorldView-3	8	1,25	2014		
SPOT-7	4	6	2014		
Sentinel 2A, 2B	10	10,0	2014-2015		

**Tableau 1 : Liste des satellites commerciaux actuellement en activité et munis de capteurs multispectraux (30 m et moins) et potentiel pour estimer la CSS**



#### 4.2.2. Méthodologie pour la validation

La méthodologie pour la validation repose d'abord sur l'acquisition d'images à l'intérieur d'un délai de 24 à 48 heures et, au besoin en urgence, d'images Pléiades 1A et 1B ainsi que sur l'utilisation d'un modèle empirique qui fait appel à des équations non linéaires. 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 méthodologie proposée comprend les étapes suivantes :

##### 1. Planification, programmation et acquisition des images Pléiades

La sélection des images se fera à partir de la liste des dates potentielles de passage du satellite. Cinq dates d'acquisition seront requises pour calibrer le modèle utilisé pour l'estimation des CSS. Ces dates devront être synchronisées avec la prise de données de MES sur le site.

Il ressort de l'analyse visuelle des images Landsat des années précédentes que le panache de la crue des rivières York et Dartmouth peut commencer à partir de la fin avril et se terminer au début juin. De façon à couvrir une bonne amplitude de variation de concentration de MES, nous proposons :

- Trois acquisitions en mai pendant la crue printanière;
- Une acquisition en juin;
- Une acquisition en juillet.

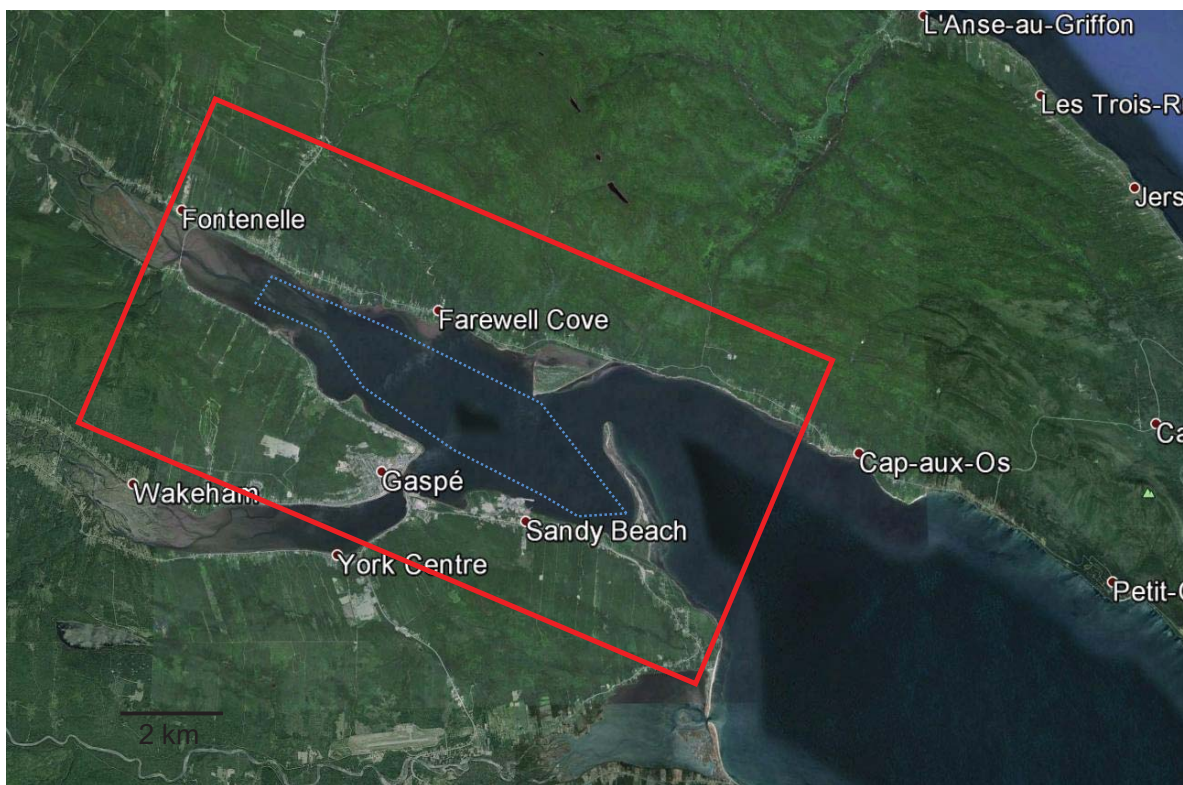
La figure ci-dessous montre la présence de sédiments (en gris) pour trois dates en 2013. On note qu'elle est particulièrement importante en mai.



Pour assurer une synchronisation entre l'acquisition des images et la prise de données de sédiments sur le site, il faut faire appel au mode de programmation dit « programmation

instantanée ». Ce mode permet de donner le feu vert à l'acquisition d'images Pléiades sur le site de 24 à 48 heures à l'avance. Il faut noter qu'une fois la programmation lancée, l'achat de l'image est obligatoire et ce, quelles que soient les conditions météorologiques qui prévaudront sur le site. Avant de lancer la programmation, il faut s'assurer que les prévisions météorologiques (présence de nuages et conditions de vent qui peuvent avoir un effet par la formation de vagues à la surface du plan d'eau) soient le plus favorables possible pour la journée de l'acquisition et que les équipes de terrain pour la prise d'échantillons de sédiments soient prêtes à intervenir. Compte tenu des incertitudes sur la météo, nous prévoyons qu'il faudra probablement reprendre une des acquisitions durant la période de mai à juillet.

La zone d'acquisition prévue des images satellite (en rouge) est illustrée à la figure 1. Elle couvre 100 km<sup>2</sup>, soit le minimum requis pour une nouvelle acquisition Pléiades<sup>1</sup>. La zone en bleu correspond à la partie de l'image qui servira à la collecte des échantillons d'eau pour la mesure de terrain de la CSS.



**Figure 1 : Zone d'acquisition prévue des images Pléiades (en rouge) et de collecte des échantillons d'eau (en bleu)**

<sup>1</sup> Ce minimum est requis par tous les satellites OT de haute résolution.



## 2. Collecte des échantillons d'eau et analyse en laboratoire

Cinq sorties de terrain synchronisées avec les acquisitions des images satellite seront réalisées pour la collecte des échantillons d'eau. Au total, 15 points de collecte répartis dans la zone marine de l'aire d'acquisition seront sélectionnés (voir figure 1). La localisation des stations d'échantillonnage, faite à partir de Google Earth et des coordonnées géographiques sont présentées à l'annexe 1. Lors de la collecte, la localisation exacte de chaque prise d'échantillons sera déterminée à l'aide d'un système GPS. Les collectes devront être faites dans une fenêtre de quatre heures, soit entre deux heures avant le captage de l'image et deux heures après. Les modalités suivantes devront être suivies :

- Prise de deux échantillons d'eau à environ 30 cm de profondeur sous la surface de l'eau par point de collecte et par date d'acquisition d'images dans des contenants appropriés (un des échantillons est pour remplacement en cas de problème). Au total, 150 échantillons seront récoltés dont 75 seront analysés);
- Mesure de la localisation exacte des échantillons avec un GPS permettant des corrections post-traitement (précision en X, Y de l'ordre de 1 mètre).

Une équipe spécialisée (fournie par TPSGC) dans le domaine de la collecte d'échantillons d'eau par bateau devra être disponible avec un avis de 24 à 48 heures avant la prise de données. Les échantillons récoltés seront par la suite envoyés à un laboratoire spécialisé pour déterminer la concentration de sédiments en mg/l.

## 3. Traitement des données satellitaires

Les images devront d'abord être orthorectifiées à partir de points de contrôle précis (1 m) et un modèle numérique de terrain (MNT). Cette étape permet un positionnement précis de chacun des pixels de l'image et assurera une bonne concordance avec la position des échantillons d'eau. Suite à la réception de la 1<sup>e</sup> image satellite en mai, une campagne de terrain sera réalisée pour acquérir les points de contrôle requis pour l'orthorectification à l'aide d'un système GPS permettant des corrections post-traitement (précision en X, Y de l'ordre de 1 mètre).

Des corrections radiométriques et atmosphériques seront également faites sur les images Pléiades à partir du logiciel REFLECT (Bouroubi et coll., 2010). Ce logiciel, disponible chez Effigis, utilise les routines du code 6S pour le calcul des paramètres atmosphériques. Ces corrections permettent d'estimer la réflectance à la surface de l'eau à partir de la réflectance au capteur (disponible avec les images originales) en minimisant les effets de diffusion et d'absorption par les constituants de l'atmosphère. Cette étape est essentielle pour optimiser la corrélation entre la réflectance et la CSS.

## 4. Mise en place et application du modèle de prédiction des CSS

Dans un premier temps, des modèles d'estimation de la CSS par approche empirique tels que fournis par la revue de littérature seront appliqués. Les paramètres de ces modèles pourront

être ajustés pour optimiser la prédiction. Des 75 relevés de CSS, 50 seront utilisés pour optimiser ces modèles et les 25 autres permettront d'estimer la précision des modèles ajustés pour le site de Sandy Beach.

Des analyses de régression multiple seront également réalisées en faisant appel aux réflectances des bandes du visible et du proche infrarouge (ou aux rapports de réflectances) à la surface de l'eau. L'analyse des  $R^2$  permettra d'identifier les régressions les plus appropriées et une estimation de la précision des modèles de prédiction sera faite à partir des 25 relevés non utilisés pour les régressions. Finalement, le ou les modèle(s) de prédiction le(s) plus performant(s) sera(ont) proposé(s) pour le suivi de la CSS lors du dragage à l'été 2015.

#### 5. Cartographie de la CSS et rapport technique

Des cartes détaillées des CSS seront produites à partir des valeurs estimées à l'aide du modèle optimal de prédiction développé à la section 4. Les cartes permettront de visualiser l'évolution des panaches de sédiments naturels ainsi que les valeurs de la CSS par classe la plus précise possible (ex. 5 à 10 mg/l) entre les mois de mai et juillet 2014 sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces cartes seront générées en format papier et en format numérique (ArcGIS). Un rapport technique décrivant les résultats obtenus et les recommandations sera produit.

## 5. Plan et devis pour la validation de la méthodologie

### 5.1. Objectifs

Cette section vise à définir un devis technique pour la validation de la méthodologie d'estimation de la CSS à partir d'imagerie satellitaire multispectrale qui sera réalisée en 2014 dans le cadre du projet de dragage prévu à l'été 2015 à Sandy Beach en Gaspésie.

### 5.2. Méthodologie

La méthodologie pour le développement d'un modèle de prédiction de la concentration des sédiments en suspension pour le havre de Gaspé à partir d'images satellite de haute résolution devra comprendre les activités suivantes :

#### 1. Planification, programmation et acquisition des images Pléiades

- Obtenir du fournisseur d'images (Airbus Defence & Space) le calendrier des dates et heures de passages des satellites Pléiades 1A et 1B au dessus du havre de Gaspé entre la fin d'avril et la fin d'août 2014;
- Sélection des dates d'acquisition en fonction des prévisions météorologiques favorables (absence de nuages, peu de vagues). Il doit s'assurer d'acquérir trois images au printemps lors de la crue des rivières Dartmouth et York et de la présence d'un panache naturel de MES ainsi que deux images en été :
  - ✓ Trois acquisitions en mai pendant la crue printanière;
  - ✓ Une acquisition en juin;
  - ✓ Une acquisition en juillet.
- La décision de commander une image Pléiades doit être faite dans les 24 à 48 heures avant la journée prévue étant donné l'obligation d'achat peu importe la qualité de l'image (programmation en mode instantané). L'acquisition devra couvrir la zone de 100 km<sup>2</sup> illustrée à la figure 1. Les spécifications à fournir au fournisseur d'images sont : l'AOI, les produits commandés (*bundle* – bandes panchromatique et multispectrales) ainsi que le mode d'acquisition (instantané);
- S'assurer de la synchronisation entre la date d'acquisition de l'image et la disponibilité de l'équipe d'échantillonnage.

#### 2. Collecte des échantillons d'eau et analyse en laboratoire

La collecte des échantillons d'eau sera effectuée par le personnel de TPSGC selon la méthodologie suivante :

- L'équipe de terrain devra prélever des échantillons d'eau dans chacun des quadrats de la grille d'échantillonnage illustrée à la figure 2. Lors du prélèvement des échantillons,

l'embarcation devra être située à proximité du centre de chaque quadrat dont les coordonnées géographiques sont fournies au tableau suivant :

Quadrat	Latitude	Longitude
1	48,87470'	-64,53680'
2	48,86670'	-64,51240
3	48,85820'	-64,49860'
4	48,85820	-64,48180'
5	48,84960'	-64,48830'
6	48,84530'	-64,47520'
7	48,85380'	-64,46870'
8	48,85140'	-64,45190'
9	48,84090'	-64,45980'
10	48,83180'	-64,46680'
11	48,83500'	-64,44230'
12	48,84550'	-64,43430
13	48,83940'	-64,41990'
14	48,82940	-64,42560'
15	48,82480'	-64,41200'

- À chaque point d'échantillonnage, deux échantillons d'eau seront récoltés à une profondeur d'environ 20 cm à l'aide de bouteilles propres de 275 ml;
- Les renseignements suivants seront notés pour chaque site lors de la collecte des échantillons : numéro du quadrat, date et heure, nom du préleveur, conditions d'ennuagement (présence et abondance des nuages, présence de brume ou de brouillard), conditions de surface de l'eau (présence et amplitude des vagues), couleur de l'eau (abondance relative des sédiments);
- La position de l'embarcation au moment de l'échantillonnage sera mesurée à l'aide d'un GPS. La meilleure précision spatiale de l'ordre du mètre devra être obtenue, notamment en procédant à des corrections post-traitement;
- La collecte des échantillons devra être synchronisée avec le passage du satellite, c'est-à-dire à l'intérieur d'une fenêtre de quatre heures centrée sur l'heure de passage du satellite (de deux heures avant à deux heures après le passage du satellite);
- Une récolte d'échantillons d'eau pour chacun des 15 quadrats de la grille d'échantillonnage sera effectuée lors de chaque date d'acquisition d'une image satellite, c'est-à-dire trois fois au courant du mois de mai, une fois au mois de juin et une fois au mois de juillet;
- Un échantillon par quadrat sera utilisé pour évaluer la concentration de sédiments en suspension (CSS), le deuxième échantillon servant de remplacement en cas de problème. La CSS sera évaluée en filtrant sous vide l'échantillon d'eau avec un filtre de 1,2 micromètre qui sera par la suite séché et pesé. La CSS correspond à la différence entre le poids du filtre sec avant et après filtration (en milligrammes) divisée par le volume de l'échantillon d'eau (en litre). Les résultats des mesures de CSS ainsi que les renseignements sur les

conditions de récolte (coordonnées, conditions météorologiques, etc.) seront rendus disponibles.

### 3. Traitement des données satellitaires

- Les coordonnées géographiques d'une dizaine de points de contrôle terrestres seront récoltées avec un GPS dans la région du Havre de Gaspé. Ces points serviront à la correction géométrique des images satellite. Ils devront correspondre à des éléments facilement identifiables sur les images (coin de bâtiment, démarcation sur la route, point de repère, etc.) et devront avoir une précision spatiale de l'ordre d'un mètre;
- Acquisition d'un modèle numérique de terrain (MNT) pour le territoire couvert par les images. Un modèle numérique d'altitude d'une résolution de 10 m est disponible auprès de la Géoboutique du MER. On pourrait aussi utiliser le [SRTM](#) disponible gratuitement. En combinaison avec les points de contrôle terrestres récoltés, le MNT sera utilisé pour orthorectifier les images satellite reçues;
- Réalisation des corrections radiométriques et atmosphériques des images satellite reçues. Ces corrections doivent viser à établir la réflectance à la surface de l'eau à partir du signal capté par les images satellite. Le modèle de transfert radiatif utilisé devra prendre en compte les coefficients de calibration du capteur, les conditions d'éclairement, l'angle de visée du capteur, ainsi que la diffusion et l'absorption par les constituants de l'atmosphère (gaz et aérosols). Il est recommandé d'utiliser la méthode des cibles obscures étant donné la faible réflectance de l'eau.

### 4. Mise en place et application du modèle de prédiction des CSS

- On doit associer une valeur de réflectance sur l'eau à chacun des points d'échantillonnage à partir des images corrigées (corrections radiométriques et atmosphériques);
- Utilisation des outils statistiques (par ex. MATLAB) afin d'établir le modèle empirique d'estimation de la CSS qui donne les meilleurs résultats. Il devra identifier les variables (bandes, ratios et/ou transformations) ainsi que les meilleures fonctions (type de relation – linéaire, quadratique, exponentielle, etc.) à utiliser. Il utilisera 50 des 75 relevés de CSS comme donnée pour l'optimisation du modèle empirique d'estimation;
- Évaluation de la validité du modèle de prédiction développé à l'aide des 25 relevés restants.

### 5. Cartographie de la CSS et rapport technique

- Utilisation du modèle empirique d'estimation de la CSS obtenu pour estimer les concentrations de sédiments sur l'ensemble de la zone d'étude et production d'une cartographie des CSS par classe de 5 à 10 mg/l pour chacune des dates d'acquisition

d'images. Les cartographies seront livrées sous une forme matricielle (TIF) d'une résolution de 0,5 m et avec la projection UTM 20;

- On doit fournir un rapport technique décrivant les résultats obtenus ainsi que ses recommandations.

### 5.3. Coûts et échéancier

Le tableau 2 montre les coûts de réalisation des activités prévues pour la validation de la méthodologie d'estimation de la CSS à partir d'imagerie satellitaire multispectrale. Les coûts de réalisation sont estimés à 81 950 \$, dont 30 000 \$ pour l'acquisition d'images Pléiades. Les efforts requis sont de 42 jours-personnes. Les travaux se déroulent de la mi-avril à la fin septembre 2014.

Activité	Efforts Jrs- personnes	Coûts de main- d'oeuvre (\$)	Autres coûts (\$)
1- Planification, programmation et acquisition des images Pléiades			
A- Planification et programmation des images	3	1 950	
B- Acquisition de six images Pléiades 1A ou 1B de 100 km <sup>2</sup> chacune	3	1 950	30 000
2- Collecte des échantillons d'eau et analyse en laboratoire <sup>(1)</sup>	12	20 000	10 000 <sup>(2)</sup>
3- Collecte des points de contrôle pour l'orthorectification des images (2 personnes en véhicule)	8	4 800	2 000 <sup>(2)</sup>
4- Traitement des données satellitaires (5 images)	5	3 250	-
5- Mise en place et application du modèle de prédiction des CSS	5	3 500	
6- Cartographie et rapport technique	6	4 500	-
<b>TOTAL</b>	<b>42</b>	<b>39 950</b>	<b>42 000</b>

(1) Service fourni par TPSGC

(2) Coûts pour les travaux de terrain et frais de laboratoire (hôtel, per diem, véhicule)

**Tableau 2 : Efforts et coûts de réalisation des activités prévues pour la validation de la méthodologie d'estimation de la CSS**

## 6. Plan et devis pour la démonstration de la méthodologie

### 6.1. Objectifs

Cette section vise à définir un devis technique pour l'application de la méthodologie d'estimation de la CSS à partir d'imagerie satellitaire multispectrale qui sera réalisée en 2015 pendant les travaux de dragage prévu à l'été 2015 à Sandy Beach en Gaspésie.

### 6.2. Méthodologie

La méthodologie se base sur celle qui a été développée à la section 4. Cependant, elle présente un nombre plus restreint d'étapes. La collecte d'échantillons d'eau n'est pas requise, car le modèle de prédiction développé en 2014 sera utilisé en 2015. Il en est de même pour les points de contrôle pour l'orthorectification, car les points acquis en 2014 seront utilisés en 2015.

#### 1- Planification, programmation et acquisition des images Pléiades

Les images Pléiades ne seront pas acquises à date fixe comme c'est le cas avec la validation de la méthodologie, mais à raison d'une fois par semaine pendant les trois mois que dureront les travaux de dragage, principalement en juillet, août et septembre. Douze images Pléiades multispectrales (2 m) seront acquises avec les caractéristiques suivantes :

- Programmation de l'acquisition d'images Pléiades pendant la période durant laquelle s'effectueront les travaux de dragage à Sandy Beach (cinq semaines en juillet et août 2015). Les spécifications à fournir au fournisseur d'images sont : l'AOI (minimum de 100 km<sup>2</sup>), les produits commandés (*bundle* – bandes panchromatique et multispectrales) ainsi que le mode d'acquisition « *Instant tasking* »
- Il faudrait que les images acquises comportent une couverture nuageuse de  $\leq 15\%$ , avec une assurance de l'absence de nuages dans la zone spécifique du dragage où il faut faire le suivi des sédiments (zone de 2 km X 2 km). En raison des conditions météorologiques qui existeront, la journée d'acquisition pourrait varier d'une semaine à l'autre;
- Pour 12 acquisitions, les coûts par image seront de 4 300 \$.

Le suivi des acquisitions sera simplifié, car il n'est pas nécessaire de synchroniser l'acquisition avec des relevés de terrain.

#### 2- Traitement des données satellitaires (12 images)

- On doit fournir les coordonnées géographiques et la description des points de contrôle terrestres qui auront été récoltés avec un GPS lors de la campagne terrain de 2014. On fournira également le modèle numérique de terrain (MNT) pour le territoire couvert par les

images : On pourrait utiliser le [SRTM](#) disponible gratuitement ou le MNT disponible auprès de la Géoboutique du MER.

- Dès leur réception, Il faudra orthorectifier les images acquises à l'aide des points de contrôle terrestres et du MNT.
- Réalisation des corrections radiométriques et atmosphériques pour les images satellite reçues. Ces corrections visent à établir la réflectance à la surface de l'eau à partir du signal capté par les images satellite. Le modèle de transfert radiatif utilisé devra prendre en compte les coefficients de calibration du capteur, les conditions d'éclairement, l'angle de visée du capteur, ainsi que la diffusion et l'absorption par les constituants de l'atmosphère (gaz et aérosols). Il est recommandé d'utiliser la méthode des cibles obscures étant donné la faible réflectance de l'eau.

### 3- Estimation de la concentration des sédiments en suspension et cartographie

- Rendre disponible le modèle empirique d'estimation de la concentration des sédiments en suspension (CSS) développé en 2014.
- Utilisation du modèle empirique d'estimation de la CSS obtenu pour estimer les concentrations de sédiments sur l'ensemble de la zone d'étude. Pour chacune des dates d'acquisition, il produira une cartographie des CSS par classe de 5 à 10 mg/l sous une forme matricielle (TIF) d'une résolution de 0,5 m et avec la projection UTM 20.

### 4- Rapport de projet

- À la fin des travaux de dragage, on devra fournir un rapport final décrivant le déroulement du projet, les résultats obtenus ainsi que ses recommandations.

## 6.3. **Coûts et échéancier**

Le tableau 3 montre les coûts de réalisation des activités prévues pour l'application de la méthodologie d'estimation de la CSS à partir d'imagerie satellitaire multispectrale en 2015. Les coûts de réalisation sont estimés à 70 250 \$, dont 51 600 \$ en acquisition d'images Pléiades. Les efforts requis sont de 27 jours-personnes. Les travaux se dérouleront approximativement de la mi-juin à la fin septembre 2015. Ces informations seront validées dans le rapport final.



Activité	Efforts Jrs- personnes	Coûts de main- d'oeuvre (\$)	Autres coûts (\$)
1- Planification, programmation et acquisition de 12 images Pléiades de 100 km <sup>2</sup> .	5	3 250	51 600
2- Traitement des données satellitaires (12 images)	10	7 000	-
3- Estimation de la CSS et cartographie	10	7 000	
4- Rapport de projet	2	1 400	-
<b>TOTAL</b>	<b>27</b>	<b>18 650</b>	<b>51 600</b>

**Tableau 3 : Efforts et coûts de réalisation des activités prévues pour l'application de la méthodologie d'estimation de la CSS en 2015**

## 7. Références

- Bouroubi Y., F. Cavayas et N. Tremblay, 2010. Les Corrections Radiométriques Des Images Multispectrales. Éditions Universitaires Européennes.
- CCME (Conseil canadien des ministres de l'Environnement). 2011. Manuel des protocoles d'échantillonnage pour l'analyse de la qualité de l'eau au Canada. ISBN 978-1-896997-79-7 PDF. 211 pages.
- Ekercin S. 2007. Water Quality Retrievals from High Resolution Ikonos Multispectral Imagery: A Case Study in Istanbul, Turkey. *Water Air Soil Pollut* (2007) 183:239–251.
- Froidefond, J.M., F. Lahet, C. Huc, D. Doxaran, D. Guiral, M.T. Prost, J.-F. Ternon. 2004. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. *Marine Geology* 208 (2004) 153–168
- Long, C. M. et Pavelsky T. M. 2013. Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. *Remote Sensing of Environment* 129 (2013) 197–209.
- Onderka, M et Rodný, M. 2010. Can Suspended Sediment Concentrations be estimated from Multispectral Imagery using only Image-derived Information? *J. Indian Soc. Remote Sens.* (March 2010) 38: 85-97.
- Shen Fang, Yunxuan Zhou, Jiufa Li, Qing He et Wouter Verhoef. 2013. Remotely sensed variability of the suspended sediment concentration and its response to decreased river discharge in the Yangtze estuary. *Continental Shelf Research* 69(2013)52–61.
- Villar, R. E., Martinez, J-M, Le Texier, M., Guyot, J-L, Fraizy, P. Meneses R et De Oliveira E. 2013. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences* 44 (2013) 45-54.
- Volpe V., Silvestri, S. et Marani M. 2011. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters *Remote Sensing of Environment* 115 (2011) 44–54.

Annexe 1



Quadrat	Latitude	Longitude
1	48,87470'	-64,53680'
2	48,86670'	-64,51240
3	48,85820'	-64,49860'
4	48,85820	-64,48180'
5	48,84960'	-64,48830'
6	48,84530'	-64,47520'
7	48,85380'	-64,46870'
8	48,85140'	-64,45190'
9	48,84090'	-64,45980'
10	48,83180'	-64,46680'
11	48,83500'	-64,44230'
12	48,84550'	-64,43430
13	48,83940'	-64,41990'
14	48,82940	-64,42560'
15	48,82480'	-64,41200'



*Travaux publics et Services  
gouvernementaux Canada (TPSGC)*

**Développement des méthodologies d'application et des devis  
de validation et de démonstration :**  
Le suivi des concentrations de sédiments en mer

*Rapport préliminaire : modélisation*

*Août 2014*

## TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	2
2. RAPPELS SUR LA MÉTHODOLOGIE D'ÉLABORATION DU MODÈLE .....	2
3. LES IMAGES PLÉIADES.....	3
4. CALCUL DES RÉFLECTANCES.....	5
5. RELATIONS DES RÉFLECTANCES DE SURFACE AVEC LA TURBIDITÉ ET LA CSS .....	5
6. TEST DE QUELQUES MODÈLES .....	7
6.1. Modèles avec rapports de bandes spectrales .....	7
6.2. Modèle de régression en fonction de plusieurs réflectances.....	8
6.3. Modèles utilisant une seule bande spectrale .....	8
6.4. Ajustement du modèle suite à des acquisitions futures .....	10
7. CARTOGRAPHIE DE LA CSS : EXEMPLES .....	10
8. CONCLUSION .....	12
9. RÉFÉRENCES.....	12

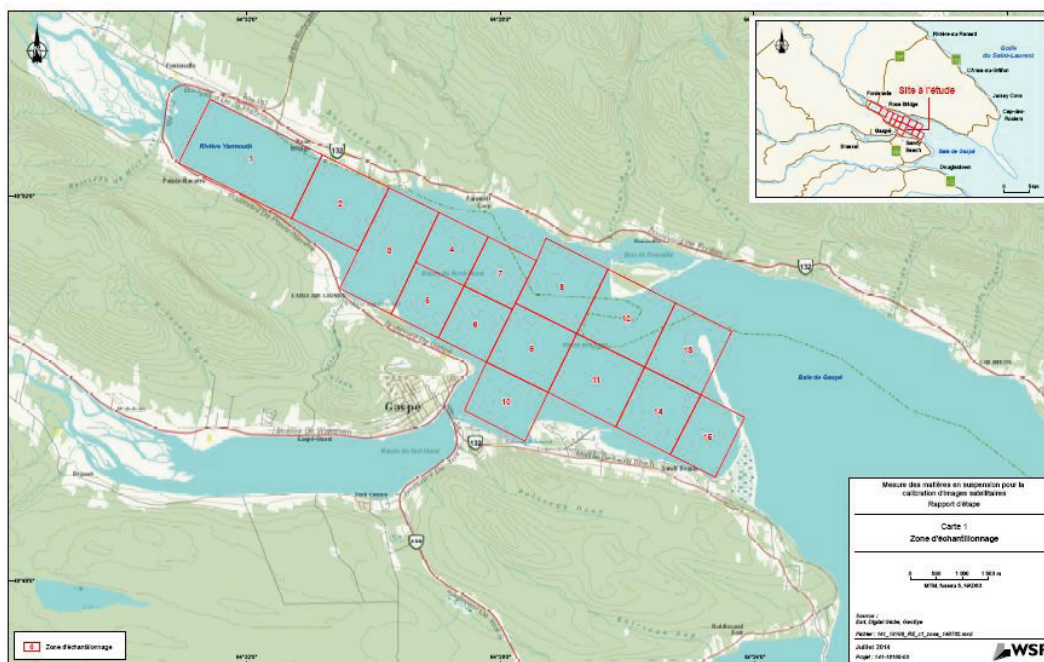
## 1. Introduction

Ce document décrit les tests de modélisation réalisés dans le cadre d'un projet portant sur l'estimation de la concentration des sédiments en suspension dans la Baie de Gaspé à partir des images satellites Pléiades. Cette application permettra de surveiller ce paramètre lors des opérations de dragage. Les détails de ce projet ont été décrits dans un rapport communiqué à Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) en juin 2014.

## 2. Rappels sur la méthodologie d'élaboration du modèle

La méthodologie identifiée lors de la revue de littérature, et qui semble la plus appropriée dans le contexte du projet, est l'utilisation d'un modèle empirique pour l'estimation de concentration des sédiments en suspension (CSS, en mg/l) à partir des images d'observation de la Terre (OT) de haute résolution.

Deux images Pléiades ont été acquises les 8 et 16 juin 2014. Des mesures de turbidité de l'eau et de CSS (géolocalisées à l'aide d'un GPS) ont été réalisées en concomitance avec le passage du satellite. La collecte des échantillons d'eau a été réalisée selon un découpage en 15 zones qui permet de couvrir l'ensemble de la région d'étude (Figure 1). Le protocole des mesures de la CSS a été décrit en détail dans le rapport de juin 2014.



**Figure 1 : Découpage de la zone d'étude pour l'échantillonnage in-situ de la turbidité de l'eau et de la CSS**

### 3. Les images Pléiades

La constellation de satellites Pléiades a été retenue pour les raisons suivantes :

- Capacités d'acquisition très favorables à une utilisation opérationnelle : revisite quotidienne et mode de programmation instantanée (*Instant Tasking*) permettant de programmer le satellite 24 à 48 heures à l'avance ;
- Disponibilité des bandes spectrales requises pour l'application ;
- Résolution spatiale de 2 mètres (en mode multispectral) adaptée à l'échelle de la zone de dragage ;
- Résolution radiométrique de 12 bits, ce qui est particulièrement important pour discerner les faibles réflectances des surfaces aquatiques.

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.

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 affectés par plusieurs facteurs indépendant de l'information recherchée dont : le gain du capteur, les conditions d'éclairement 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 et 3 illustrent les images Pléiades acquises les 8 et 16 juin 2014, avec une indication des points de mesure *in-situ*. La réflectance de l'eau montre une variabilité importante dans les bandes du visible; nous verrons par la suite que cette réflectance dépend fortement de la CSS.

Notons qu'une acquisition complémentaire sera planifiée pour la fin de l'été 2014, idéalement dans une situation de CSS élevée suite à de fortes pluies. Ceci permettra de couvrir une plus large gamme dynamique de la CSS.





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



## 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 :

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

Les valeurs de 'Gain' et 'Offset' sont fournis 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  $\theta_s$  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) :

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

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 et d'un certain nombre d'intrants (Tableau 1).

Ces traitements sont réalisés automatiquement dans le logiciel REFLECT.

**Tableau 1 : Intrants permettant de calculer les paramètres atmosphériques pour les corrections atmosphériques des images Pléiades**

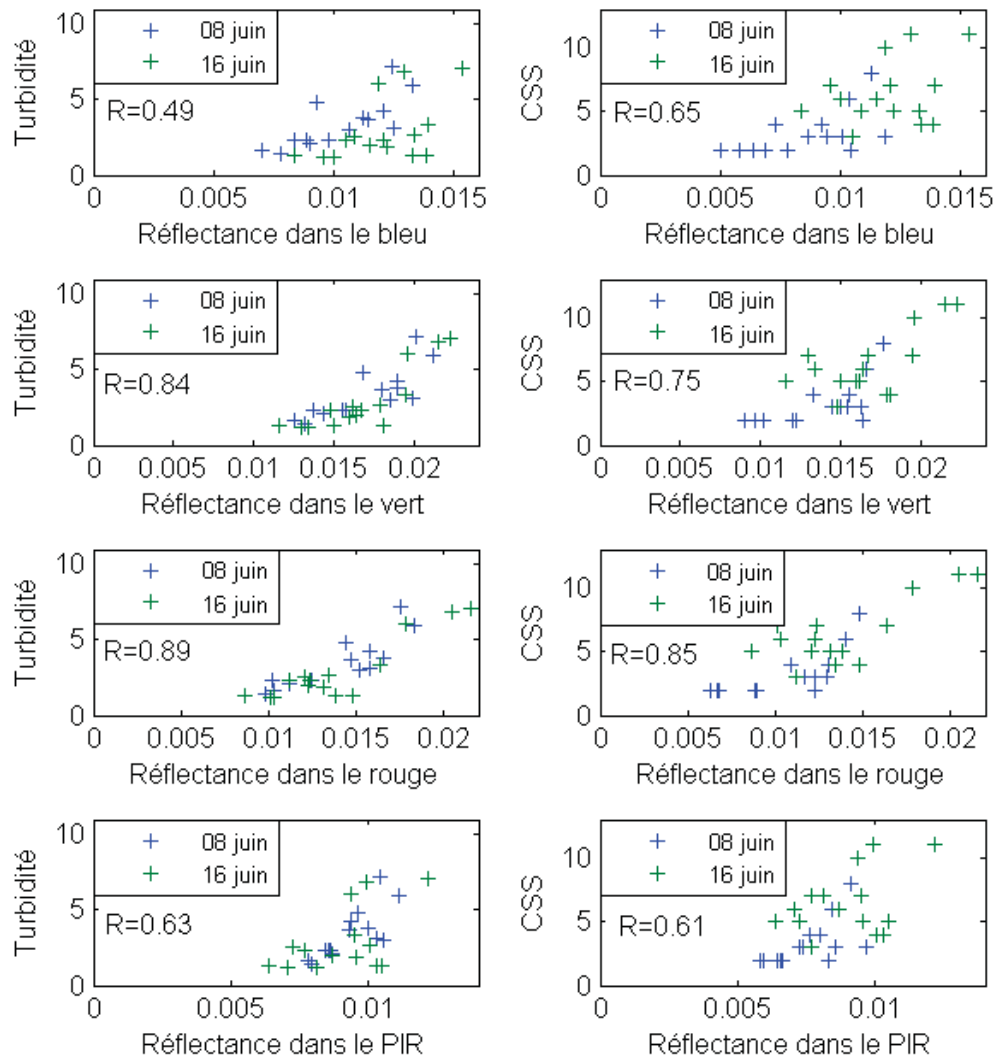
Date de l'image	Heure GMT (TL+4)	Coordonnées	Atmosphère (10h – 12h)				
			Station météo	T° C	Hr %	Visibilité (km) & AOD	Vent (km/h)
2014-06-08	15:26:03	64d27'26.52"W	Gaspé A	21	20	24 & 0.05	13
2014-06-16	15:13:54	48d50'43.64"N	64°28'47"O 48°46'31"N	18	42	24 & 0.06	21

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

La figure 4 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 deux 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 (CSS peut dépasser les 100 mg/L).

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 4. Corrélations entre les réflectances de surface issues des images Pléiades et les mesures de turbidité de l'eau et de CSS (mg/L)**

## 6. Test de quelques modèles

Plusieurs approches ont été proposées afin d'estimer la turbidité de l'eau ou la concentration des matières en suspension à partir des images d'OT, tel que rapporté par Long et Pavelsky (2013). Certains de ces modèles seront testés dans cette section. Dans notre cas, nous allons utiliser 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  $a + b \cdot R_1/R_2 + c \cdot (R_1/R_2)^2$  (Toplis et al., 1990 ; Ritchie & Cooper, 1991).

Ces modèles sont trop 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 trop élevés au niveau de la sortie du modèle. Ces modèles sont donc à proscrire. De plus, les tests réalisés avec nos données n'ont montré aucun résultat intéressant avec cette approche (Figure 5).

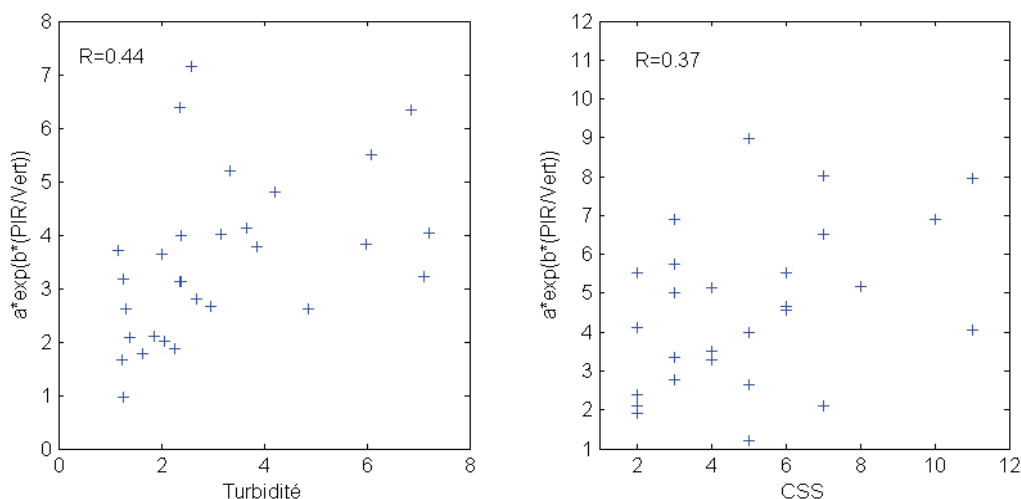
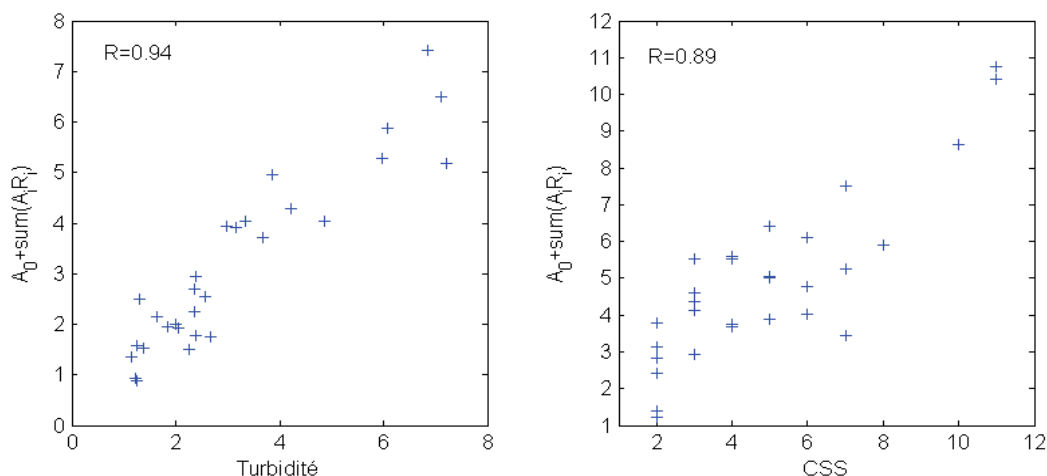


Figure 5. Test d'un modèle basé sur le rapport des bandes PIR et verte (Doxaran et al., 2003)

## 6.2. *Modèle de régression en fonction de plusieurs réflectances*

Ekercin (2007) propose d'utiliser une régression multiple du type :  $CSS = A_0 + \sum(A_i * R_i)$ , 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 6). Toutefois, la robustesse de cette approche n'est pas garantie car l'erreur sur l'output est affectée par la combinaison des erreurs sur tous les inputs.

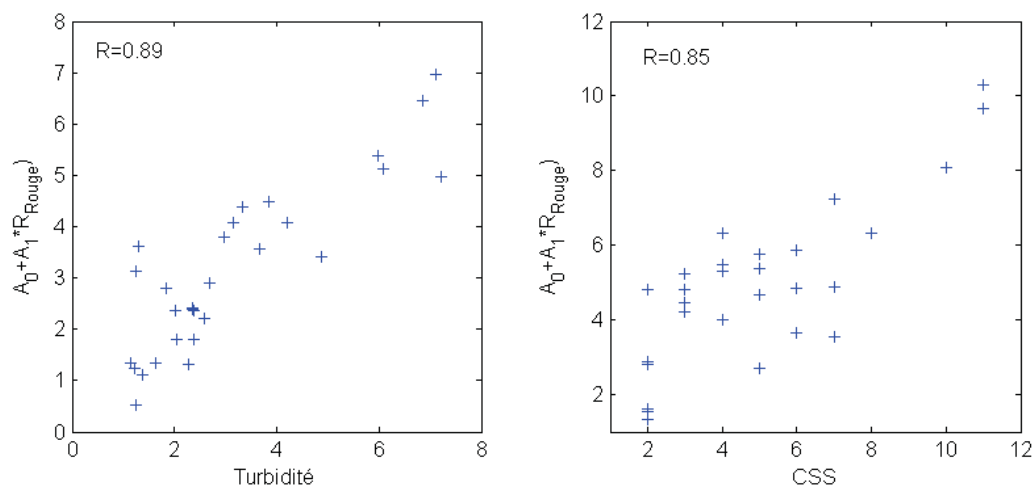


**Figure 6. Test d'un modèle basé sur une régression en fonction des bandes bleue, verte, rouge et PIR**

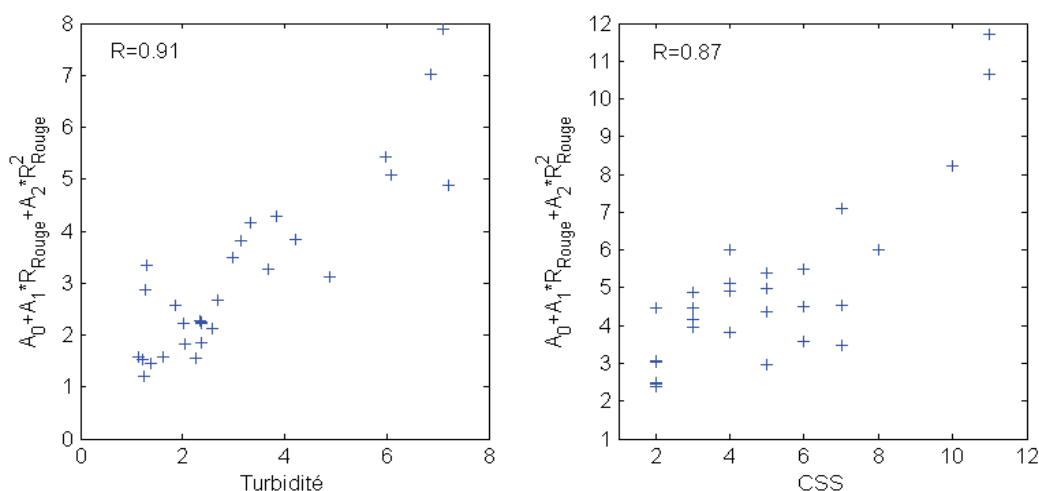
## 6.3. *Modèles utilisant une seule bande spectrale*

Plusieurs auteurs 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 (Hellweger et coll. 2007 ; Wang et al., 2008 ; Chu et al., 2009 ; Dekker et al., 2001 ; Keiner & Yan, 1998). Cette approche, en plus d'être simple et peu sensible aux erreurs, donne de bons résultats (Figure 7).

Un modèle quadratique ( $a + b \cdot R_{\text{Rouge}} + c \cdot R_{\text{Rouge}}^2$ ) améliore légèrement les corrélations (Figure 8); la pertinence d'utiliser ou non cette forme de relation dépendra des résultats que nous obtiendrons pour des valeurs plus élevées de la CSS que nous souhaitons avoir lors de la prochaine campagne de mesure.



**Figure 7. Test d'un modèle linéaire en fonction de réflectance de la bande rouge**



**Figure 8. Test d'un modèle quadratique en fonction de réflectance de la bande rouge**

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 9).

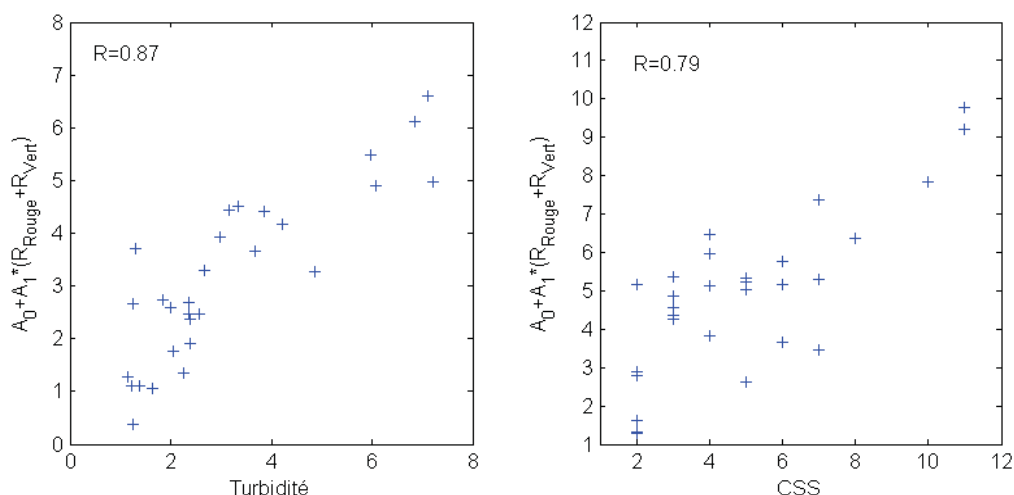


Figure 9. Test d'un modèle linéaire en fonction de la combinaison des réflectances verte et rouge

#### 6.4. Ajustement du modèle suite à des acquisitions futures

Nous avons planifié d'acquérir une troisième image Pléiades afin de couvrir un épisode de crues dues à des pluies importantes, ce qui permettrait d'avoir des valeurs élevées de la CSS. Ceci nous permettra de mieux sélectionner la forme du modèle (linéaire, quadratique ou exponentiel) et de mieux évaluer ses paramètres.

## 7. Cartographie de la CSS : exemples

À titre d'illustration, des cartes de CSS estimée ont été 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 deux dates indiquées (Figures 10 et 11).

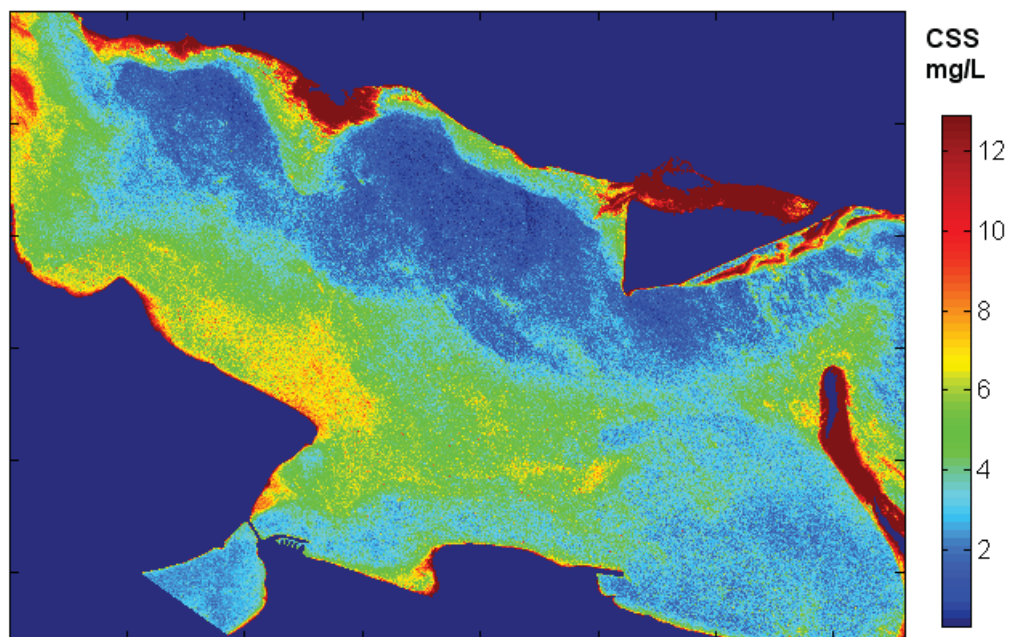


Figure 10. Concentration des sédiments en suspension (CSS) calculées à partir de la bande rouge de l'image Pléiades du 08 juin 2014

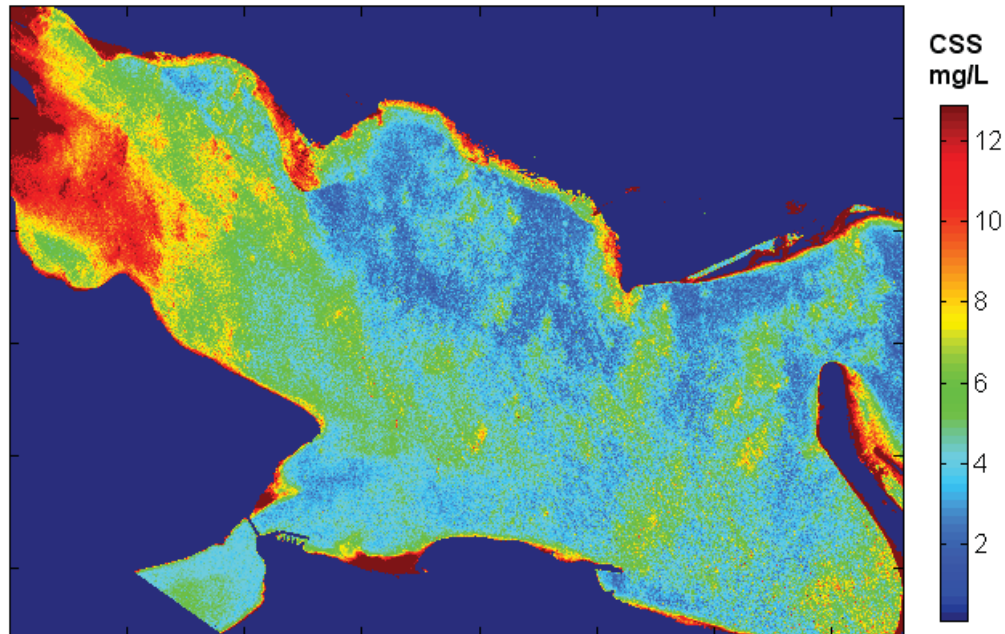


Figure 11. Concentration des sédiments en suspension (CSS) calculées à partir de la bande rouge de l'image Pléiades du 16 juin 2014

## 8. Conclusion

Nous pouvons conclure que les images Pléiades offrent une excellente source de données (en termes 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 préliminaire s'approchent des 90%, et ce malgré la faible gamme dynamique de CSS qui variant entre 2 et 11 mg/L dans notre cas. Des tests supplémentaires avec une troisième image acquise dans une situation de CSS plus élevées permettront de mieux définir, calibrer et valider le modèle proposé.

## 9. Références

- Bouroubi Y., 2009. Les corrections radiométriques des images multispectrales. Thèse de Doctorat, Université de Montréal.
- 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. *Journal of Glaciology*, 55(194), 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* (2007) 183:239–251.
- 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.
- 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. and T. M. Pavelsky, 2013. Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment, *Remote Sensing of Environment* 129 (2013) 197–209.

Ritchie, J. C., & Cooper, C. M. (1991). An algorithm for estimating surface suspended sediment concentrations with Landsat MSS digital data1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 27(3), 373–379.

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.

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.




RAPPORT D'ÉTAPE  
MESURE DES MATIÈRES  
EN SUSPENSION POUR  
LA CALIBRATION D'IMAGES  
SATELLITAIRES

Projet n° 141-18109-00

Préparé pour :  
**Travaux publics et Services gouvernementaux Canada**

Date : JUILLET 2014

Préparé par :

  
Mélanie Lévesque  
Biologiste, M.Sc. Océanographie  
Chargée de projet

WSP Canada Inc.  
5355, boul. des Gradins  
Québec (Québec) G2J 1C8

Téléphone : 418 623-2254  
Télécopieur : 418 624-1857  
[www.wspgroup.com](http://www.wspgroup.com)

---

## ÉQUIPE DE RÉALISATION

### ***Travaux publics et Services gouvernementaux Canada***

Chargé de projet : Marc Desrosiers

### ***WSP Canada Inc.***

Directeur de projet : Patrick Charbonneau

Chargée de projet : Mélanie Lévesque

Membres de l'équipe de terrain : Julie Simard  
Thomas Fortin-Chevalier  
Jean-Philippe Denis

Cartographie : Line Savoie

Traitement de texte et édition : Linette Poulin

---

### ***Référence à citer :***

WSP. 2014. *Mesure des matières en suspension pour la calibration d'images satellitaires. Rapport d'étape*. Rapport de WSP à Travaux publics et Services gouvernementaux Canada. 25 p. et annexes.

# TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
ÉQUIPE DE RÉALISATION.....	I
TABLEAUX .....	V
FIGURES .....	V
CARTES.....	V
ANNEXES .....	V
1. INTRODUCTION .....	1
2. ZONE D'ÉTUDE .....	3
2.1 GÉNÉRALE .....	3
3. MÉTHODOLOGIE.....	7
3.1 GÉNÉRALITÉ.....	7
3.2 EMBARCATION .....	7
3.3 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET OCÉANOGRAPHIQUES.....	8
3.4 MATIÈRES EN SUSPENSION ET TURBIDITÉ .....	8
3.5 ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU .....	11
3.6 ANALYSES.....	11
4. RÉSULTATS.....	13
4.1 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET OCÉANOGRAPHIQUES.....	13
4.2 TURBIDITÉ ET MATIÈRES EN SUSPENSION .....	13
4.3 RELATION ENTRE LES TENEURS EN MES ET LA TURBIDITÉ .....	19
4.4 TRANSPARENCE DE L'EAU .....	19
4.5 POINTS DE CONTRÔLE TERRESTRE.....	19
5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	23
6. RÉFÉRENCES .....	25
6.1 SITE INTERNET .....	25



## TABLEAUX

Tableau 1	Coordonnées géographiques des stations.....	8
Tableau 2	Conditions météorologiques et océanographiques .....	13
Tableau 3	Turbidité et matières en suspension mesurées dans la zone d'étude lors de la campagne 1, 8 juin 2014 .....	14
Tableau 4	Turbidité et matières en suspension mesurées dans la zone d'étude lors de la campagne 2, 16 juin 2014 .....	14
Tableau 5	Mesures de la transparence de l'eau enregistrées aux stations d'échantillonnage à l'aide d'un disque de Secchi.....	21

## FIGURES

Figure 1	Relation entre la concentration en MES et la turbidité de la couche d'eau de surface lors de la campagne 1, 8 juin 2014. ....	20
Figure 2	Relation entre la concentration en MES et la turbidité de la couche d'eau de surface lors de la campagne 2, 16 juin 2014. ....	20

## CARTES

Carte 1	Zone d'échantillonnage .....	5
Carte 2	Stations d'échantillonnage des campagnes 1 et 2.....	9
Carte 3	Matières en suspension et turbidité de l'eau de surface Campagne 1 .....	15
Carte 4	Matières en suspension et turbidité de l'eau de surface Campagne 2 .....	17

## ANNEXES

Annexe A	Fiche technique de l'embarcation
Annexe B	Reportage photographique - Matériels de terrain
Annexe C	Reportage photographique - Conditions météo
Annexe D	Rapports d'analyse de laboratoire

# 1. INTRODUCTION

En 2015, Transports Canada compte entreprendre des travaux de restauration des sédiments contaminés au sud du quai commercial de Gaspé (Sandy Beach). Le dragage sur une superficie approximative de 50 000 m<sup>2</sup> pourrait générer une remise en suspension de sédiments contaminés (cuivre et hydrocarbures aromatiques polycycliques) dans la colonne d'eau et engendrer des impacts négatifs dans le havre de Gaspé. Dans cette optique, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC), en collaboration avec l'Agence spatiale canadienne, souhaite mettre sur pied un programme de suivi des matières en suspension (MES) à partir d'images satellitaires.

TPSGC a mandaté WSP Canada Inc. (WSP)<sup>1</sup> afin d'effectuer les campagnes de terrain visant à évaluer les variations de turbidité présente dans la zone d'étude et prélever des échantillons d'eau de surface afin d'en déterminer les MES présentes, selon différentes conditions hydriques. Le groupe Effigis GeoSolution a pour sa part le mandat d'assurer la prise d'images satellitaires ainsi que d'effectuer leur calibration et les analyses subséquentes en lien avec les valeurs réelles de MES et de turbidité obtenues sur le terrain.

L'objectif principal de ce mandat vise donc à obtenir des valeurs de MES et de turbidité *in situ* afin de calibrer et corriger les images satellitaires prises pour ce territoire.

Le présent rapport d'étape expose la méthodologie d'échantillonnage utilisée et dresse le portrait sommaire des résultats obtenus à la suite de la tenue des deux premières campagnes de terrains effectués dans le havre de Gaspé, respectivement le 8 et le 16 juin 2014.

---

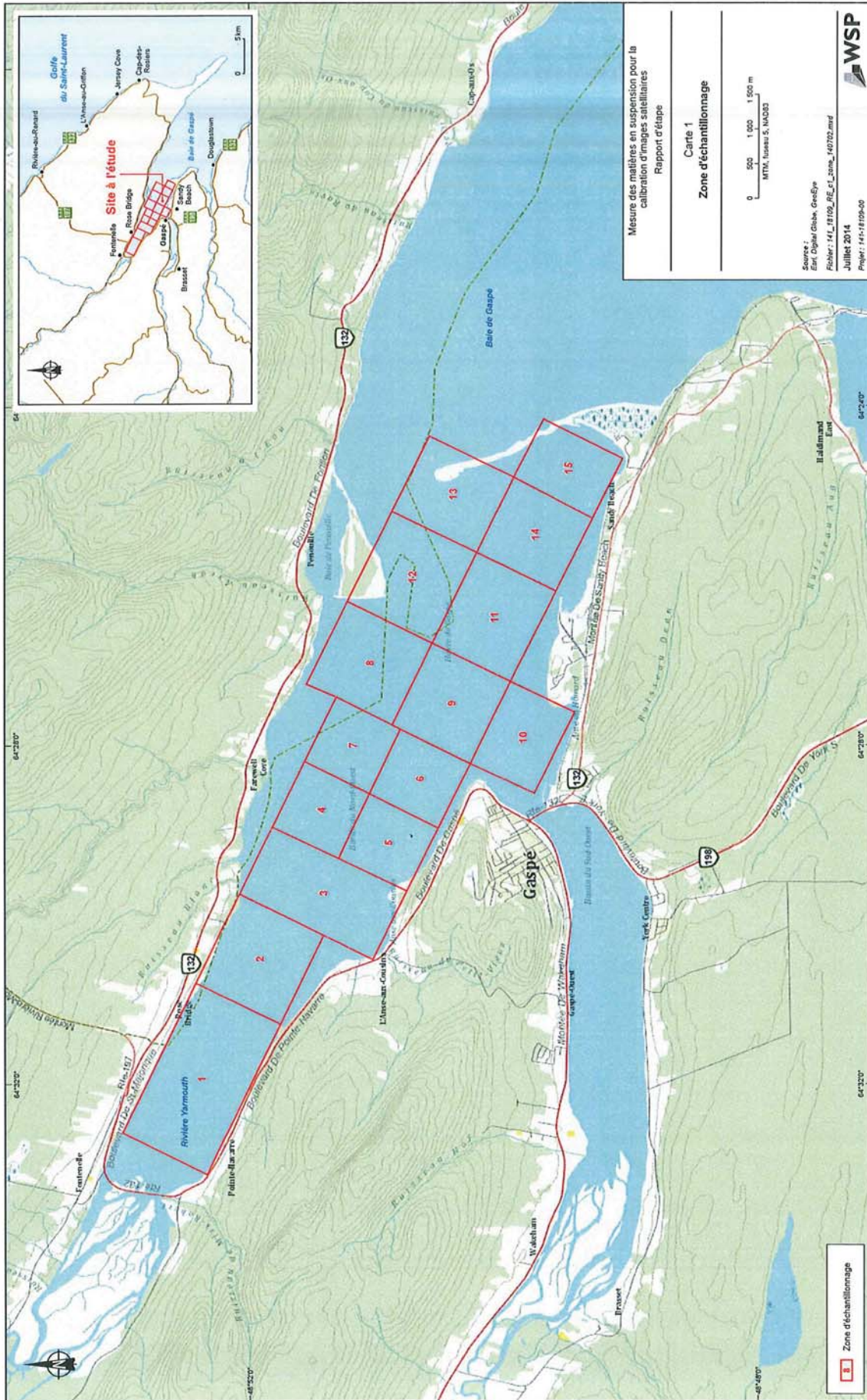
<sup>1</sup> Auparavant GENIVAR inc.

## 2. ZONE D'ÉTUDE

### 2.1 GÉNÉRALE

La zone d'étude se situe en Gaspésie, plus précisément dans le havre de Gaspé. La zone définie couvre un territoire de l'embouchure de la rivière Yarmouth jusqu'à la pointe de Sandy Beach, représentant près de 25 km<sup>2</sup> de superficie. La zone d'acquisition prévue des images satellitaires de Pléiade a été divisée en 15 sections (carte 1). Le plan d'échantillonnage initial vise d'ailleurs à échantillonner une station pour chacune de ces sections, de manière à optimiser la couverture du territoire d'acquisition satellitaire défini.







## 3. MÉTHODOLOGIE

### 3.1 GÉNÉRALITÉ

Les deux campagnes de terrain ont été effectuées le 8 et le 16 juin dernier. La première campagne a été assurée par une équipe de WSP - Québec, soit mesdames Mélanie Lévesque (océanographe) et Julie Simard (géomorphologue). Une équipe du bureau de WSP – Gaspé, composée de messieurs Thomas Fortin-Chevalier (ingénieur) et Jean-Philippe Denis (technicien), a complété les travaux de la seconde campagne.

Lors des préparatifs des travaux de terrain, une localisation préliminaire de 15 stations d'échantillonnage a d'abord été établie en fonction des profondeurs d'eau retrouvée sur les cartes marines. Une fois sur l'eau, les stations ont dû être légèrement relocalisées étant donné les conditions de navigations présentes lors des journées d'échantillonnage. À titre d'exemple, les faibles profondeurs d'eau dans la section 1 en condition de marée descendante ont nécessité le déplacement de la station vers la section 2. Malgré tout, une bonne couverture de territoire a été assurée à chacune des campagnes (carte 2). Les coordonnées pour les deux campagnes sont à toute fin pratique les mêmes (tableau 1). Notons que ces coordonnées ont été recueillies à l'aide d'un GPS assurant une précision de l'ordre de 3 m. Pour chacune des stations, les informations suivantes ont été recueillies :

- conditions météorologiques (présence d'une couverture nuageuse, vent, etc.);
- condition de la mer (présence de vague);
- heure et date de l'échantillonnage;
- coordonnées géographiques en degré décimal (WGS 84);
- échantillon d'eau de surface ( $\leq 30$  cm de profondeur);
- données de turbidité ( $\leq 30$  cm de profondeur);
- données sur la transparence de l'eau par l'utilisation d'un disque de Secchi;
- autres observations pertinentes (p. ex. présence de débris).

### 3.2 EMBARCATION

Aux fins des travaux, les services du chantier naval Forillon ont été retenus. Ces derniers ont permis de fournir l'embarcation nécessaire à l'échantillonnage des deux campagnes, en plus de l'expertise d'un capitaine connaissant la zone d'étude concernée. Cette embarcation, munie d'un GPS (Garmin 78S) et d'un profondomètre, a permis d'assurer le positionnement le plus précis possible des stations d'échantillonnage. Le nécessaire des équipements de sécurité était également fourni par l'équipe du chantier naval. Ces informations ont d'ailleurs été détaillées dans le plan de santé et sécurité remis au gestionnaire de service avant le début des travaux sur l'eau (WSP, 2014). À titre indicatif, la fiche technique du bateau utilisé pour l'échantillonnage est présentée à l'annexe A.

Tableau 1. Coordonnées géographiques des stations

CAMPAGNE 1			CAMPAGNE 2		
STATION	08-juin 2014		STATION	16-juin 2014	
	LAT (DD)	LONG(DD)		LAT (DD) N	LONG(DD)
01	48,86703	-64,50515	01	48,86702	-64,50515
02	48,86102	-64,50102	02	48,86107	-64,50110
03	48,85817	-64,49870	03	48,85812	-64,49880
04	48,85827	-64,48163	04	48,85823	-64,48148
05	48,84937	-64,48862	05	48,84932	-64,48833
06	48,84547	-64,47483	06	48,84568	-64,47473
07	48,8536	-64,46862	07	48,85358	-64,46845
08	48,85153	-64,45182	08	48,85157	-64,45167
09	48,84095	-64,45985	09	48,84098	-64,45972
10	48,83163	-64,46668	10	48,83148	-64,46643
11	48,83495	-64,44235	11	48,83512	-64,44262
12	48,84543	-64,43427	12	48,84518	-64,43403
13	48,83928	-64,41958	13	48,83935	-64,41977
14	48,82943	-64,42518	14	48,8295	-64,42513
15	48,8248	-64,41212	15	48,82487	-64,41205

### 3.3 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET OCÉANOGRAPHIQUES

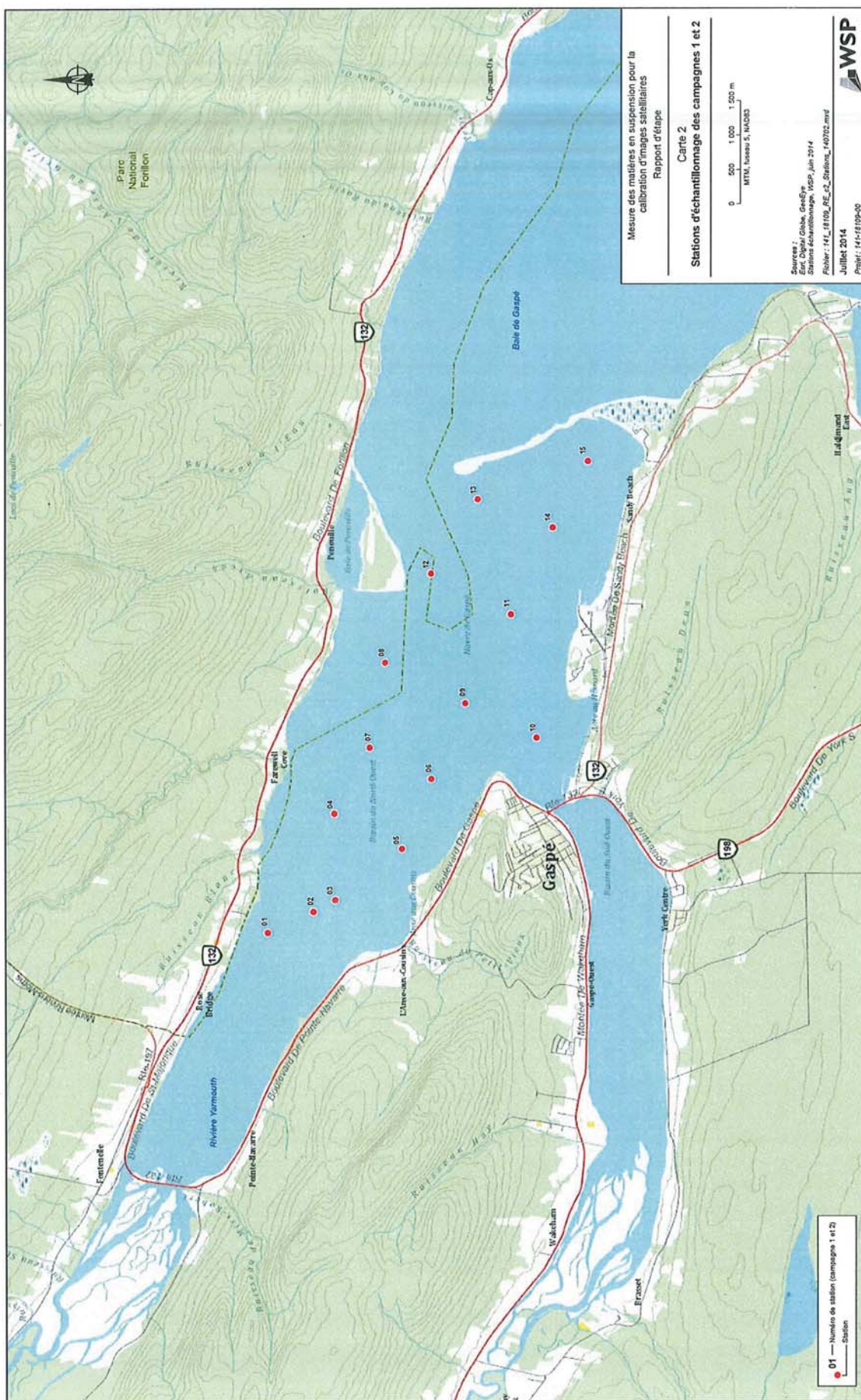
Préalablement au déploiement de l'équipe de terrain, une première analyse des conditions météorologiques a été effectuée via les conseils de monsieur André Cantin, météorologiste d'Environnement Canada. Dans un premier temps, monsieur Cantin fournissait une première prévision en lien avec les dates d'acquisitions satellitaires. Une fois les conditions optimales réunies (absence ou présence faible de couverture nuageuse, faible vent), l'équipe de terrain se mobilisait le matin même afin de constater les conditions réelles. De là, les conditions étaient répertoriées au carnet de terrain en plus de la prise de photographies pour illustrer le tout. Il en était également ainsi pour les conditions océanographiques lors de l'échantillonnage. Tout changement dans ces conditions pendant l'échantillonnage était également répertorié au carnet de terrain.

### 3.4 MATIÈRES EN SUSPENSION ET TURBIDITÉ

Pour chaque station, un prélèvement d'eau de surface (25 cm de profondeur) a été recueilli. Pour ce faire, deux bouteilles de 1 L fournies par le laboratoire d'analyse ont été remplies à chaque station. Notons qu'un seul des deux échantillons était dédié à l'analyse subséquente. En cas de remplacement pour des raisons de bris d'équipement, de contrôle de qualité au laboratoire ou pour validation, le second échantillon pourrait alors être utilisé.

Le numéro de la station ainsi que l'heure et la date d'échantillonnage ont dûment été inscrits sur chacune des bouteilles afin d'identifier chaque échantillon en bonne et due forme (annexe B).





Une fois le prélèvement d'eau complété, une mesure de la turbidité *in situ* a également été effectuée via l'utilisation d'une sonde de turbidité (marque RBR modèle Concerto) (annexe B). Lorsque cette sonde est immergée dans la colonne d'eau, une mesure de turbidité exprimée en UTN (unités de turbidité néphélométriques) associée aux profondeurs rencontrées est enregistrée. Les mesures de turbidité ont ainsi été effectuées pour chacune des stations aux mêmes profondeurs auxquelles les échantillons d'eau ont été prélevés, soit à 25 cm de profondeur.

### 3.5 ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Afin d'effectuer une analyse qualitative de la transparence de l'eau, un disque de Secchi a été utilisé à chacune des stations. Ce disque bicolore, fixé au bout d'une corde lestée, permet d'obtenir la profondeur de la transparence de l'eau (annexe B).

### 3.6 ANALYSES

Une fois tous les prélèvements d'eau complétés, l'ensemble des échantillons ont été conservés à 4° C, conformément au « *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyse environnementale* » du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2008). Ces derniers ont par la suite été acheminés au laboratoire d'analyse AGAT de Québec, dans les délais recommandés. Ce laboratoire, accrédité par le MDDELCC, a ainsi eu la responsabilité d'effectuer les analyses de MES.

La méthode d'analyse en laboratoire consiste à filtrer un volume connu d'eau (p. ex. 1 L) sur un filtre de 1,5 µm, préalablement pesé. Le résidu séché est par la suite pesé afin d'en obtenir une concentration en mg/L.



## 4. RÉSULTATS

### 4.1 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET OCÉANOGRAPHIQUES

Étant donné les restrictions météorologiques nécessaires pour l'acquisition d'images satellitaires claires et adéquates pour les corrections et analyses subséquentes, la météo présente lors des deux campagnes se devait d'être relativement clémente. Pour les deux campagnes, un ciel dégagé avec des vents égaux ou inférieurs à 25 km/h en direction nord a été observé (tableau 2). Le dossier photographique présenté à l'annexe C permet de visualiser les conditions rencontrées lors des deux campagnes. Notons que d'après l'équipe d'Effigis GeoSolutions, la qualité des images satellitaires capturées dans le cadre de ces deux campagnes est excellente pour les analyses à venir (comm. pers. Mathieu Benoit), confirmant ainsi que les conditions présentes lors des échantillonnages étaient propices pour l'atteinte des objectifs de l'étude.

Tableau 2 Conditions météorologiques et océanographiques

	COUVERTURE NUAGEUSE	VENT (FORCE; DIRECTION)	VAGUE (PRÉSENCE/ABSENCE; HAUTEUR)	PHASE DE MARÉE
Campagne 1 8 juin 2014	0 %	15 km/h; nord	Présence; hauteur moyenne de 15 cm	Étale de marée haute et jusan
Campagne 2 16 juin 2014	5 % (nuages dissipés, minces)	25 km/h; nord	Présence; hauteur moyenne de 15 cm	Fin du flot, étale et jusan

À titre d'observation, lors de la campagne 1 à la station 15, du pollen en surface a été noté alors qu'à la station 10 de la campagne 2, des débris (possiblement des algues) étaient présents à la surface de l'eau.

### 4.2 TURBIDITÉ ET MATIÈRES EN SUSPENSION

Dans le cadre des deux campagnes d'échantillonnage, la variation de turbidité enregistrée était similaire. Les valeurs minimales de 1,21 et 1,15 UTN ont respectivement été enregistrées pour les campagnes 1 et 2, alors que leurs valeurs maximales étaient de 7,21 et 7,1 UTN (tableaux 3 et 4).

Concernant les valeurs de MES pour la campagne 1, la valeur minimale de 2 mg/L a été enregistrée à six stations (07, 08, 10, 12, 14 et 15), tandis que la valeur maximale de 8 mg/L n'a été obtenue qu'à une seule station (06) (carte 3). Pour la campagne 2, la valeur minimale de 3 mg/L a été obtenue à la station 10, alors des valeurs de 10 mg/L et 11 mg/L ont été obtenues à l'embouchure de la rivière Yarmouth (stations : 01, 02, 03) (carte 4) (tableaux 3 et 4). Les certificats d'analyse indiquant l'ensemble de ces résultats sont présentés à l'annexe D.

Tableau 3

Turbidité et matières en suspension mesurées dans la zone d'étude lors de la campagne 1, 8 juin 2014

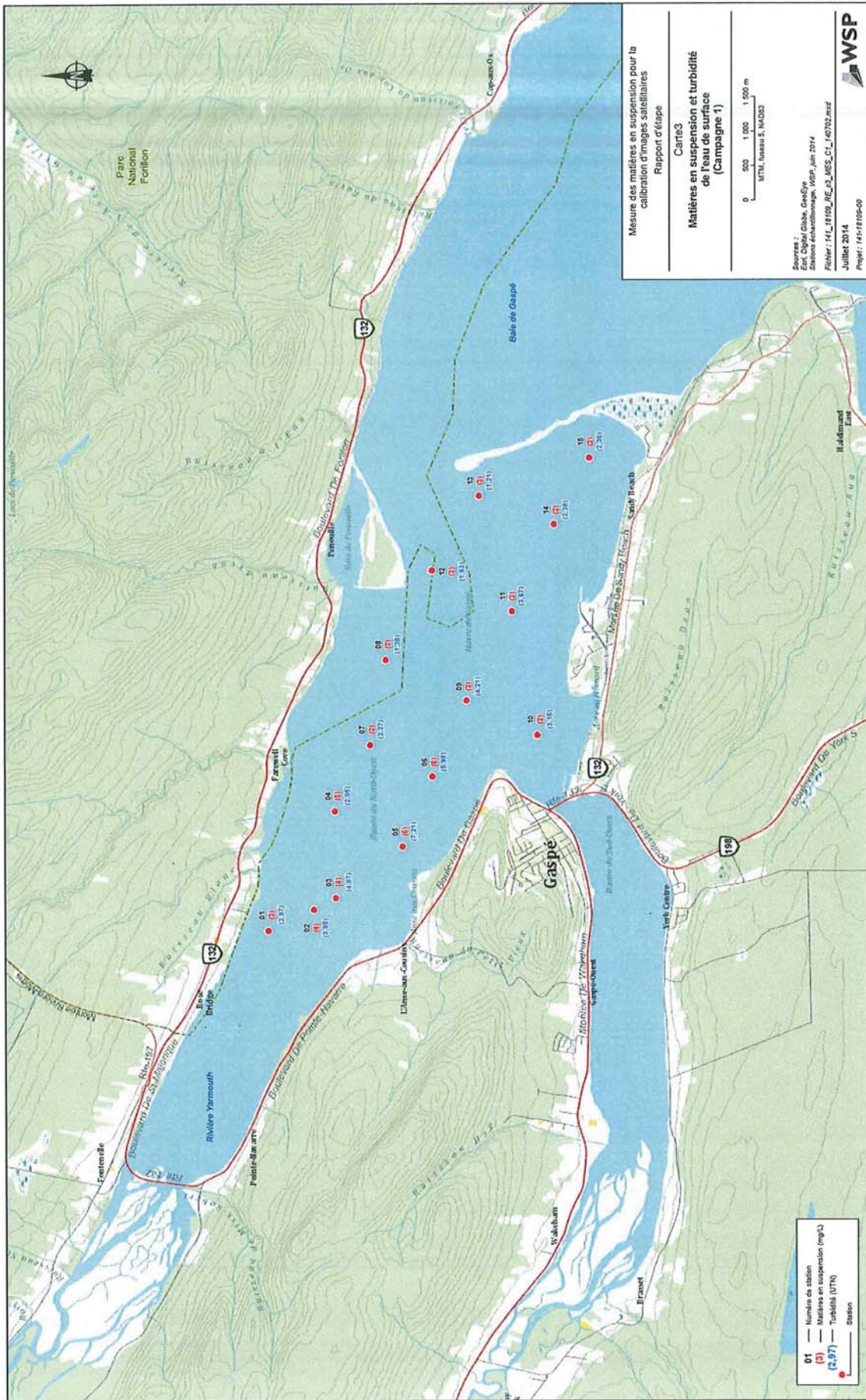
STATION	HEURE	TURBIDITÉ (UTN)	MATIÈRE EN SUSPENSION (mg/L)
01	10h04	2,97	3
02	10h14	3,85	4
03	10h22	4,87	4
04	10h38	2,05	5
05	10h48	7,21	6
06	10h57	5,98	8
07	11h07	2,27	2
08	11h16	1,38	2
09	11h26	4,21	3
10	11h35	3,15	2
11	11h49	3,67	3
12	11h58	1,63	2
13	12h09	1,21	3
14	12h18	2,38	2
15	12h27	2,35	2
étale	min	1,21	2
jusant	max	7,21	8
	moy	3,28	3,4

Tableau 4

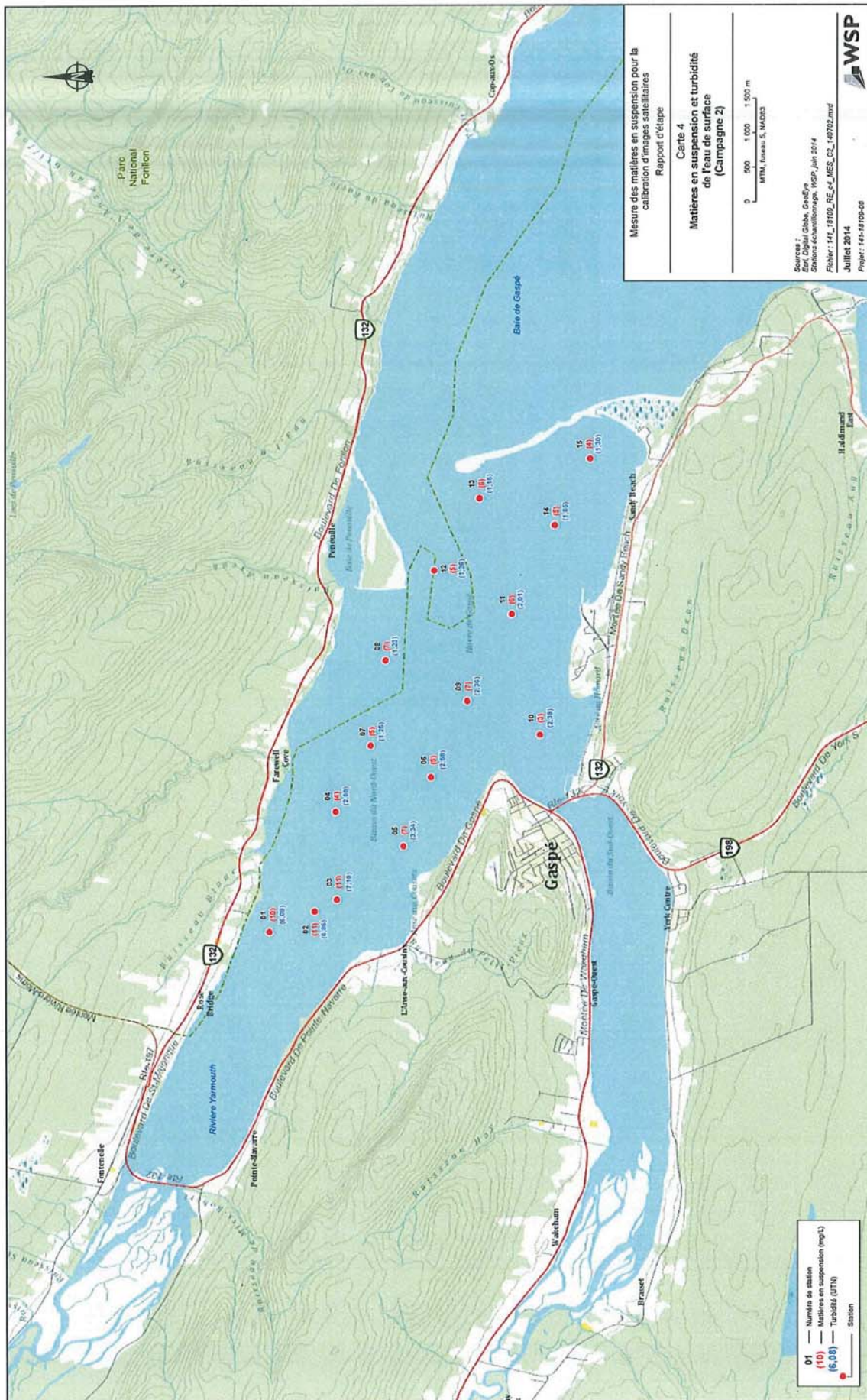
Turbidité et matières en suspension mesurées dans la zone d'étude lors de la campagne 2, 16 juin 2014

STATION	HEURE	TURBIDITÉ (UTN)	MATIÈRE EN SUSPENSION (mg/L)
01	11h55	6,08	10
02	12h06	6,86	11
03	12h12	7,10	11
04	12h23	2,68	4
05	11h17	3,34	7
06	10h57	2,58	5
07	12h33	1,25	5
08	12h43	1,23	7
09	10h39	2,36	7
10	10h20	2,38	3
11	13h51	2,01	6
12	12h54	1,26	5
13	13h05	1,15	6
14	13h33	1,85	5
15	13h19	1,30	4
étale	min	1,15	3
jusant	max	7,10	11
flot	moyenne	2,90	6,4











#### **4.3 RELATION ENTRE LES TENEURS EN MES ET LA TURBIDITÉ**

Les figures 1 et 2 présentent la relation entre les concentrations de MES et les mesures de turbidité (UTN) obtenues pour les échantillons d'eau de surface des campagnes 1 et 2. Les résultats obtenus montrent une bonne relation entre les deux paramètres mesurés, avec un coefficient de corrélation de 0,55 pour la campagne 1 et de 0,72 pour la campagne 2. Globalement, pour une même étude, la corrélation entre les MES et la turbidité peut être satisfaisante pour un même milieu à un temps donné. Par contre, la nature des particules (p. ex. station plus ou moins rapprochée de l'embouchure d'un fleuve) et la composante saisonnière peuvent avoir un effet sur cette corrélation (Service hydrographique national).

#### **4.4 TRANSPARENCE DE L'EAU**

La transparence de l'eau a également été mesurée via l'utilisation du disque de Secchi. À quelques exceptions près, la profondeur de la pénétration (verticale) de la lumière dans l'eau concorde avec les valeurs de MES et de turbidité rencontrées. Ainsi, une profondeur plus importante de la pénétration de la lumière est associée à une concentration en MES et une turbidité plus faible. À titre d'exemple, à la station 08 de la campagne 1, la profondeur associée à la transparence de l'eau était de 4,3 m avec une concentration de 2 mg/L et une turbidité de 1,38 UTN.

#### **4.5 POINTS DE CONTRÔLE TERRESTRE**

Afin de bien orthorectifier les images satellitaires, l'équipe d'Effigis GeoSolutions aura besoin d'obtenir des coordonnées précises de points de contrôle terrestre. Les services de l'entreprise d'arpenteurs-géomètres-conseils Roy, Roy et Connelly, seront ainsi requis afin de compléter ce travail. Notons que cette campagne de relevé terrestre devrait s'effectuer au cours du mois de juillet 2014. Le rapport d'arpentage ainsi que les données de localisation (carte et tableau) seront présentés dans le rapport final.

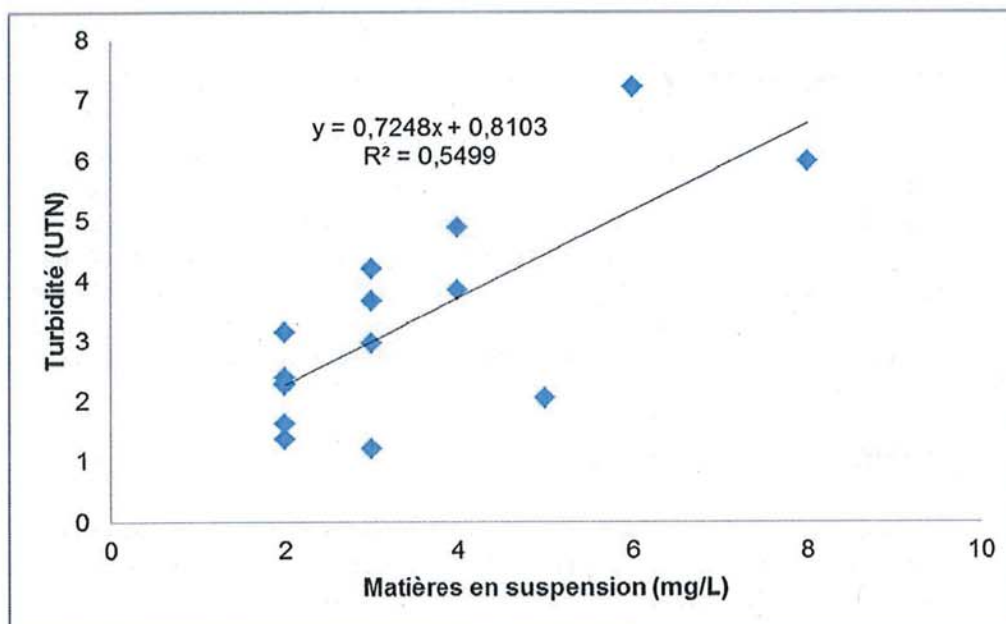


Figure 1 Relation entre la concentration en MES et la turbidité de la couche d'eau de surface lors de la campagne 1, 8 juin 2014.

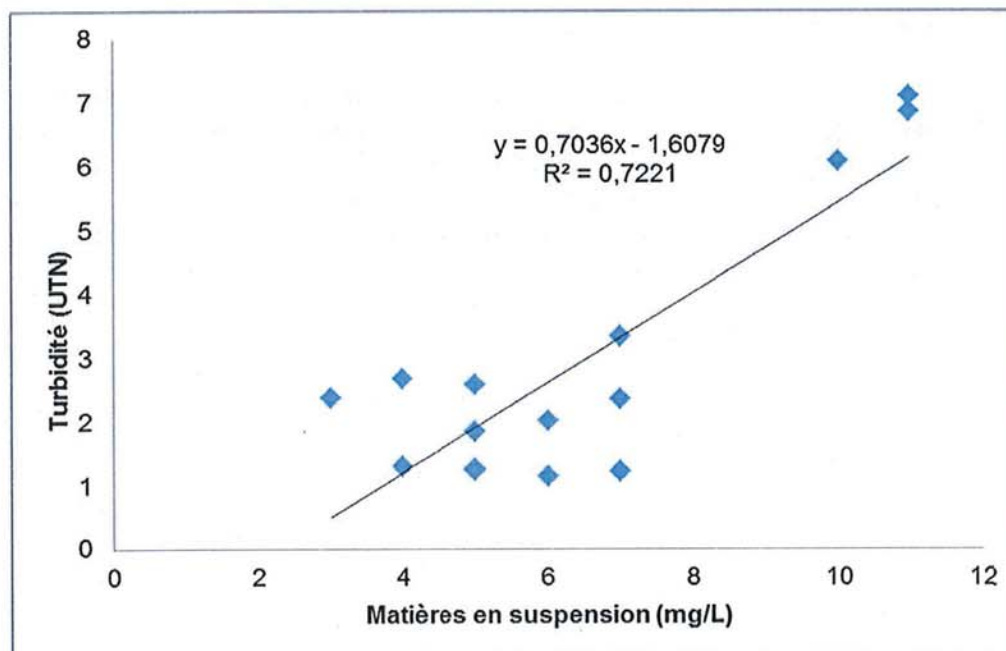


Figure 2 Relation entre la concentration en MES et la turbidité de la couche d'eau de surface lors de la campagne 2, 16 juin 2014.

Tableau 5 Mesures de la transparence de l'eau enregistrées aux stations d'échantillonnage à l'aide d'un disque de Secchi.

CAMPAGNE 1		CAMPAGNE 2	
STATION	PROFONDEUR DU DISQUE DE SECCHI (m)	STATION	PROFONDEUR DU DISQUE DE SECCHI (m)
01	3,9	01	3,0
02	3,9	02	2,6
03	3,6	03	2,1
04	4,2	04	3,1
05	2,7	05	3,1
06	2,0	06	3,4
07	3,5	07	3,8
08	4,3	08	4,0
09	2,4	09	2,4
10	3,0	10	3,0
11	2,4	11	3,7
12	3,4	12	4,0
13	2,8	13	3,5
14	3,4	14	4,2
15	3,0	15	3,7

## 5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les teneurs en MES retrouvées dans le havre de Gaspé peuvent varier selon les conditions naturelles rencontrées. L'apport de la rivière Yarmouth en période de crue ainsi que les courants de flot et de jusant génèrent des concentrations différentes en MES dans l'eau. Afin d'optimiser la variabilité des valeurs de turbidité et de MES pouvant être enregistrées dans le havre, nous proposons la tenue de la campagne n° 3 à l'automne pendant la période des grandes marées. Cette campagne permettrait possiblement de recueillir des données encore plus extrêmes, ce qui serait d'autant plus préférable pour la calibration et la correction des données satellitaires à partir des données de terrain.

## 6. RÉFÉRENCES

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC (CEAEQ). 2008. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, Cahier 1- Généralités*. 2<sup>e</sup> édition. Gouvernement du Québec. 58 p.

WSP. 2014. *Plan de santé-sécurité. Mesure des matières en suspension pour la calibration d'images satellitaires Gaspé (Qc)*. Rapport de WSP à Travaux publics et Services gouvernementaux Canada 15 p. et annexes.

### 6.1 SITE INTERNET

SERVICE HYDROGRAPHIQUE NATIONAL. 2014. Techniques de mesure de la turbidité. Site internet consulté le 25 juin 2014. Disponible [en ligne] :  
<http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/oceanographie/la-turbidite-oceanique/techniques-de-mesure/>