



Projet Seine-Aval 5 **HYMOSED**

« Modélisation du fonctionnement HYdro-MOrpho-
SEDimentaire de l'estuaire de la Seine »

Volet « Mesures »

Janvier 2018

Coordination : Florent Grasso

Co-Auteur : Romaric Verney

TABLE DES MATIERES

RESUME EXECUTIF	3
SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET	4
PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET	4
RESULTATS	5
Introduction	5
I. Suivi de la dynamique des vasières intertidales à l'aval de Tancarville	6
1.1 Méthodes	6
1.1.1 Sites d'étude	6
1.1.2 ALTUS	8
1.1.3 TLS [Terrestrial Laser Scanner]	9
1.1.4 Topographie par drone	11
1.1.5 Récapitulatif des mesures dans le cadre du projet HYMOSED-vasières	12
1.2 Résultats	13
1.2.1 Caractérisation des sédiments sur les sites d'étude	13
1.2.2 Dynamique haute fréquence des vasières	15
1.2.3 Contrôle des vasières par les forçages marée/vagues/débit : exemple de la Vasière Nord	19
1.2.4 Relevés topographiques par drone	22
1.2.5 Relevés TLS	33
1.2.6 Intercomparaison et complémentarités des techniques d'observations ALTUS/TLS/DRONE	36
II. Etude des structures turbides de surface à l'embouchure de l'estuaire de Seine : apport des images satellite MODIS AQUA	40
1.3 Méthodes	40
1.3.1 Algorithme empirique et « Matchups »	40
1.3.2 Algorithme régional et mesures in situ	40
1.3.3 Jeux de données utilisés	42
1.4 Résultats	42
1.4.1 Construction d'un algorithme régional	42
1.4.2 Construction d'un algorithme empirique	43
1.4.3 Proposition d'un algorithme hybride Régional/Empirique	44
1.4.4 Dynamique des structures turbides : analyse des données satellite en concentration en MES	47
Conclusions	53

RESUME EXECUTIF

Le volet Mesures du projet SA5 HYMOSED se décompose en deux axes distincts : le suivi des évolutions morphodynamiques des vasières latérales intertidales et la quantification des matières en suspension (MES) de surface par télédétection couleur de l'eau.

L'objectif du premier axe est d'évaluer notre capacité à observer les modifications morphodynamiques des vasières en comparant et combinant trois approches complémentaires (altimétrie ponctuelle ALTUS, topographie TLS (scanner laser terrestre), topographie par drone). Un suivi ALTUS sur 2 ans de trois vasières intertidales à l'aval de Tancarville (Tancarville, Pointe de la Roque, Vasière Nord) a été réalisé, permettant de quantifier l'influence des forçages hydrodynamiques et hydrologiques sur les phases de dépôt et d'érosion. En parallèle de ce suivi continu haute fréquence, les techniques de mesures par TLS et Drone ont été mises en œuvre ponctuellement au cours d'un cycle hydrologique. Les performances (résolution et précision) et limites (importance du géoréférencement fixe) de chacune des techniques ont été quantifiées, et comparées au suivi ALTUS. Les résultats ont montré la parfaite complémentarité des mesures hautes fréquences ponctuelles et basse fréquence spatialisée, ces dernières permettant une estimation des volumes érodés/déposés mais également de suivre les structures micro et moyennes échelles telles que les réseaux de drainage en haut de vasières et les filandres.

Le second axe du volet Mesures est de poursuivre le travail engagé dans SA4 MODEL sur l'analyse des images satellites couleur de l'eau pour la compréhension des processus hydrosédimentaires à l'embouchure de l'estuaire. Des mesures complémentaires de réflectance et de concentrations en MES dans des zones fortement turbides ont permis de proposer une amélioration de l'algorithme de traitement des données. Ces données satellites ont été analysées par régime de forçages, de façon à caractériser par une métrique simple, la surface cumulée de concentrations supérieure à un seuil, les structures turbides de surface. L'influence du débit, de la marée et des vagues peut ainsi être quantifiée. Ces métriques servent également de validation du modèle hydrosédimentaire, via leur calcul à partir des concentrations en MES de surface simulées.

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

- **Equipe 1** : DYNECO/DHYSED ; Ifremer

Coordination scientifique : Romaric Verney

Autres chercheurs (ou équivalents) : Florent Grasso, Pierre Le Hir, Fabrice Lecornu, Julien Lemerrier

- **Equipe 2** : UMR 6538, Domaines Océaniques, LDO, Université de Bretagne Occidentale

Coordination scientifique : Christophe Delacourt

Autres chercheurs (ou équivalents) : Jérôme Ammann, Marion Jaud, Nicolas Le Dantec

- **Equipe 3** : UMR M2C, Université de Rouen

Coordination scientifique : Julien Deloffre

Autres chercheurs (ou équivalents) : Michel Simon

- **Equipe 4** : Laboratoire de Géologie, Université de Lyon 1

Coordination scientifique : Philippe Grandjean

- **Equipe 5** : UMR 7093, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche

Coordination scientifique : David Doxaran

- **Equipe 6** : GEO-Transfert

Coordination scientifique : Virginie Lafon

Autres chercheurs (ou équivalents) : Emmanuelle Mulamba Guilhemat

PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET

Personnes ayant contribué au suivi du projet ou ponctuellement à un atelier de travail.

Acteurs de l'estuaire : Patrice Tournier (GPMR), Albert Galicher (GPMR), Jérôme Lacroix (GPMH), Barbara Leroy (AESN)

Scientifiques : Sandric Lesourd (Université de Caen), Nicolas Flipo (Ecole des Mines), Régis Walther (Artelia).

La Maison De l'Estuaire a assuré la bonne mise en œuvre des campagnes de terrain sur le secteur de la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine.

RESULTATS

Introduction

Le volet Mesures du projet SA5 HYMOSED se décompose en deux axes distincts : le suivi des évolutions morphodynamiques des vasières latérales intertidales et la quantification des MES de surface par télédétection couleur de l'eau.

Les zones intertidales représentent d'importantes zones de stockages temporaires de sédiments fins, tant par les surfaces mises en jeu que par les fortes évolutions topographiques saisonnières observées. Ces zones jouent donc un rôle tampon dans les mécanismes de transferts sédimentaires longitudinaux, et contribuent significativement à moduler les flux et bilans sédimentaires de l'estuaire. Les connaissances actuelles de la dynamique de ces vasières reposent sur des suivis ponctuels haute-fréquence de l'altimétrie des vasières. L'extrapolation de ces mesures à l'échelle de plusieurs km² pour évaluer des volumes et réaliser des bilans repose sur des hypothèses simplificatrices fortes et les quantifications sont in fine fortement entachées d'incertitudes. ***L'objectif de cette action est d'évaluer notre capacité à observer les modifications morphodynamiques des vasières en comparant et combinant trois approches complémentaires (altimétrie ponctuelle ALTUS, topographie TLS (scanner laser terrestre), topographie par drone).***

Le réseau SYNAPSES permet aujourd'hui une observation haute fréquence ponctuelle de la dynamique sédimentaire en six stations de Rouen à l'engainement. Ces informations essentielles à une bonne compréhension des flux sédimentaires en estuaire peuvent être complétées, à l'aval de Tancarville, par l'utilisation des données Couleur de l'eau des images MODIS Full Resolution (250m). ***Cette action a pour objectif de consolider les algorithmes de traitement des réflectances mesurées par satellite, d'évaluer l'incertitude associée à ces observations et d'analyser l'archive 2002-2014 ainsi constituée afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle des structures turbides observables en surface.***

I. Suivi de la dynamique des vasières intertidales à l'aval de Tancarville

Trois approches complémentaires sont mises en œuvre pour évaluer les évolutions morphodynamiques de ces zones latérales : altimétrie ALTUS, topographie laser terrestre (TLS) et topographie par drone. Si la mesure ALTUS est une technique éprouvée en estuaire de Seine, ce n'est pas le cas des deux autres approches, jusqu'alors utilisées en zones sableuses (plages / baie de Somme / baie du Mont Saint Michel). Un premier verrou consiste à évaluer la faisabilité et la capacité de ces instruments à mesurer des différences topographiques en zones vaseuses, où la teneur en eau des sédiments de surface peut être forte et impacter la qualité de la mesure. Le second volet de l'action repose sur l'évaluation des performances et précisions des approches, i.e. quels ordres de grandeurs de variabilité topographiques peuvent être appréhendés par chacune des approches, et quelle préconisation apporter pour une future stratégie d'observation des zones intertidales.

1.1 Méthodes

1.1.1 Sites d'étude

L'originalité de cette action repose sur la mise en œuvre, sur des sites communs, de trois méthodes d'observation de la topographie des vasières. Les deux premiers sites se situent en aval de Tancarville, en rive gauche, l'un au pied du pont de Tancarville (Figure 1), l'autre à l'aval de la pointe de La Roque (Figure 2). Ces deux sites ont été retenus pour leur facilité d'accès et l'absence de connaissance sur la dynamique de ces zones. Le troisième site retenu est la Vasière Nord, site atelier de référence du programme Seine Aval, plus grande vasière intertidale de l'estuaire, à la dynamique très marquée à l'échelle de l'année et plus globalement sur les dix dernières années avec l'aménagement de Port 2000 (Cuvilliez et al., 2015). Plus précisément le site retenu se trouve à proximité de la radiale 4, à l'aval de la brèche (Figure 3). Le croisement des données de ces 3 sites vise également à déterminer la dynamique sédimentaire des zones intertidales au regard de la dynamique du bouchon vaseux (i.e. déplacement du BV en fonction du cycle hydrologique). Si les liens entre le bouchon vaseux et la vasière Nord sont connus et quantifiés, la représentativité de cette vasière au regard des échanges BV-zones intertidales d'embouchure restait à quantifier.

Sur les sites de Tancarville et La Roque, vasières longues mais étroites, deux ALTUS ont été implantés longitudinalement. Sur le site de Vasière Nord, trois ALTUS ont été déployés le long d'un transect cross shore, de la limite schorre/slikke à mi pente de la basse slikke (Tableau 1). Autour de chaque ALTUS sont réalisés des relevés TLS (environ dans un périmètre de 100m autour des ALTUS). Finalement des relevés drone grande emprise (environ 90mx250m) recouvrent les zones d'intérêt.

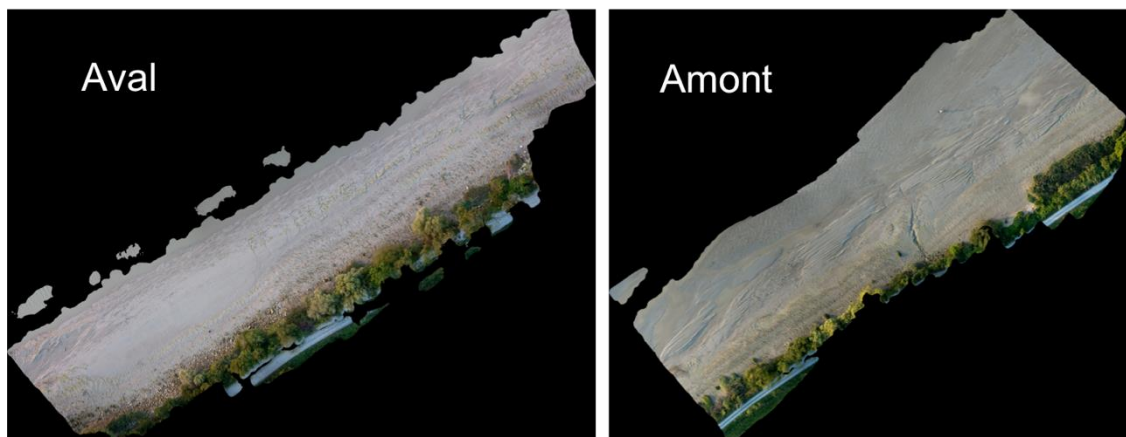
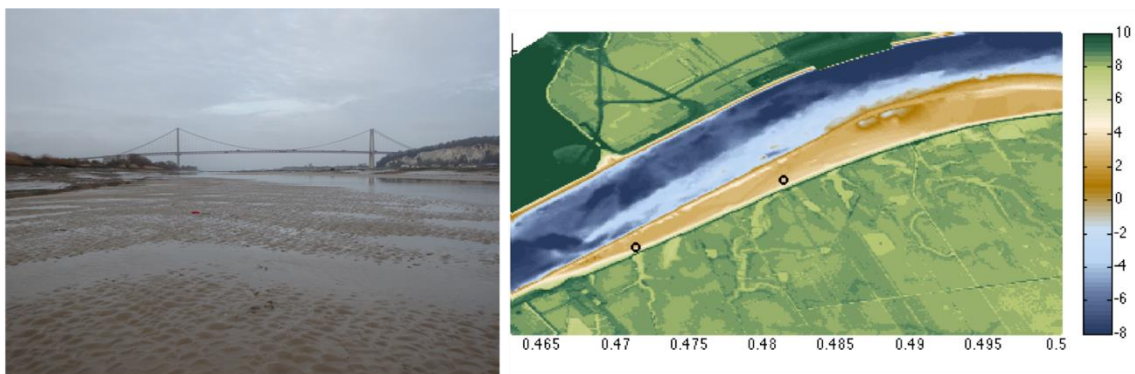


Figure 1 : Site de Tancarville et localisation des ALTUS.

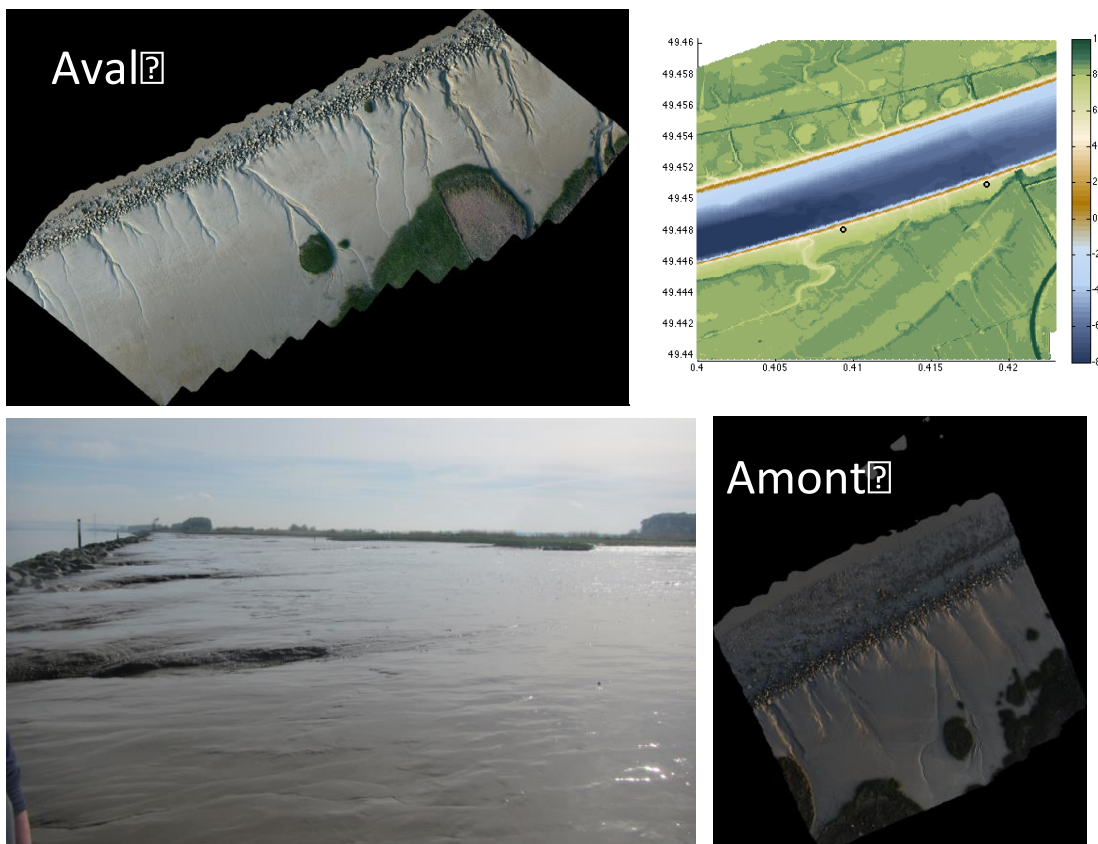


Figure 2 : Site de La Roque et localisation des ALTUS.



Figure 3 : Site de Vasière Nord et localisation des ALTUS.

Site	Station	SN	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
Tancarville	AMONT	18007	49,472667	0,471333	49°N 28.360'	0°E 28.280'
	AVAL	18006	49,470767	0,467733	49°N 28.246'	0°E 28.064'
La Roque	AMONT	32004	49,450983	0,418567	49°N 27.059'	0°E 25.114'
		33001				
	AVAL	32003	49,448083	0,409333	49°N 26.885'	0°E 24.560'
Vasière Nord	Haut estran	18008	49,4456	0,256216667	49°N 26.736'	0°E 15.373'
	Milieu estran	31005	49,44491667	0,255966667	49°N 26.695'	0°E 15.358'
		32004				
	Bas estran	31004	49,44425	0,255616667	49°N 26.655'	0°E 15.337'
Tancarville (repositionnement mai 2014)	AMONT	18006	49,477250	0,481333	49°N 28.635'	0°E 28.88'
	AVAL	18007	49,472667	0,471350	49°N 28.360'	0°E 28.281'

Tableau 1 : Positionnement DGPS des ALTUS sur chacun des sites d'études.

1.1.2 ALTUS

Basé sur le principe d'un échosondeur classique mais avec une fréquence d'émission d'ondes acoustiques de 2 MHz, le système ALTUS est constitué de deux parties : (1) le transducteur acoustique, positionné à une trentaine de centimètres au-dessus du sédiment et orienté vers le sédiment, (2) le module enregistreur, déporté du transducteur et relié à lui par un câble. Le temps de trajet depuis l'émission de l'onde acoustique et sa réception par le

transducteur est converti en distance. Cette célérité du son dépend de la température et de la salinité du milieu, qui est corrigée en considérant les mesures de température sur site (sondes SP2T) et les mesures SYNAPSES proches pour la salinité et éventuellement de température en cas d'absence de mesures locales.

Outre l'enregistrement de la hauteur d'eau (via un capteur de pression), l'ALTUS acquiert de 1 à 4 seuils de détections d'énergie acoustique reçue correspondant à la hauteur transducteur-sédiment (précision de 2mm), et ceci à la cadence désirée. Ces seuils permettent de préciser l'interface eau-sédiment et sont des indicateurs de l'état de sédimentation/consolidation des dépôts. Ainsi un dépôt frais de vase liquide sur un fond de vase plus consolidée doit pouvoir être détecté et quantifié.

Les ALTUS sont déployés à partir de structures tripodes stabilisées dans le sédiment par des ailettes enfoncées à 0.8m de profondeur en moyenne (Figure 4). Les ALTUS sont généralement programmés pour démarrer sur seuil de pression en zone intertidale, permettant ainsi de ne pas mesurer lorsque le site est découvert et que la mesure est inutilisable, et d'étendre l'autonomie de mesure. Les ALTUS déployés dans le cadre du projet enregistrent à la cadence d'une mesure toutes les 10 secondes, et les données sont relevées toutes les 6 semaines. En complément des mesures ALTUS, des prélèvements pour mesures sédimentologiques (granulométrie, teneur en eau, matière organique par perte au feu pour certains échantillons) sont également réalisés en triplicat le long de radiales cross shore à proximité des ALTUS. En parallèle des mesures ALTUS, une sonde de pression (mesure en « burst » à 2Hz) a été installée par site pour évaluer les états de mer sur les sites ateliers (marée, vagues). Sur le site de Tancarville, un déplacement des altimètres en début de programme a été nécessaire (Tableau 1) en raison des contraintes de vol lié aux drones. En effet, positionnés trop proches du pont de Tancarville, ils ne pouvaient pas être inclus dans la couverture drone.



Figure 4 : Mise en œuvre des ALTUS sur les sites de La Roque et Vasière Nord.

1.1.3 TLS [Terrestrial Laser Scanner]

Le TLS est un LIDAR terrestre constitué d'une base équipée d'une tête rotative émettant un faisceau laser à 532nm rétrodiffusé par les obstacles rencontrés sur son trajet et mesurant la distance objet/laser par la méthode du temps de vol (aller/retour de l'onde optique). A une cadence d'au maximum 50000 points par seconde, le TLS enregistre la position du fond sur 360°horizontalement et 270° verticalement au moyen d'un miroir pivotant, avec une portée maximale de 300m et une portée optimale de 100m. Pour chaque site, 3

positions de station ont été effectuées au cours des campagnes afin de maximiser la couverture de la zone et de minimiser le phénomène d'ombrage. Les 3 nuages de points sont assemblés grâce à 3 cibles réparties sur la zone étudiée. Ces trois cibles sont ensuite référencées dans l'espace à l'aide d'un DGPS (sur 30 minutes/point). Au final, la précision totale (erreur instrumentale, assemblage des nuages de points et DGPS) est de 6mm à 50m de la base TLS (Figure 5).



Figure 5 : Mise en œuvre du TLS sur les vasières intertidales de l'estuaire de Seine.

Pour couvrir la zone d'étude, et augmenter la précision du futur MNT en permettant une redondance des points, trois stations TLS sont réalisées par site, en triangle pour les vasières en rive gauche, et en ligne pour la vasière nord afin de suivre le transect cross shore (Figure 6). L'acquisition d'un jeu de données par site est réalisée autour de la basse mer, en 3 à 4 heures, à raison d'un levé tous les 3 mois en moyenne.

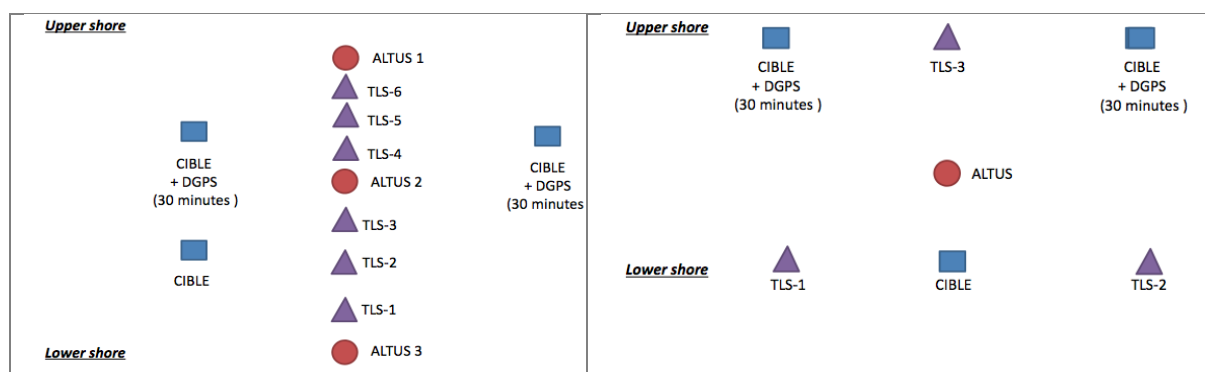


Figure 6 : Schéma décrivant les stratégies de mise en œuvre du TLS sur le site de la Vasière Nord (gauche) et des vasières Rive Gauche (droite).

La chaîne de traitement des données inclut la fusion des nuages des points via le recalage des cibles, le nettoyage du jeu de données filtrant les données aberrantes et le recalage du nuage de point en (x,y,z) via la mesure DGPS des cibles et de la base. Ces opérations sont effectuées à l'aide du logiciel de traitement de données fourni par le constructeur. Un MNT est ainsi obtenu en WGS84, avec le OCMH comme référence verticale.

1.1.4 Topographie par drone

La dernière technique de mesure topographique utilisée dans le projet associe une prise d'image haute résolution à l'aide d'un appareil photo Nikon D700 reflex numérique (5246x2832 pixels) à 1Hz depuis un drone DRELIO, vecteur innovant. Les drones mis en œuvre sont des hexa-coptères capables d'embarquer de 1.5 à 5Kg de charge utile, pour une autonomie de vol de 10 à 15min et un contrôle sur une distance d'1km autour de l'opérateur. Ils volent à 100m d'altitude à une vitesse moyenne de 3m.s^{-1} pour un recouvrement optimal des images de 60%.

Le protocole d'acquisition de mesure se déroule en deux phases distinctes, chacune assurée par un groupe dédié. La première phase consiste à déposer sur le sédiment des cibles de références, dont la position 3D est référencée par DGPS (Figure 7). Ces cibles sont réparties i) en priorité à proximité des ALTUS et ii) de façon à couvrir un gradient topographique représentatif du site. Ces cibles sont visibles sur les images acquises depuis le drone et servent à recalculer avec précision les positions (x,y,z) de chaque pixel. La seconde phase consiste en la réalisation du vol en lui-même à une centaine de mètres d'altitude et à l'acquisition des images. Ces relevés permettent une densité de points allant de 400 à 1500points/m², et une résolution horizontale de 2 à 5cm par pixel en fonction de l'altitude de vol. Si le vol en lui-même est court, la phase de mise en place et de référencement des cibles et leur récupération nécessitent plusieurs heures. Afin de limiter les réflexions de lumière, les relevés ont été réalisés préférentiellement par temps nuageux, en début ou fin de journée.

La reconstruction 3D de la topographie de la zone repose sur des méthodes de stéréophotogrammétrie. Ce procédé est basé sur la perception du relief à partir d'images planes acquises depuis des points de vue différents (tout comme permet de le faire la vision humaine). La position de chaque pixel apparaissant sur au moins deux images peut ainsi être calculée. Les cibles positionnées sur le terrain permettent d'améliorer la précision de ce calcul tout en recalant la position de chaque point (pixel de calcul) dans un référentiel absolu, ici le RGF93 Lambert 93 avec le 0CMH comme référence verticale. La réalisation d'un maillage 3D sur le nuage de points calculé permet de générer un MNT représentant la topographie de la zone, les irrégularités du terrain, etc. En parallèle de ce MNT, une orthophotographie est également générée. Il s'agit d'une photographie géoréférencée et corrigée géométriquement des effets de prises de vue et de relief afin d'offrir une représentation planimétrique de la zone. Cette orthophoto peut également être drapée sur le MNT ce qui apporte une plus-value en termes d'observation.



Figure 7 : Mise en œuvre du drone et référencement DGPS des cibles sur vasière.

1.1.5 Récapitulatif des mesures dans le cadre du projet HYMOSED-vasières

Les mesures ont débuté en avril 2014, après une visite commune à tous les intervenants en mars 2014 pour valider les sites d'observations, et évaluer la faisabilité de mise en œuvre des différentes techniques. Les mesures ALTUS couvrent 2 années continues, sauf pour Tancarville. Trois relevés drone ont été réalisés entre 2014 et 2015, tandis que six relevés TLS ont été réalisés entre Avril 2014 et Avril 2016.

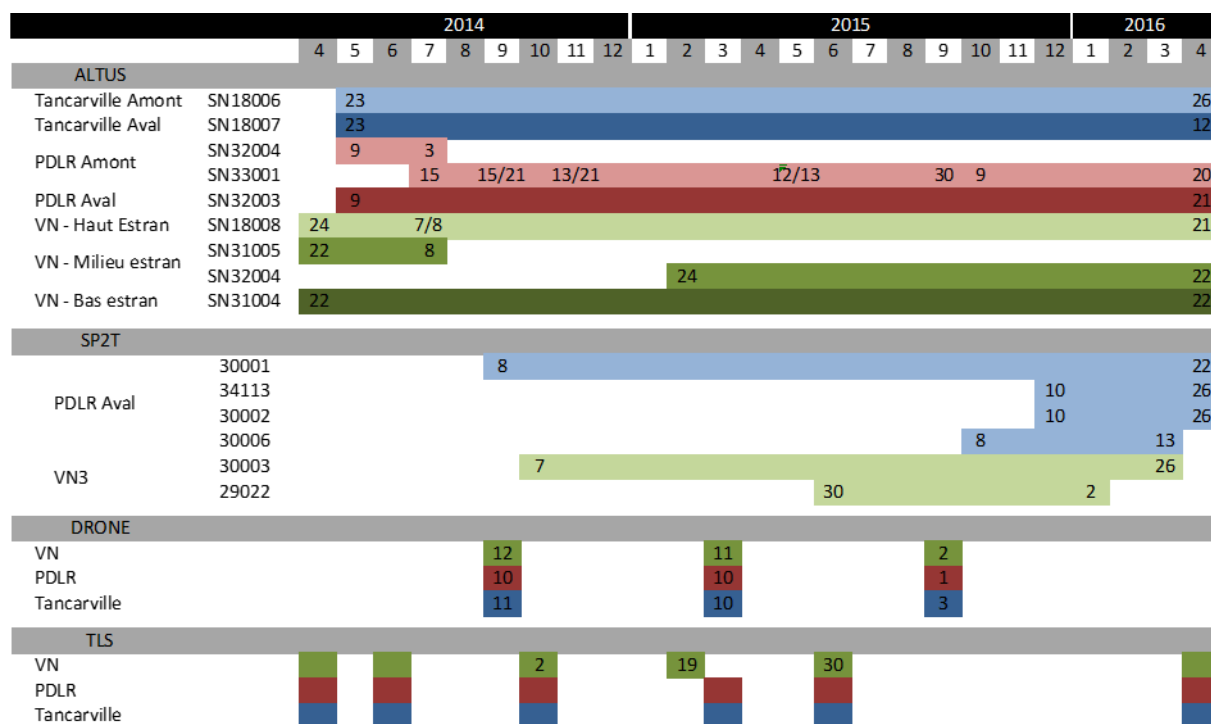


Tableau 2 : Récapitulatif des périodes de mesures pour chaque système. Les chiffres marquent les jours de fin/début de mesures.

1.2 Résultats

Les informations générales sur les sédiments superficiels et leur variabilité sur les différentes stations sont d'abord présentées. Les observations haute fréquence des ALTUS seront ensuite détaillées, afin de présenter la dynamique des différentes vasières sur la période d'étude. Ces dynamiques, pour les sites Vasière Nord et Pointe de la Roque, seront ensuite confrontées aux forçages pour en déduire des schémas de fonctionnement. Les observations topographiques par drone puis par TLS sont ensuite présentées. Finalement, une analyse critique des différentes techniques d'observation est proposée.

1.2.1 Caractérisation des sédiments sur les sites d'étude

Granulométrie

Les granulométries ont été obtenues sur chacun des sites sur la période Avril 2014 à Septembre 2015 (8 date d'échantillonnage). Ces données ont été acquises par un micro-granulomètre Laser de paillasse (Beckman Coulter® LS 13320). Quel que soit le site d'observation, les résultats de granulométrie présentent une variabilité relativement faible durant la période d'étude, avec une exception sur le site de Tancarville Amont (Figure 8). Les modes présents sur ces échantillons sont ceux retournés classiquement sur les sédiments de l'estuaire de la Seine : 10, 40, 80, 200 et 800µm.

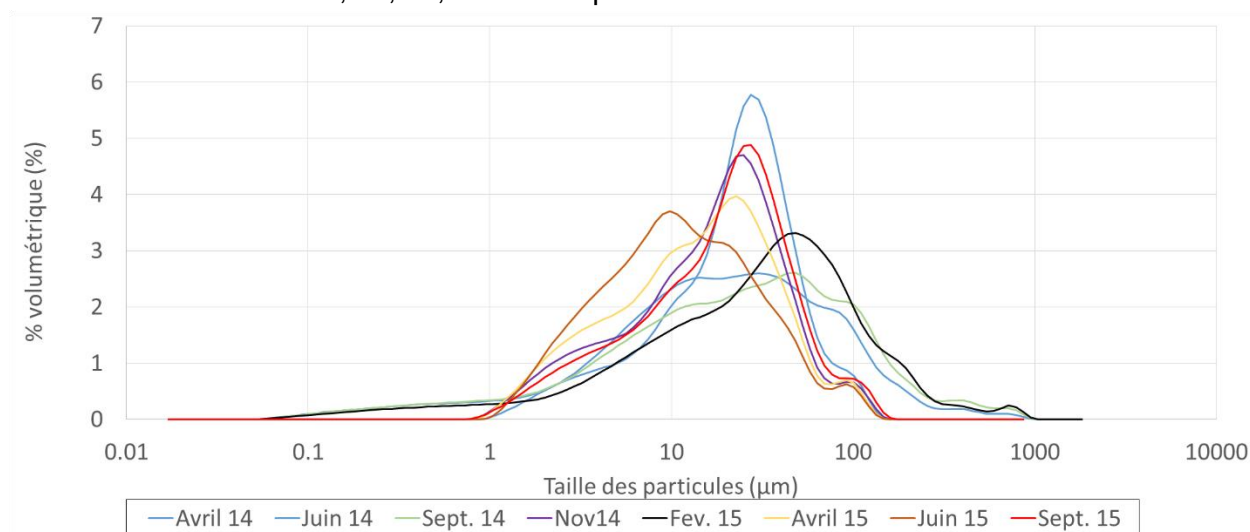


Figure 8 : Granulométrie obtenues sur le site de Tancarville Amont

La Figure 9 présente la courbe de fréquence cumulée pour l'ensemble des sites. Afin de permettre la lecture, les valeurs ont été moyennées sur les 8 périodes de prélèvement. Les résultats montrent que malgré une relative homogénéité des sites, le site de Tancarville aval possède en moyenne les sédiments les plus fins et que le site de Tancarville amont les plus grossiers.

Matière organique

La teneur en matière organique des sédiments a été obtenue par la technique de la perte au feu. Cette technique basée sur une méthode massique consiste à peser quelques grammes d'échantillon avant et après passage dans un four à moufle durant 2 heures à 550°C (en triplicat).

La Figure 10 présente l'évolution de la teneur en matière organique sur les sites d'étude. Les teneurs en MO varient entre 5.3 et 20.3%. De manière générale, les taux de Mo sont plus élevés sur la période estivale, comparativement à la période hivernale. Le site de Tancarville amont présente globalement des taux de matière organique plus faible que les autres sites.

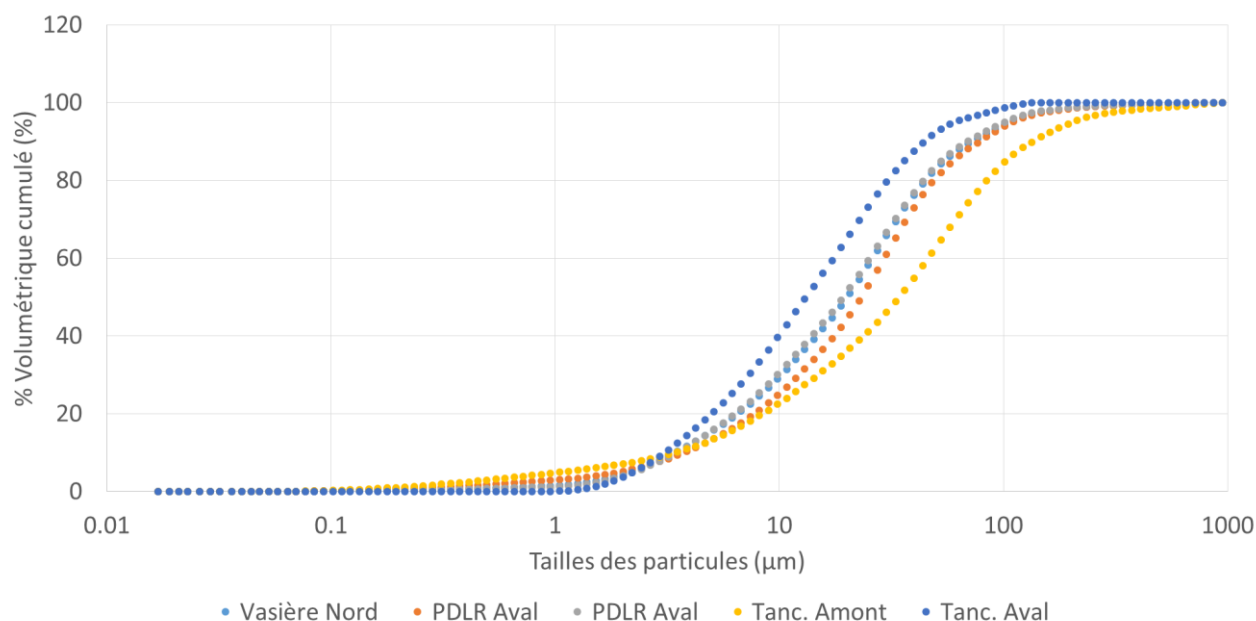


Figure 9 : Courbes cumulatives de fréquences pour les Sites HYMOSED. Les données ont été moyennées pour chacun des sites sur les 8 dates de prélèvement.

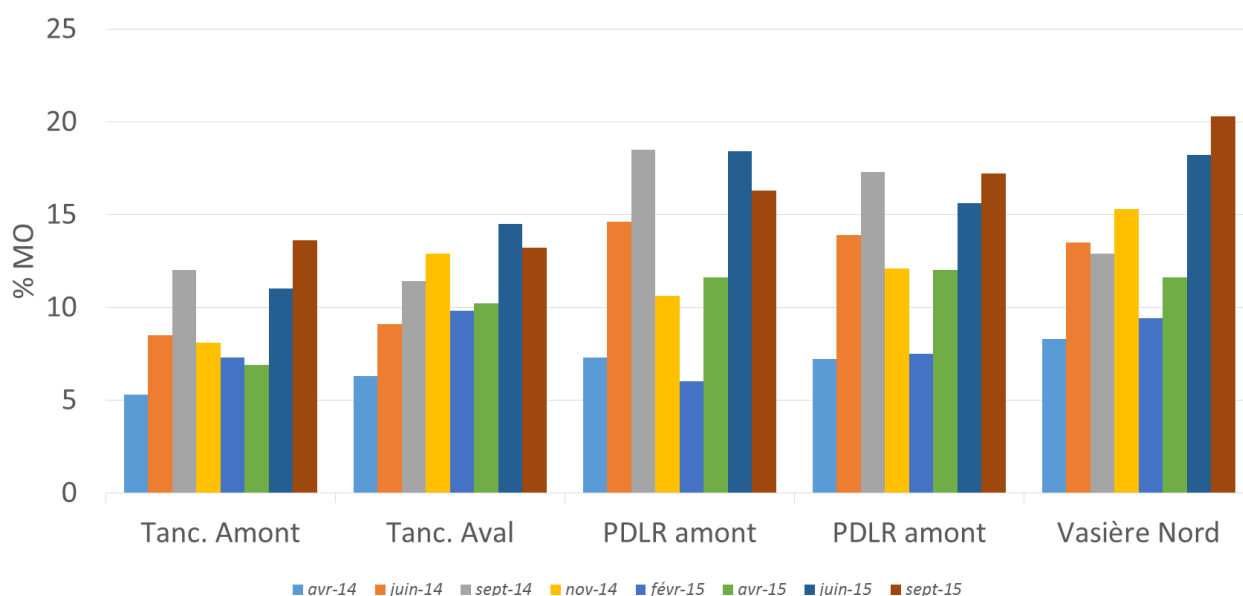


Figure 10 : Variabilité saisonnière du pourcentage de matière organique, pour l'ensemble des sites

1.2.2 Dynamique haute fréquence des vasières

Vasière Nord

Les mesures altimétriques en Vasière Nord montrent une forte variabilité basse fréquence, saisonnière, à laquelle se superposent des épisodes dépôt ou érosion très rapides, à l'échelle de la marée ou du cycle vive eau/morte eau (Figure 11). Ainsi, pour l'ALTUS le plus bas sur la SLIKKE, des dépôts ou érosions pluri-centimétriques (entre 2 et 8 cm entre fin octobre 2014 et avril 2015) sont régulièrement enregistrés sur quelques marées. Une longue phase d'érosion et/ou consolidation est également observée entre mai et novembre 2015, caractérisée par un abaissement de l'interface eau/sédiment de près de 7cm. Cette dynamique est similaire à celle observée entre juillet 2001 et mai 2003 par Deloffre et al. (2006). On peut également noter une réponse cross-shore de la VN aux forçages, avec des épisodes modulés (dépôts généralement plus importants en bas estran) ou absents entre les ALTUS de haut estran, de milieu ou de bas estran. Ainsi, l'ALTUS de haut estran enregistre une érosion progressive de près de 5cm fin 2014, tandis que sur la même période l'altimétrie en bas estran est globalement stable. A l'inverse, l'érosion à l'été 2015 vue par l'ALTUS de bas estran est peu observée en haut estran. A l'échelle annuelle, si le bas/milieu d'estran est globalement stable, l'ALTUS de haut estran, proche du schorre, montre une érosion substantielle de plus de 5cm. Ce bilan doit cependant être considéré avec précaution, car un affouillement progressif au niveau des pieds du support ALTUS est observé (Figure 12).

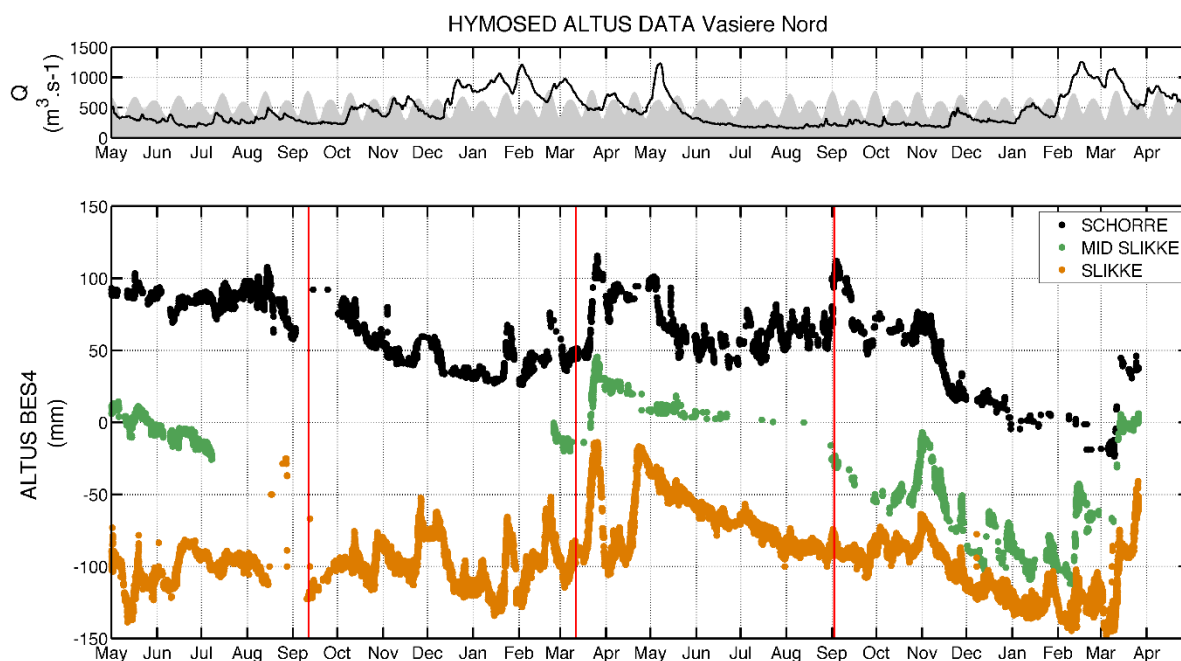


Figure 11 : Débit de la Seine, marées et mesures altimétriques le long d'un transect cross-shore sur la vasière Nord entre Mai 2014 et Avril 2016. Les dates des relevés Drone sont indiquées. Les valeurs initiales ont été volontairement décalées par ALTUS afin de facilement les dissocier.



Figure 12 : Photographies de l'ALTUS haut estran (SCHORRE) sur la Vasière Nord. Haut gauche : juin 2014 ; Haut droite Juillet 2014 ; Bas gauche : septembre 2014 ; Bas droite : Mars 2015.

Pointe de la Roque

La vasière de la Pointe de la Roque est séparée du chenal de navigation par un enrochement sur lequel la vasière s'est construite et adossée. Cette vasière est donc surélevée, à une altimétrie proche de celle de la Vasière Nord. Le site La Roque Aval répond fortement au cycle vive eau/morte eau, avec, de façon similaire à la vasière nord, des dépôts pluri centimétriques en VE (entre 3 et 8cm par exemple au printemps 2015) (Figure 13). A noter que l'ALTUS aval est finalement positionné assez bas, proche de la limite de détection de l'ALTUS, ce qui pourrait expliquer l'absence de données entre septembre et novembre 2014. L'ALTUS amont montre également une cyclicité de dépôt/érosion en lien avec les VE. Cet ALTUS a cependant été arraché, conduisant à son remplacement en novembre 2014. Outre cette dynamique haute fréquence (marée + cycle VE/ME), une dynamique saisonnière est clairement visible pour les deux ALTUS :

- en fin d'étiage, la vasière semble atteindre un équilibre morphologique, l'altitude oscillant à l'échelle des cycles VE/ME,
- en début de crue, la vasière entre globalement en érosion (-10cm entre décembre 2014 et juin 2015, -8cm entre janvier et avril 2016),
- en fin de crue et lors du retour progressif à l'étiage, la vasière engraisse de 8 à 10cm entre les ALTUS, jusqu'à revenir à un niveau d'équilibre.

Il faut également noter que la vasière aval se caractérise par une dynamique saisonnière légèrement moins forte, mais également déphasée par rapport à la partie plus amont, avec une érosion plus tardive et un engraissement plus rapide, potentiellement associé à la plus grande proximité de la partie aval avec la position médiane du bouchon vaseux par débits moyens à forts (les deux ALTUS étant distants de 750m environ).

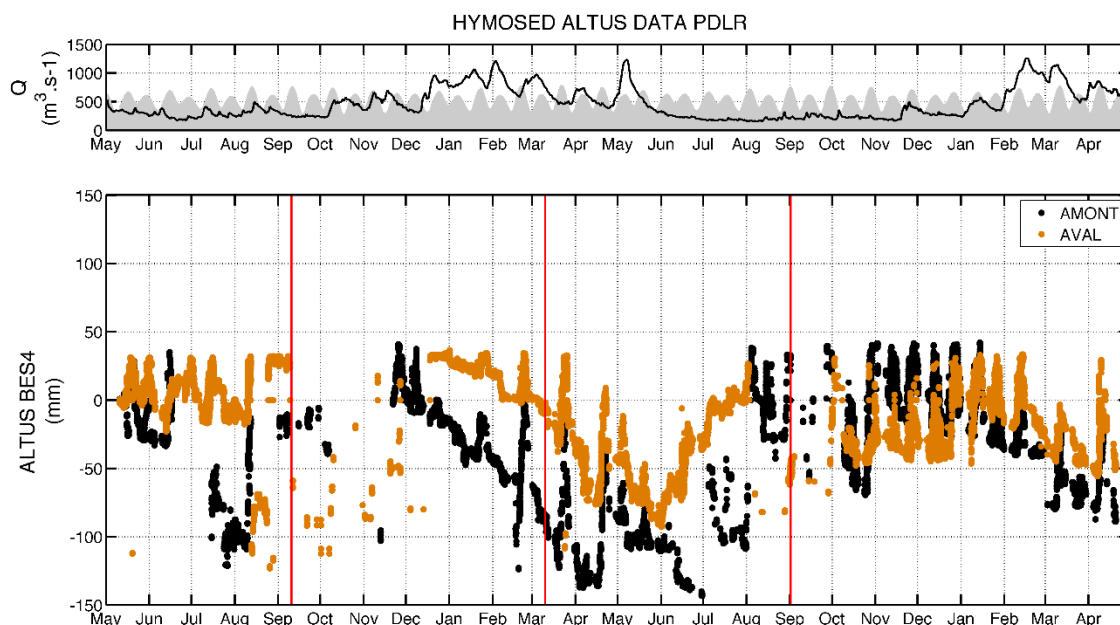


Figure 13 : Débit de la Seine, marées et mesures altimétriques le long d'un transect long-shore sur la vasière de la Pointe de la Roque entre Mai 2014 et Avril 2016. Les dates des relevés Drone sont indiquées.

Tancarville

Le site de Tancarville montre une dynamique très contrastée entre la station amont, en forte érosion, de près de 40cm, et la station aval, en accrétion de +10cm (Figure 14). La dynamique de la station aval se caractérise par 2 périodes distinctes, en lien avec le débit. Lors des périodes de fort débit le site est stable ou en légère érosion, tandis que les principaux événements de dépôt (nets, sur plusieurs marées) sont observés par débit faible, avec donc un bouchon vaseux centré proche de Tancarville. Les périodes d'érosion semblent principalement se produire par grandes VE (aout/septembre/octobre 2014 et 2015), les dépôts en ME et petites VE (Figure 15).

Le site Tancarville amont se caractérise par une dynamique plus forte (Figure 14). Il est globalement en érosion de près de 40cm, les érosions se produisant préférentiellement en VE, de façon similaire à la station aval (Figure 16). Toutefois, une dynamique plus haute fréquence semble observée, avec lors des VE une forte variabilité de l'altimétrie. Il faut toutefois considérer cette variabilité HF avec prudence car lors de ces VE d'étiage, la concentration en matières en suspension est forte et peut perturber la détection de l'interface eau/sédiment, se traduisant par la détection d'un fond virtuel plus proche du transducteur (Figure 16).

Les observations du site de Tancarville montrent des différences notables des formes sédimentaires, ainsi que de la nature des sédiments : le site aval est très vaseux, relativement lisse, tandis que le site amont est plus sableux. En mars 2015 dernier, se caractérisait par la présence de rides. Ces rides, si elles se déplacent, pourraient fortement impacter le signal ALTUS et expliquer partiellement les variations de signal altimétrique.

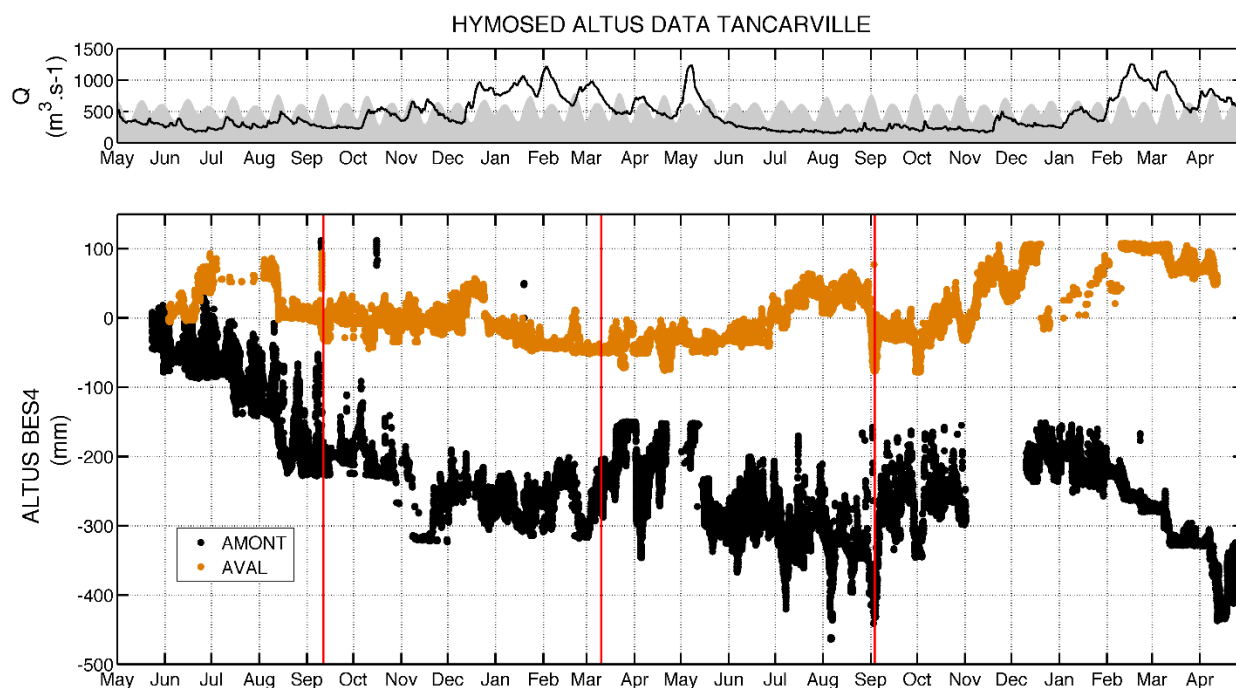


Figure 14 : Débit de la Seine, marées et mesures altimétriques le long d'un transect long-shore sur la vasière de Tancarville entre Mai 2014 et Avril 2016. Les dates des relevés Drone sont indiquées.

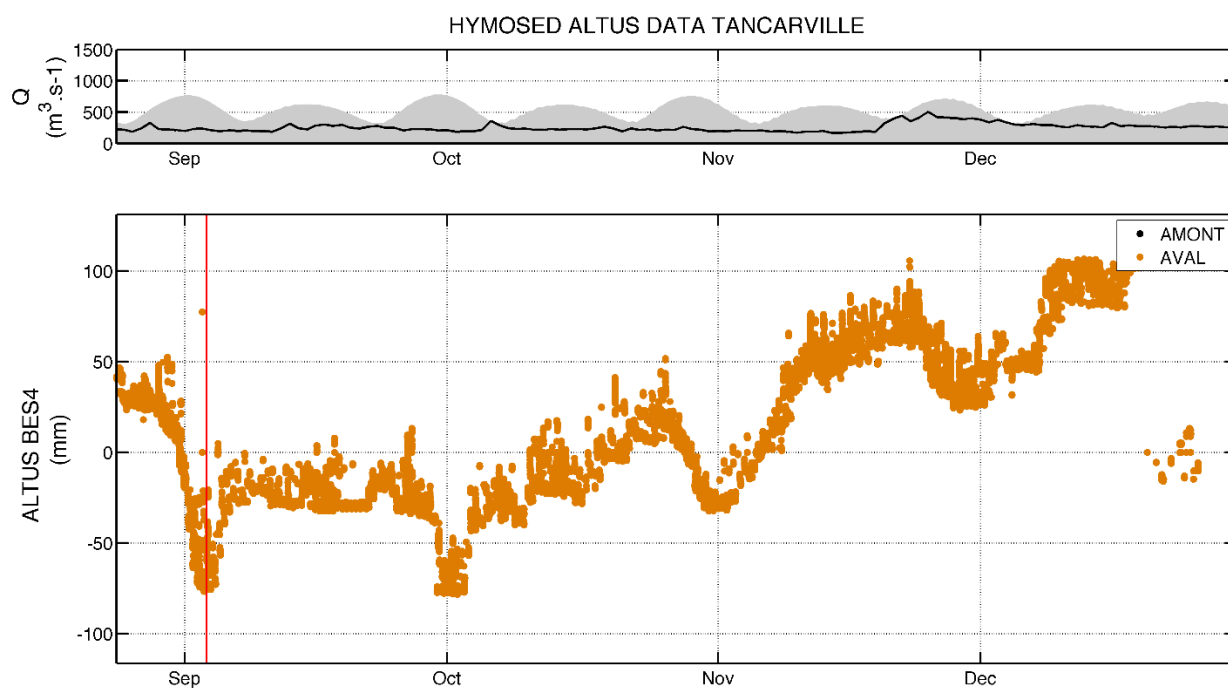


Figure 15 : Tancarville Aval : zoom temporel entre septembre et décembre 2014 sur les variations altimétriques.

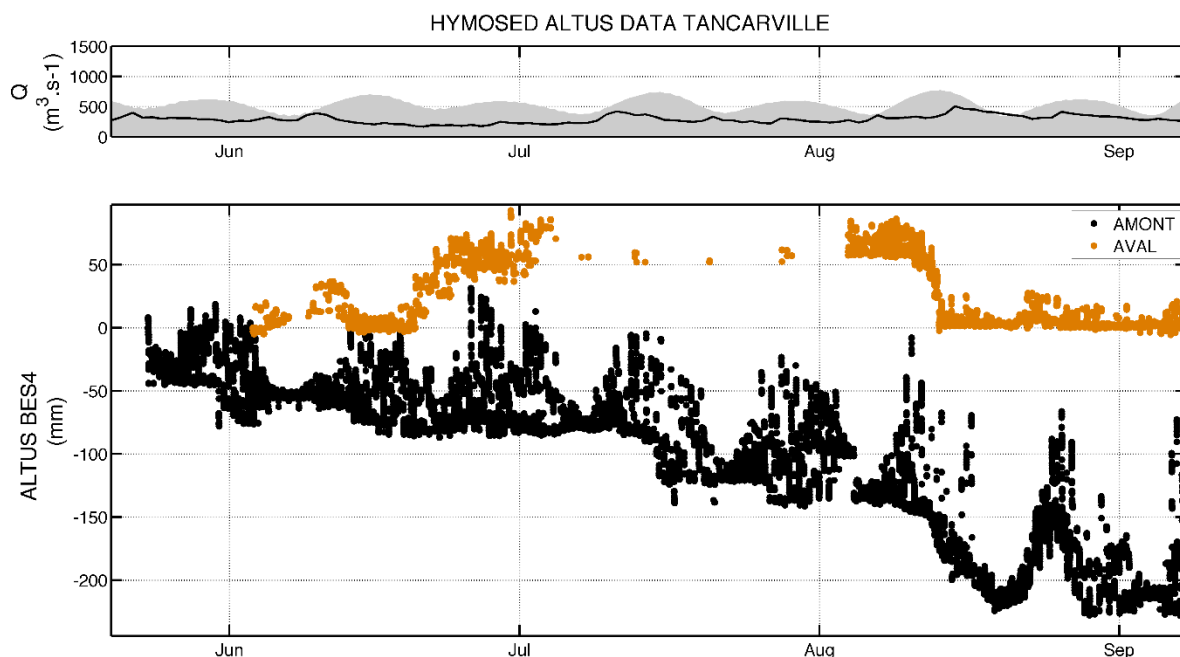


Figure 16 : Tancarville Amont/Aval : zoom temporel entre juin et septembre 2014 sur les variations altimétriques.

1.2.3 Contrôle des vasières par les forçages marée/vagues/débit : exemple de la Vasière Nord

Les observations précédentes d'altimétrie de la vasière nord, sur des points proches (l'altitude correspondant actuellement aux stations milieu et haut estran), ont montré des dépôts significatifs (de l'ordre de 5cm) lors des périodes de VE, associés à des concentrations fortes dans le chenal de navigation (Deloffre et al., 2006 - Figure 17). Une analyse qualitative de l'effet des vagues sur les épisodes d'érosion/dépôt a également été réalisée. Une analyse similaire est produite, prenant en compte l'ensemble des forçages : marée, débit, vent et vagues, ces dernières étant mesurées à haute fréquence par un capteur de pression (Figure 18). De façon similaire à la période 2001-2003, les dépôts sont principalement corrélés à la présence de sédiments en suspension dans l'embouchure en VE, et les érosions sont principalement associées à des vitesses orbitales supérieures à 0.2m/s. La Figure 19 permet une analyse plus fine de la dépendance aux forçages des érosions/dépôts (ces érosions/dépôts sont calculés comme la différence entre deux marées successives du niveau altimétrique moyenné par marée). L'exemple est ici donné pour l'ALTUS de basse slikke, les analyses des deux autres ALTUS sont présentes en annexe. On retrouve que les dépôts sont principalement observés pour des marnages supérieurs à 6m, qui correspondent à la fois à un bouchon vaseux pleinement développé et un temps d'immersion important, permettant un dépôt effectif optimal. Les dépôts sont faibles pour des faibles turbidités, la source sédimentaire n'étant pas suffisante pour générer un dépôt significatif. Au contraire, les érosions ont lieu lors d'épisodes de vagues significatifs, i.e. des vitesses orbitales supérieures à 0.15m/s. Lors des marées de VE, malgré une turbidité significative, on observe clairement l'absence de dépôt, voire une légère érosion.

La comparaison des dynamiques annuelles de la haute slikke de la Vasière Nord montre deux tendances très différentes voire opposées. En effet, entre juillet 2001 et mai 2003, un bilan positif de +25cm est observé. A contrario, entre mai 2014 et mai 2016, le bilan sédimentaire est nul ou légèrement négatif sur les deux stations milieu et haut estran (Figure 11). Cette différence de comportement peut être associée à la modification des forçages et notamment la plus grande proximité du chenal Nord suite aux travaux de Port 2000, pouvant reprendre plus facilement les dépôts frais. Cette question devra être abordée de façon plus détaillée à l'issue du projet HYMOSED, notamment en comparant conjointement aux dynamiques altimétriques locales les évolutions des profils cross-shore entre 2001 et 2016 issus des levés LIDAR. Les mêmes relations entre marnage, turbidité et vagues sont observées sur les deux ALTUS situés plus haut sur l'estran, mais avec une influence moindre des vagues sur les érosions.

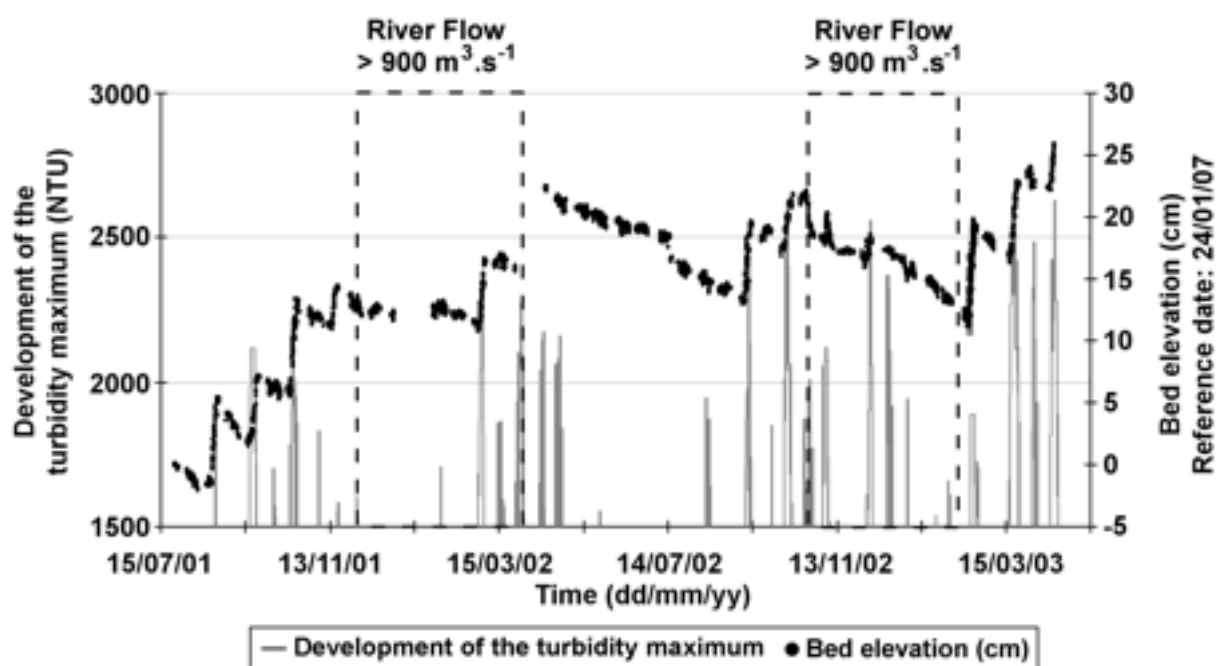


Figure 17 : Dynamique de l'altimétrie du sédiment sur le milieu d'estran de la Vasière Nord entre juillet 2001 et mai 2003 et turbidité mesurée dans le chenal de navigation (Station MAREL Honfleur)

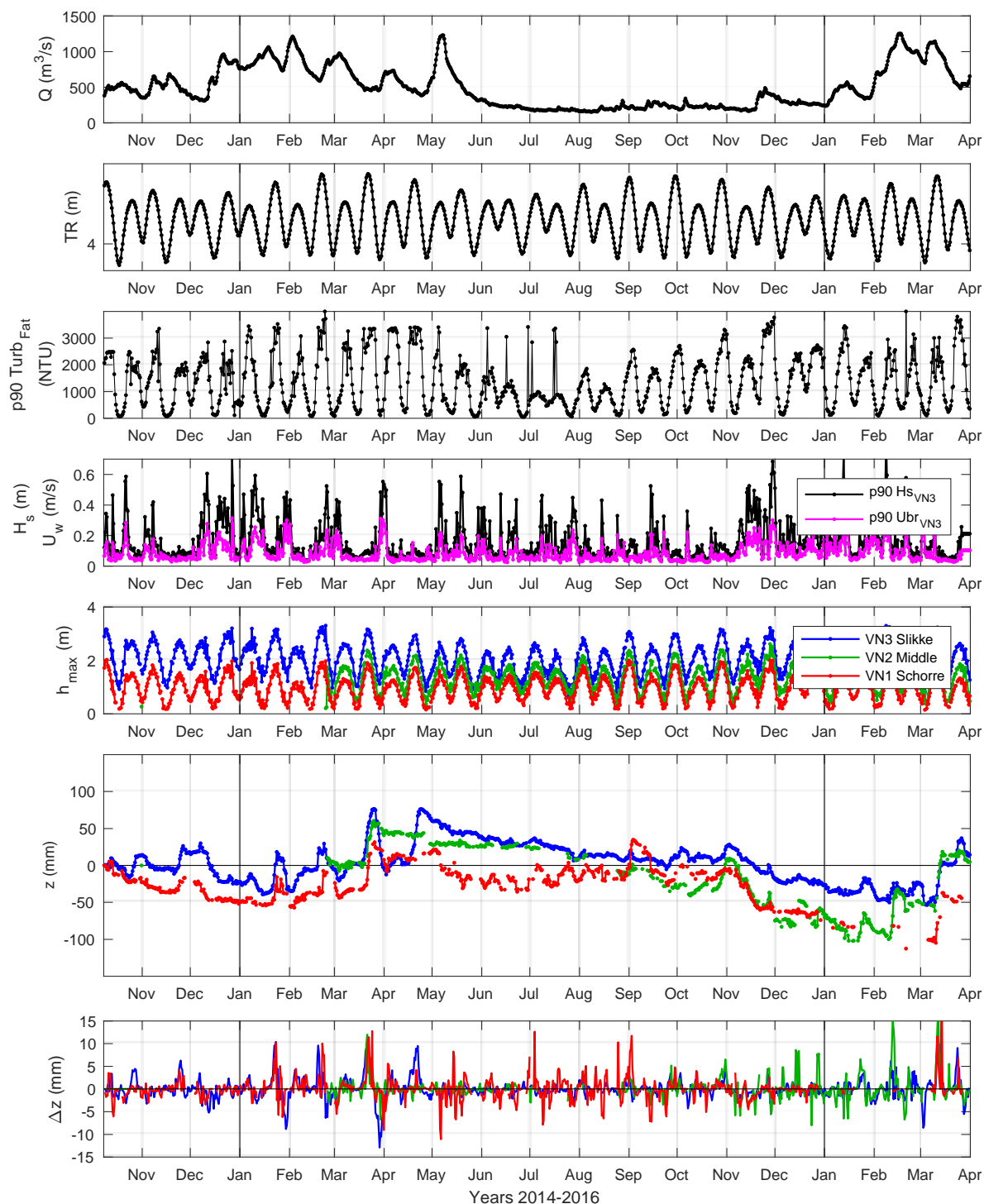


Figure 18 : Dynamique de l'altimétrie du sédiment sur le milieu d'estran de la Vasière Nord entre Novembre 2014 et avril 2016, Débit, marnage, turbidité (Percentile 90 par marée) mesurée dans le canal de navigation (Station Fatouville SYNAPSES), hauteur significative et vitesse orbitale des vagues, hauteur d'eau maximale par marée et par station, différentiel d'altimétrie entre deux marée successives.

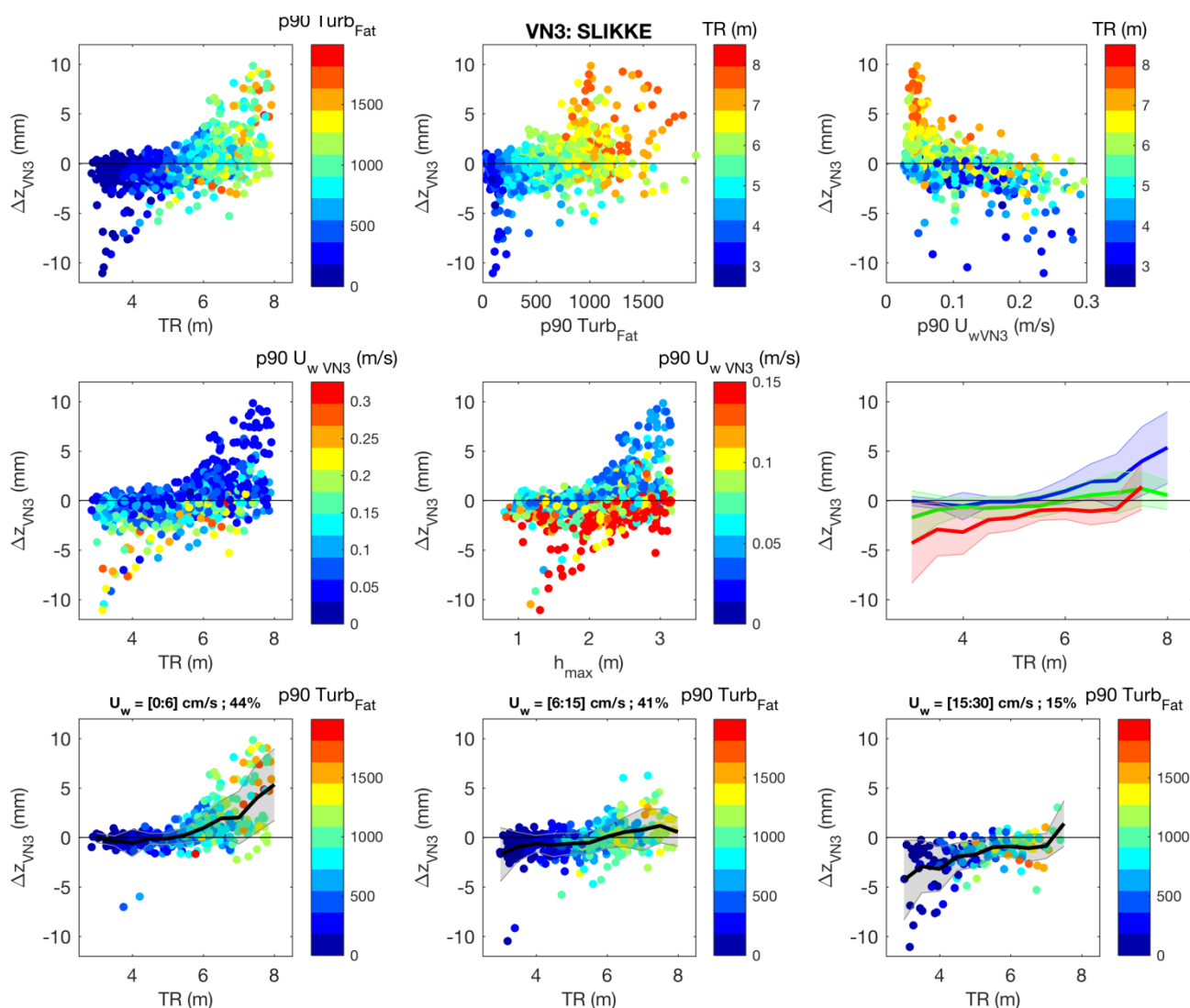


Figure 19 : Corrélations entre érosions/dépôts (Δz) mesurés par l'ALTUS de basse slikke, marnage, turbidité à Fatouville et vitesse orbitale des vagues sur la vasière (ALTUS basse Slikke). Les éléments bas de la figure distinguent les relations entre marnage et érosion/dépôt pour trois classes de forçages vagues : faible ($U_w < 8 \text{ cm/s}$) moyen ($U_w < 15 \text{ cm/s}$) et fort ($U_w > 15 \text{ cm/s}$)

1.2.4 Relevés topographiques par drone

Les données Drone (et TLS) sont principalement détaillées dans le rapport sur la base des relevés de la Vasière Nord. Les MNT et orthophotos obtenus sur les autres sites sont présentés en annexes, ainsi que la publication de référence sur ce travail (Jaud et al., 2016). Il est important de noter que les référencements absolus (en z) des levés drones ont été corrigés, principalement celui de mars 2015. Ce point sera discuté en dernière section.

Précision des relevés topographiques

La principale source d'incertitude des MNT est associée au géoréférencement propre des cibles de référence et de contrôle, obtenu par DGPS (Figure 20). Une précision de 3cm sur le positionnement horizontal et de 4cm sur la verticale est ainsi obtenue. Ces positions

sont ensuite chargées dans le logiciel de reconstruction du MNT. En moyenne, une vingtaine de cibles sont utilisées, 2/3 pour le géoréférencement du MNT, et 1/3 pour vérification et estimation de l'incertitude (Tableau 3). Les MNTs produits possèdent donc en moyenne une résolution horizontale de 4cm par pixel, 2cm en vertical, pour des incertitudes allant de 1.5 à 2.5cm sur l'horizontale et de 2.7 à 3.5cm sur la verticale.

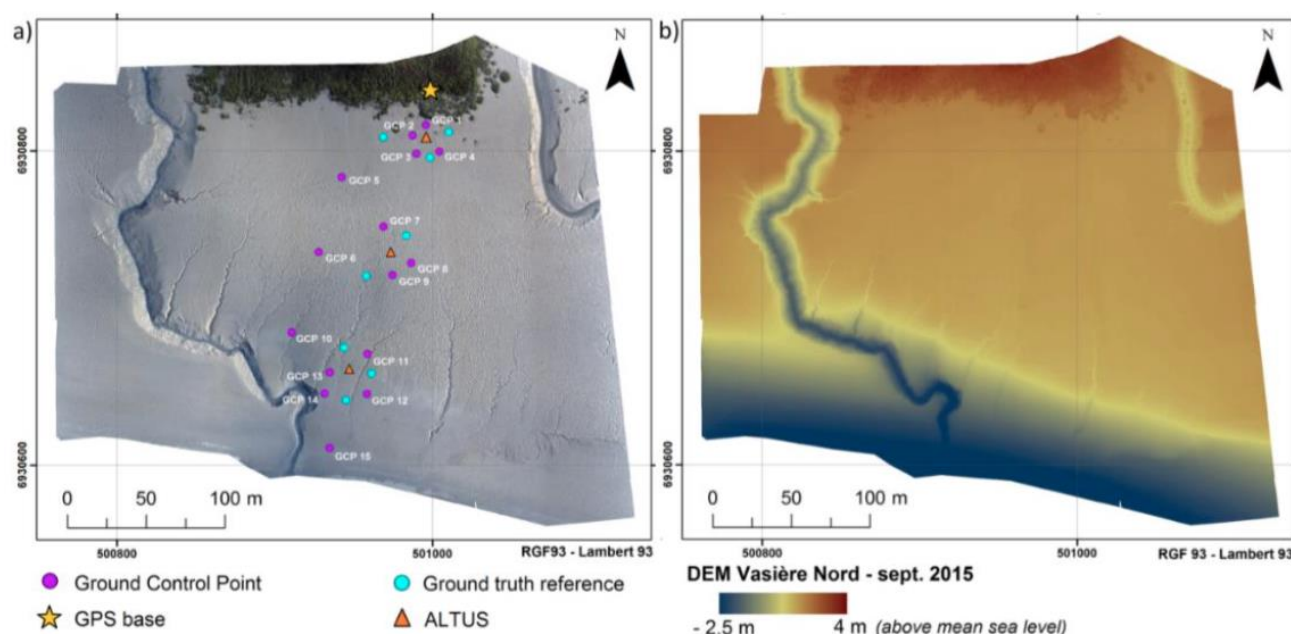


Figure 20 : Exemple de relevé et de MNT produit sur la Vasière Nord (Septembre 2015) : position de la base GPS, des ALTUS et des cibles de références utilisées pour la reconstruction du MNT (Ground Point Control) et l'évaluation de sa précision (Ground truth reference).

	Septembre 2014	Mars 2015	Septembre 2015
Altitude moyenne de vol	95.7m	95.8m	103.3m
Nb de photos acquises	316	168	247
Nb de photos sélectionnées pour analyse	67	150	99
Nb de GCP (contrôle)	12	15	15
Nb de GR (référence)	7	8	8
Densité du nuage de point	550.5pts/m ²	565.2pts/m ²	495.8pts/m ²
Résolution de l'orthophoto (z)	2.1cm/pix	2.1cm/pix	2.2cm/pix
Résolution du MNT (x,y)	4.2cm/pix	4.2cm/pix	4.5cm/pix
Horizontal/Vertical RMSE	2.5cm/3.9cm	1.5cm/2.7cm	1.6cm/3.5cm

Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques des vols lors des trois périodes de 2014 à 2015, et informations sur la qualité des MNT produits.

Evolutions morphologiques à l'échelle d'un transect cross-shore

Les MNTs produits par stéréophotogrammétrie sur la vasière Nord en Septembre 2014, Mars 2015 et Septembre 2015 sont présentés Figure 21. La radiale ALTUS est globalement centrée sur la largeur cross-shore de chaque levé. Ces levés vont de la limite haut schorre au Nord à la basse slikke, à proximité du chenal Nord (-2.5m CMH). L'emprise commune intègre la partie aval d'une filandre et la globalité de l'estran. Les différentiels topographiques montrent la forte mobilité du débouché de la filandre dans le chenal Nord, avec un méandrement

fortement variable sur quelques dizaines de mètres, ainsi qu'un engraissement de l'amont de la filandre observée sur les deux derniers relevés. Des artéfacts de mesure sont observés en bord est et ouest des relevés, principalement dus à la répartition fortement cross-shore de cibles de contrôle (centré sur la radiale ATLUS). Ainsi, pour l'observation et l'analyse des différentiels topographiques à l'échelle de l'estran, un zoom est réalisé sur la radiale ALTUS, bénéficiant de la meilleure précision (Figure 22). A l'échelle globale de l'estran, les différentiels montrent un gradient NE/SO une accrétion générale jusqu'à 20cm en bas de slikke, plus modérée sur l'estran sur la période mars 2015-septembre 2014, et à l'inverse une érosion entre 10 et 20cm entre septembre 2015 et mars 2015. Traduites en volumes, ces évolutions représentent un gain de 170m^3 puis une perte de 307m^3 (Tableau 4). Ces bilans généraux doivent être modulés par la forte hétérogénéité des érosions/dépôts. Ainsi, on peut noter pour la première période la présence de zone en érosion à l'Est (-3.5cm sur 3690m^2) et en dépôt à l'ouest ($+7.8\text{cm}$ sur 3960m^2). Ce pattern s'inverse pour la deuxième période, avec un estran majoritairement en érosion (-6.9cm de moyenne sur une zone de 5200m^2). De plus, les dynamiques sont plus fortes sur les zones éloignées des points ALTUS, où moins de cibles de référencement sont localisées, et pourraient être dues à une moins bonne précision des altimétries. Toutefois, les évolutions sont qualitativement acceptables.

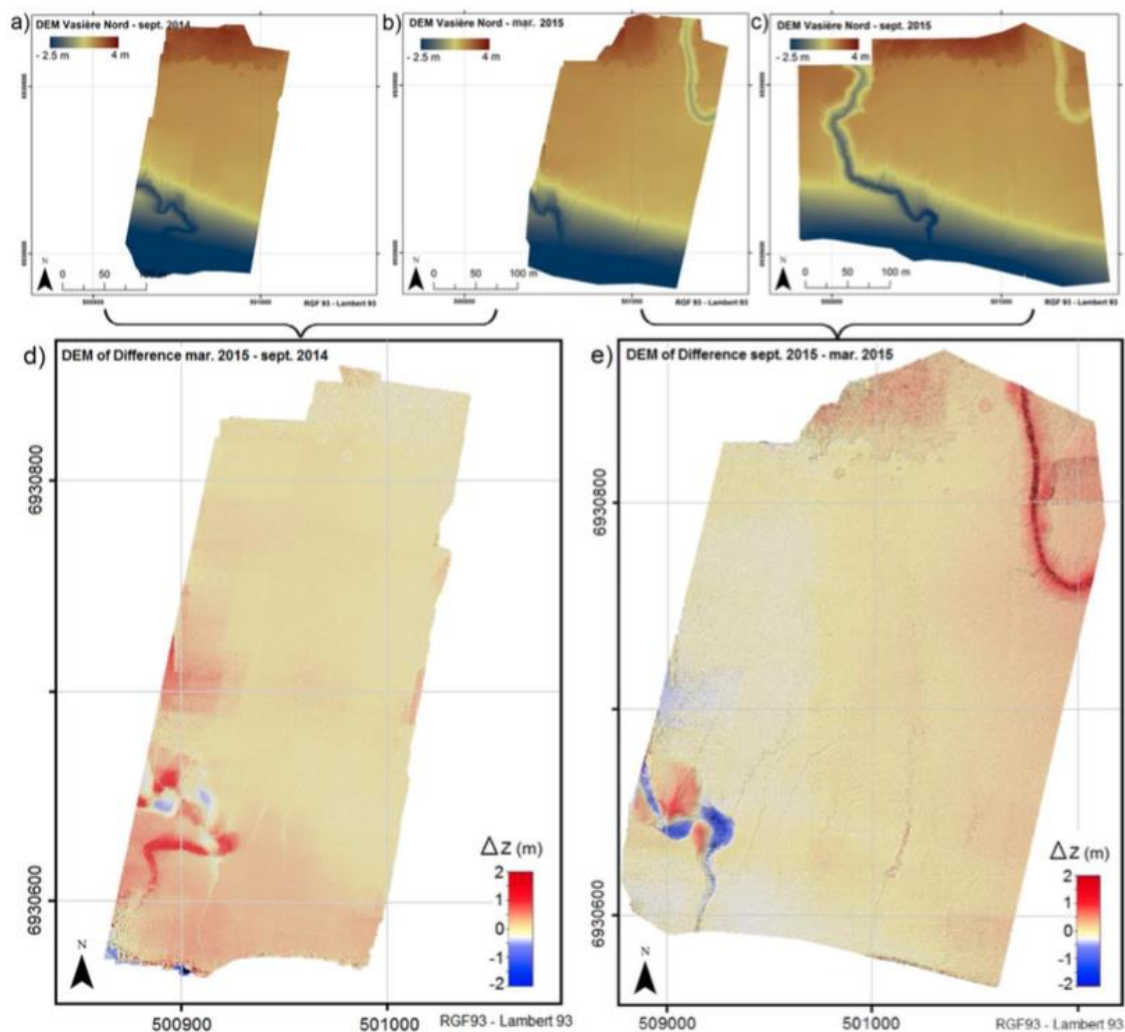


Figure 21 : MNT obtenus par photogrammétrie sur la Vasière Nord en a) Septembre 2014, b) Mars 2015, c) Septembre 2015, et d) différentiels Mars 2015-Septembre 2014 et e) Septembre 2015-Mars 2015.

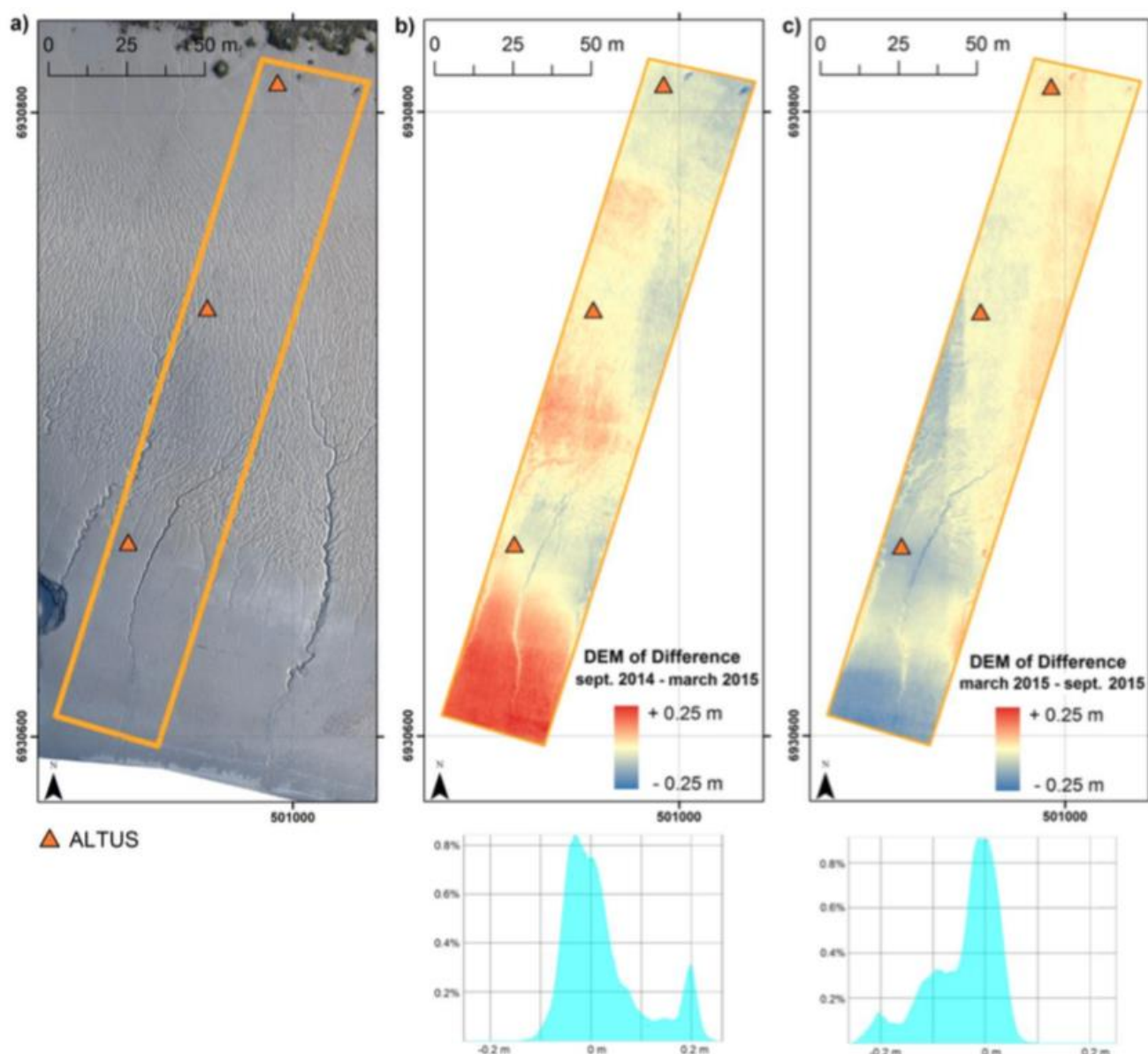


Figure 22 : Définition de la zone de travail estran (a), et présentation des différentiels topographiques entre Mars 2015 et Septembre 2014 (b) et Septembre 2015 et Mars 2015 (c).

Mars 2015 - Septembre 2014						
Volume déposé +309m ³	Surface 3961m ²	dz moyen +7.8cm	Volume érodé -131m ³	Surface 3688m ²	dz moyen -3.5cm	Budget total +178m ³
Septembre 2015 - Mars 2015						
Volume déposé +54m ³	Surface 2444m ²	dz moyen +2.2cm	Volume érodé -361m ³	Surface 5203m ²	dz moyen -6.95cm	Budget total -307m ³

Tableau 4 : Récapitulatif des évolutions morphologiques issues des relevés par drone entre septembre 2014 et septembre 2015

Au delà de la morphodynamique générale de l'estran, le relevé par drone permet de focaliser sur des objets sédimentaires structurants des vasières, comme les filandres (Figure 23 et Figure 24). A l'échelle annuelle, les suivis permettent de préciser la dynamique de l'embouchure, avec un déplacement vers l'Est du débouché de la filandre dans le chenal Nord, un fort méandrement dans la partie basse slikke (1.5m de profondeur en moyenne) et un léger

déplacement vers le Nord du point amont de la filandre. La profondeur de la filandre (partie aval) est nettement plus marquée en septembre qu'en mars, pour les deux années. Une micro-filandre débouche dans le méandre Nord, bien visible en septembre 2014 et mars 2015, formant à l'entrée du méandre un cône d'érosion. Ce cône d'érosion se comble rapidement entre mars 2015 et septembre 2015, associé à la migration vers l'est du méandre. Cette micro-filandre est suivie plus particulièrement, en s'intéressant à l'évolution de son profil longitudinal et à une section particulière, à l'amont de ce micro-système (Figure 24). Entre septembre 2014 et mars 2015, on observe un exhaussement de la filandre, suivant la dynamique d'ensemble de l'estran sur cette même période (Point A, +10cm). Les profils se rejoignent à mi-pente pour se différencier en bas de pente, caractérisé par un exhaussement du profil entre 1 et 20cm. En septembre 2015, le haut estran, de mi slikke au schorre, se traduit par un retour au niveau altimétrique de septembre 2014. La grande différence entre septembre 2015 et les deux précédents relevés concerne le bas de pente et le cône d'érosion, qui est totalement comblé. Associé à un dépôt de plus de 50cm. La micro-falaise en tête de cône n'est plus observée, et la pente générale se retrouve lissée à l'aval du point B. A noter que la structure et la profondeur de la micro-filandre restent étonnement stable (portion A-C) au cours de l'année (sep. 2014 – sep. 2015).

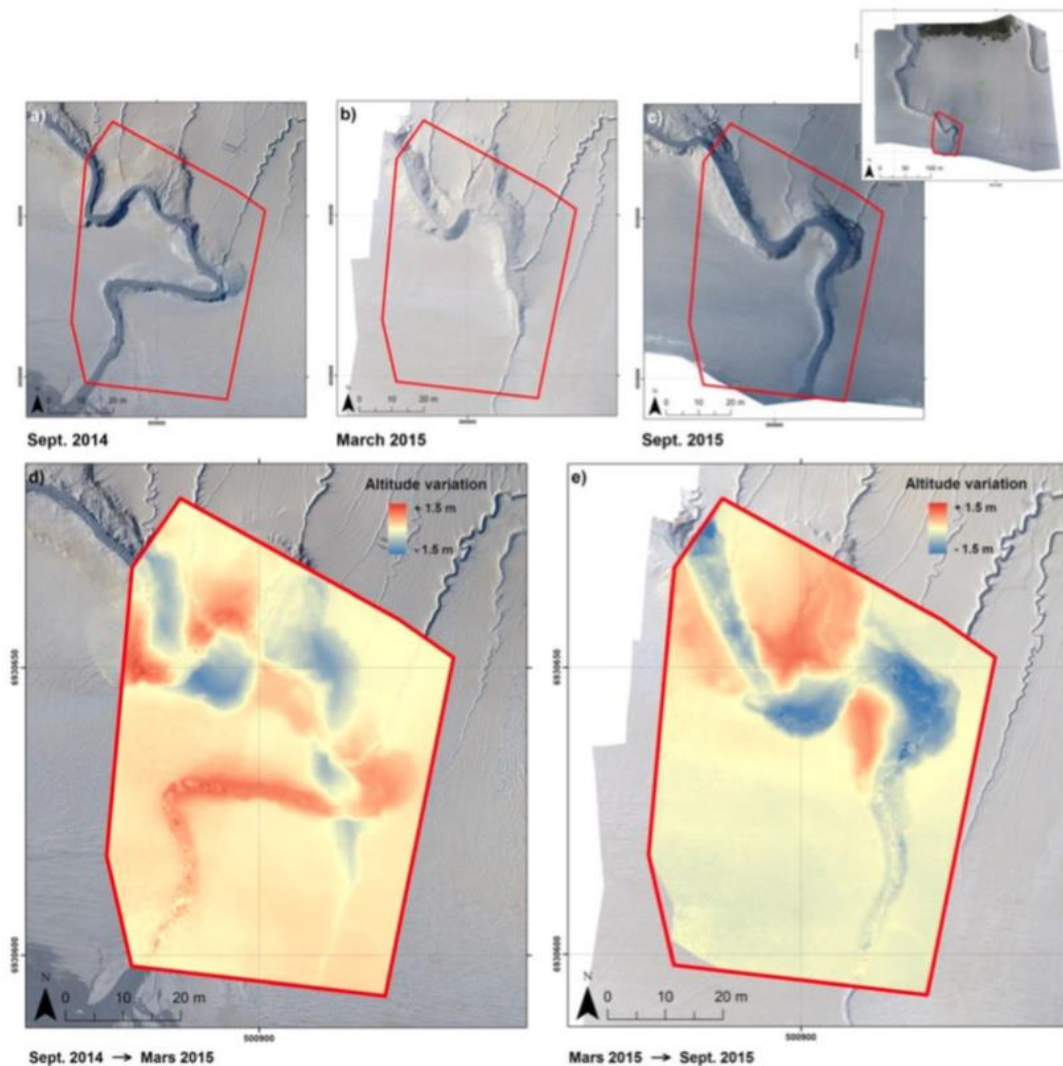


Figure 23 : Exemple de suivi de la dynamique de l'embouchure d'une filandre par drone, cas de la Vasière Nord

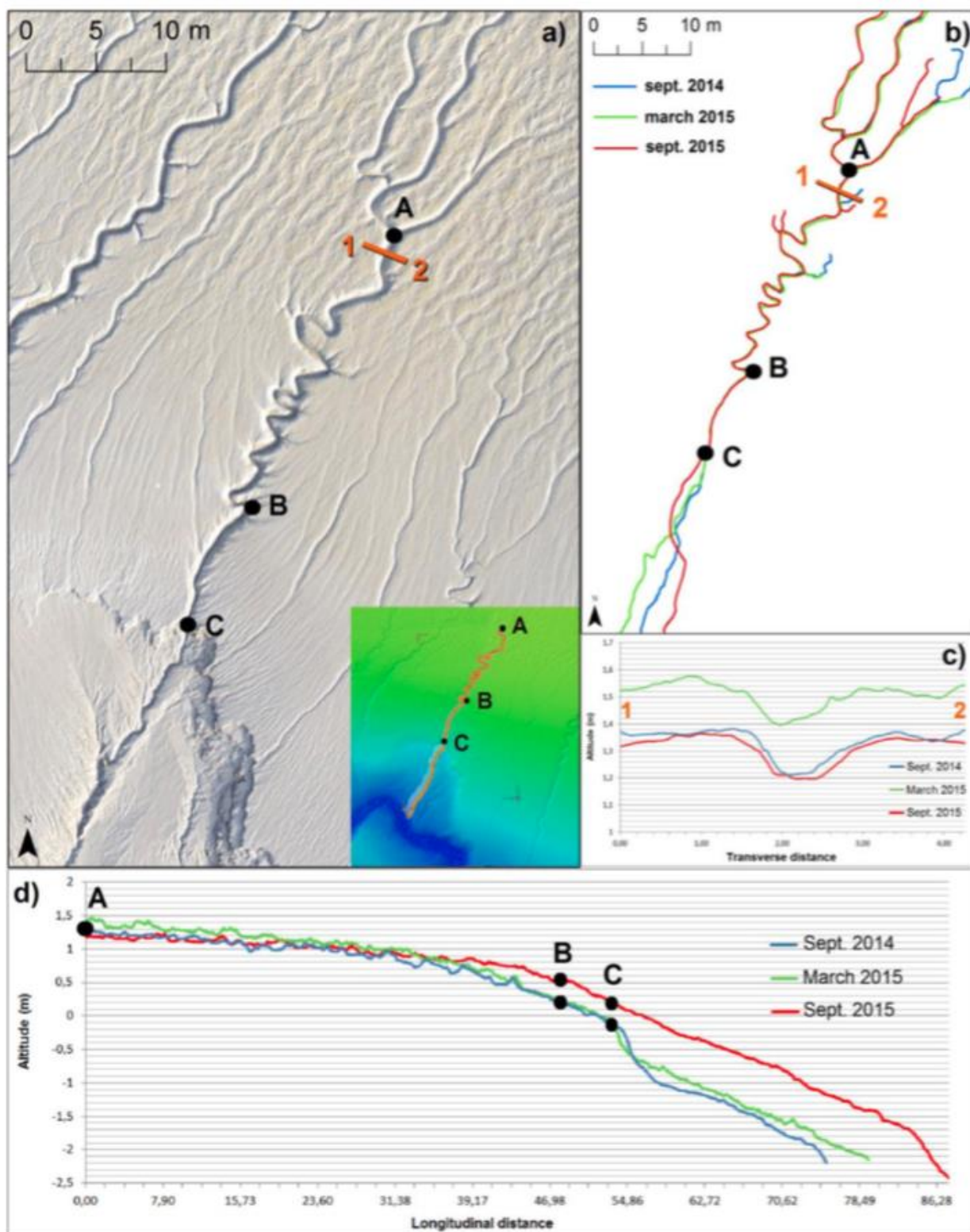


Figure 24 : Exemple de suivi d'une micro-filandre (milieu nord de la zone identifiée Figure 23) par drone : profil longitudinal.

Application des relevés Drone sur les vasières de Tancarville et de Pointe de la Roque

Les données acquises sur les deux autres vasières pilotes du projet ont été traitées selon le même protocole et les résultats sont illustrés ci dessous pour deux périodes distinctes : Septembre 2014/Mars 2015 à Pointe de la Roque, Mars 2015/Septembre 2015 à Tancarville. Les MNT reconstruits ont une résolution de l'ordre de 10cm en (x,y) sur les zones communes aux deux relevés analysés par site. Pour l'ensemble des sites, la plus grosse incertitude réside, comme pour la case de la Vasière Nord, dans le référencement absolu en z. Pour Tancarville et Pointe de la Roque, le raccordement des référencements est effectué en se basant sur l'écart d'altimétrie moyen observé par l'ALTUS entre chaque relevé. Seuls les différentiels sont présentés dans le rapport, les illustrations des MNT par date sont disponibles en annexe.

Pointe de la Roque

L'analyse des relevés topographiques sur le site Pointe de la Roque Aval montre un gradient cross shore des érosions/dépôts (Figure 25), avec une érosion significative du bas estran (de l'ordre de 50cm) et une accrétion du haut estran (entre 30 et 50cm). La distribution des érosions/dépôts indique un site majoritairement en érosion (Figure 26). Ce basculement de pente doit cependant être confirmé, notamment en analysant la points DGPS de référence. Une analyse identique est réalisée pour le site Pointe de la Roque Amont (Figure 27 et Figure 28) : Contrairement au site aval, l'ensemble de la vasière semble en érosion, et en particulier la slikke, caractérisé par une érosion de 50cm, en lien avec la mesure ALTUS. Les niveaux d'érosion les plus forts semblent associés à des zones végétalisées, plus développées en septembre qu'en mars, et qui accentuent le différentiel. Un point de référence absolu peut être trouvé pour ce site, à savoir une portion de route au bord Nord-Est des relevés. Sur la base d'un référencement ALTUS, un écart de près de 30cm est calcul, ce qui semble peu probable. Un nouveau différentiel topographique a été construit en cherchant un niveau stable sur ce point (Figure 29). Dans ce cas, le site est toujours globalement en érosion mais de façon moins marquée, de l'ordre de 5cm (Figure 30). Ces observations confirment l'hypothèse d'un contrôle fort du site du Pointe de la Roque par la présence du bouchon vaseux, positionnés plus à l'amont en étiage et permettant une accrétion significative en fin d'été, et une érosion progressive par les agents hydrodynamiques en période de débit forts.

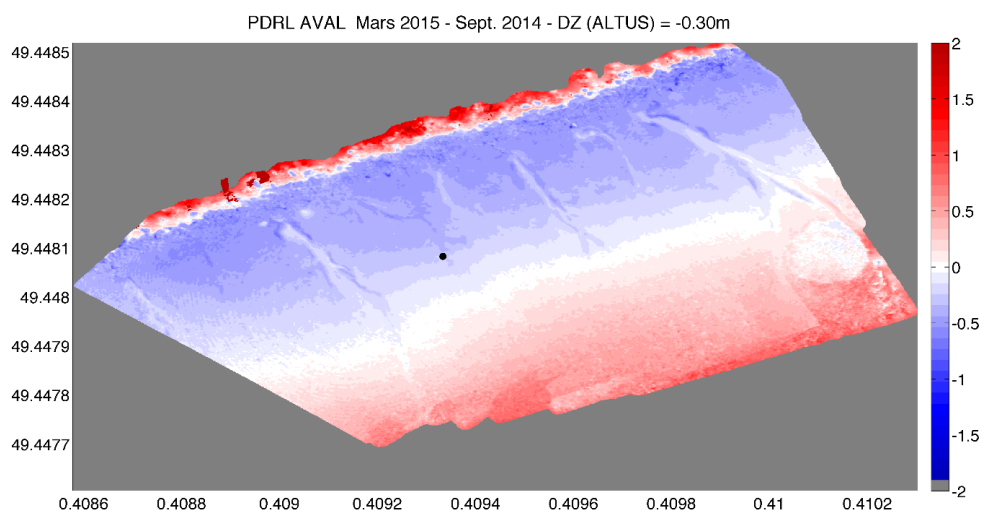


Figure 25 : Différentiel topographique sur le site de Pointe de la Roque Aval entre Mars 2015 et Septembre 2014. Le point localise l'ALTUS qui sert de référence verticale commune aux deux relevés.

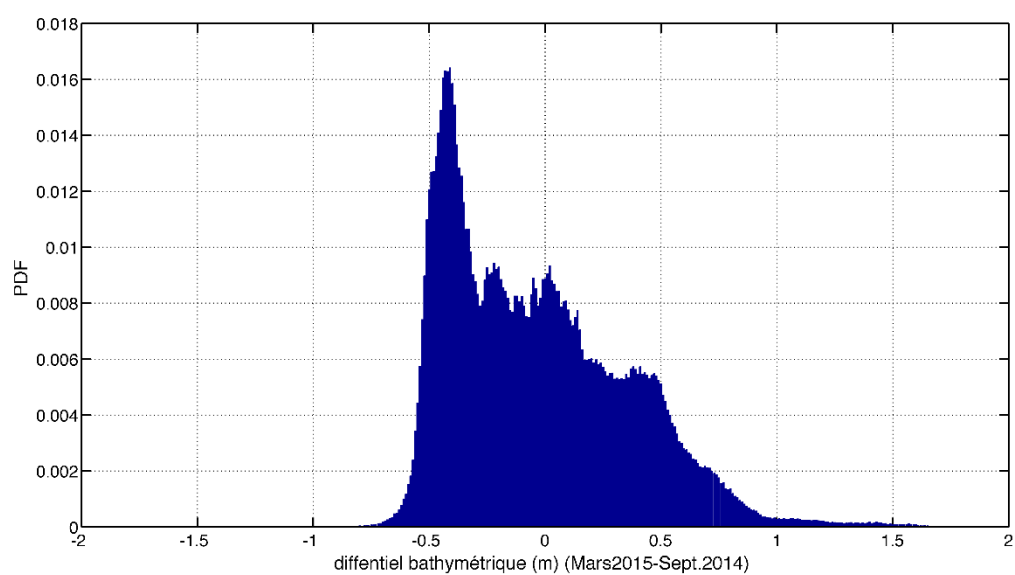


Figure 26 : Distribution des érosions/dépôts sur le site Pointe de la Roque Aval entre Septembre 2014 et Mars 2015.

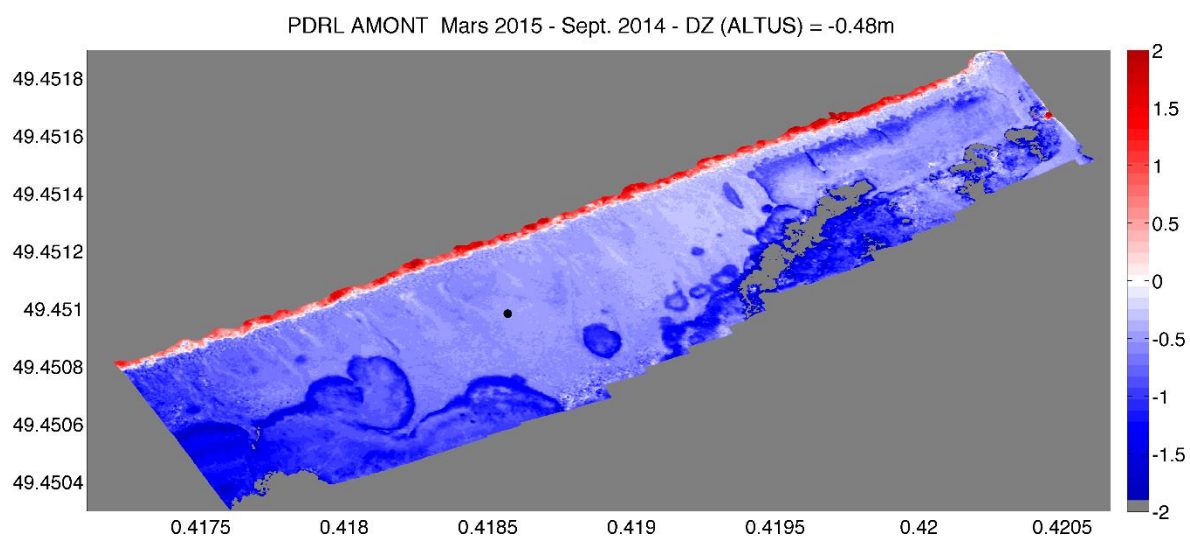


Figure 27 : Différentiel topographique sur le site de Pointe de la Roque Amont entre Mars 2015 et Septembre 2014. Le point localise l'ALTUS qui sert de référence verticale commune aux deux relevés.

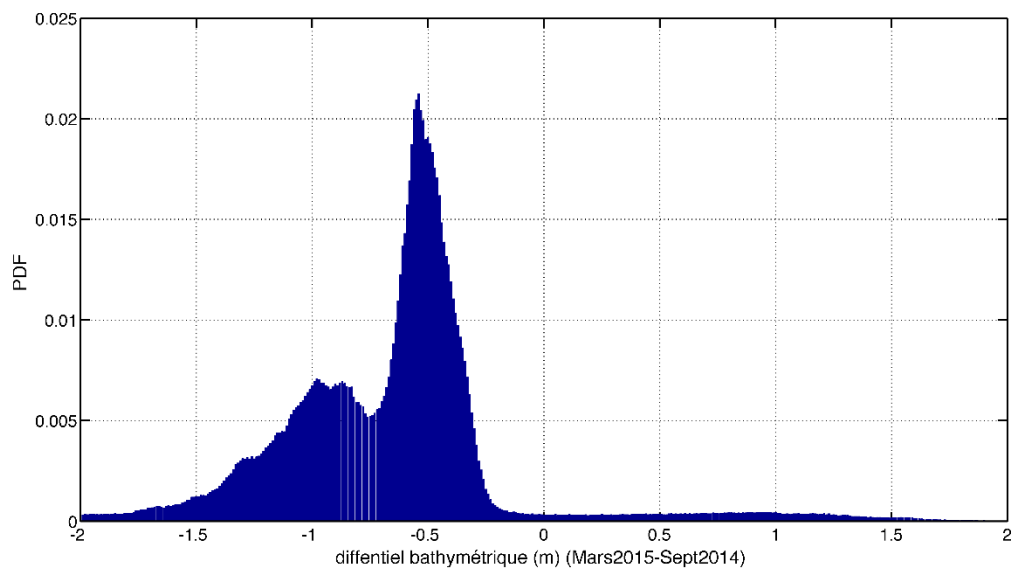


Figure 28 : Distribution des érosions/dépôts sur le site Pointe de la Roque Amont entre Septembre 2014 et Mars 2015.

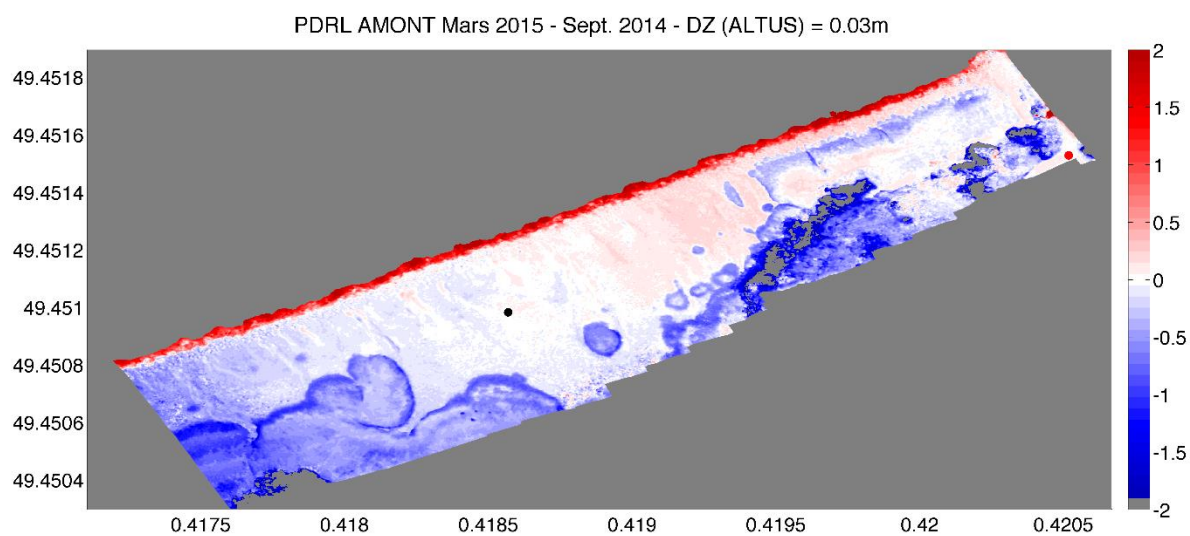


Figure 29 : Différentiel topographique sur le site de Pointe de la Roque Amont entre Mars 2015 et Septembre 2014. Le point noir localise l'ALTUS. Le point rouge précise le point de référence entre les deux relevés.

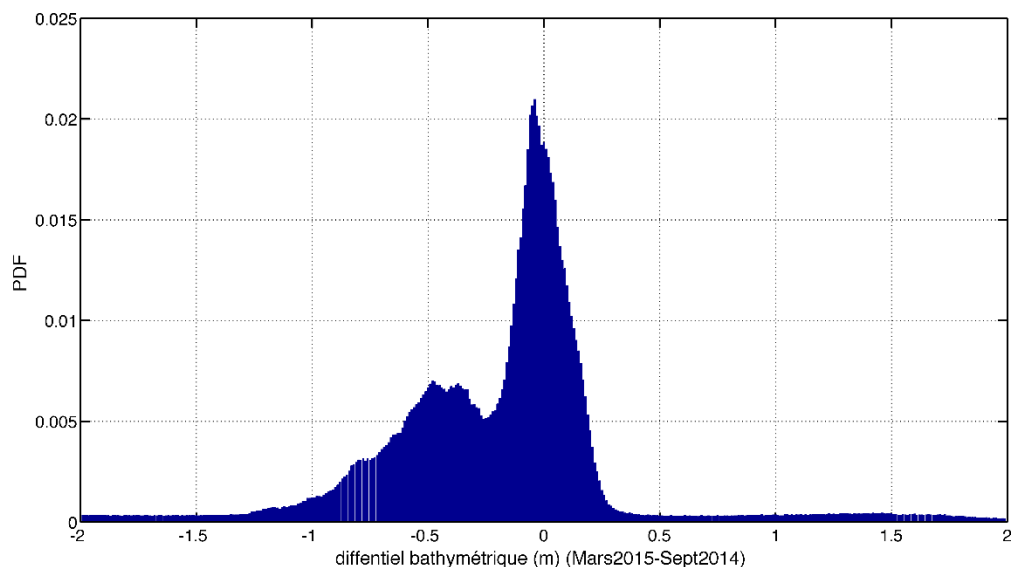


Figure 30 : Distribution des érosions/dépôts sur le site Pointe de la Roque Amont entre Septembre 2014 et Mars 2015

Tancarville

Le site de Tancarville Aval se caractérise globalement par une érosion en partie intertidale (Figure 31) de l'ordre de 5 à 10cm (5cm au niveau de l'ALTUS - Figure 32). Le référencement vertical entre les deux relevés semble pertinent car la route, en bordure Sud-Est de la carte, se caractérise par un écart de l'ordre du cm. Les zones Sud associées à ces fortes « accrétion » sont des zones végétalisées, et donc doivent être exclues de l'analyse. Les bords amont/aval de la zone se caractérisent par de fortes dynamiques. Toutefois, ces résultats doivent être considérés avec précaution car en limite de la zone de validation par les données DGPS. La zone proche de l'ALTUS est très active, tant en érosion qu'en accrétion, ce qui démontre encore une fois l'apport des relevés drone permettant de spatialiser les analyses ALTUS.

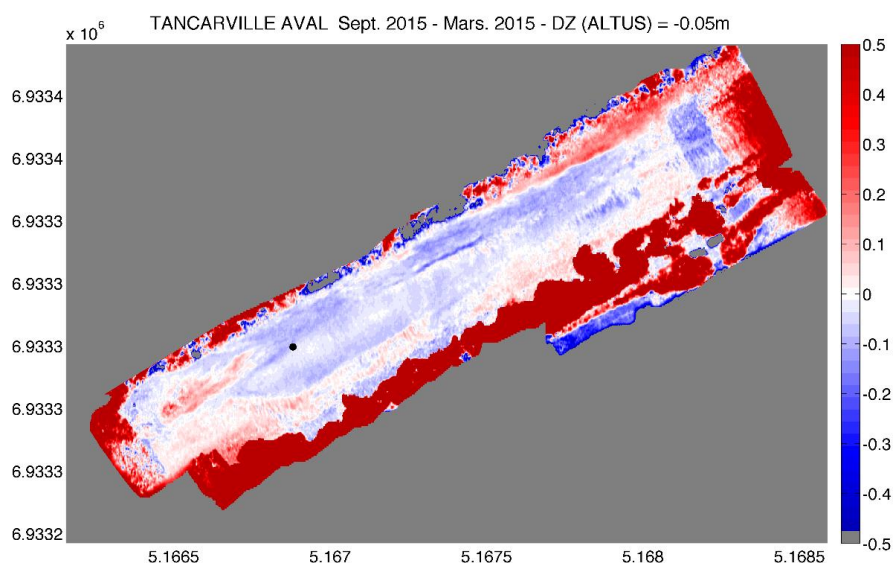


Figure 31 : Différentiel topographique sur le site de Tancarville Aval entre Septembre 2015 et Mars 2015. Le point localise l'ALTUS qui sert de référence verticale commune aux deux relevés.

Le site Tancarville Amont est lui aussi caractérisé par une dynamique globalement d'érosion (Figure 33), entre 5 et 10cm (Figure 34). La zone Nord, en bordure du chenal principal de la Seine et des enrochements semble elle globalement en accrétion, entre 5 et 15cm. La zone de transition entre basse slikke et le chenal secondaire de marée se caractérise elle par une dynamique d'accrétion sur l'ensemble du domaine longshore.

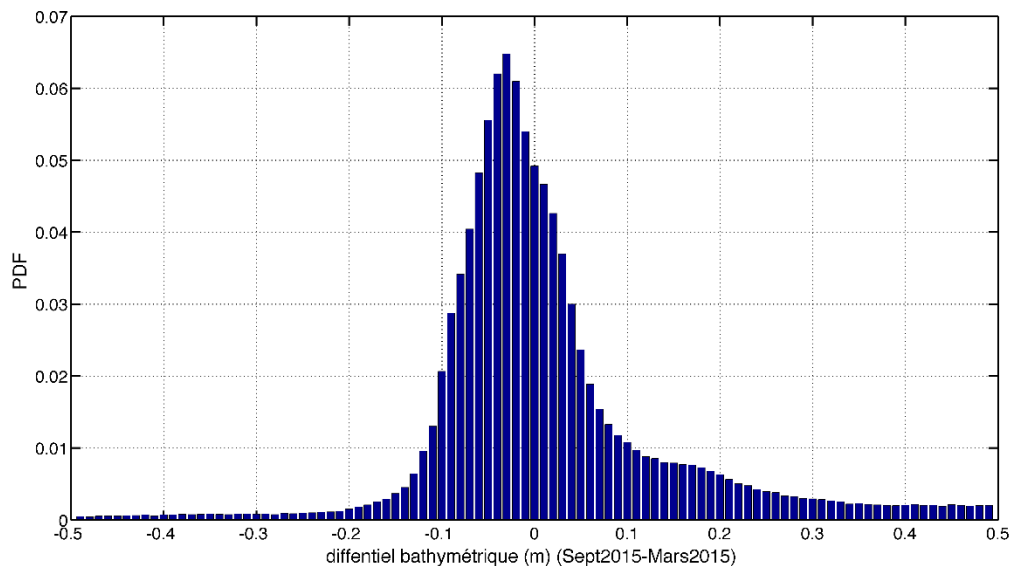


Figure 32 : Distribution des érosions/dépôts sur le site Tancarville Aval entre Mars 2015 et Septembre 2015

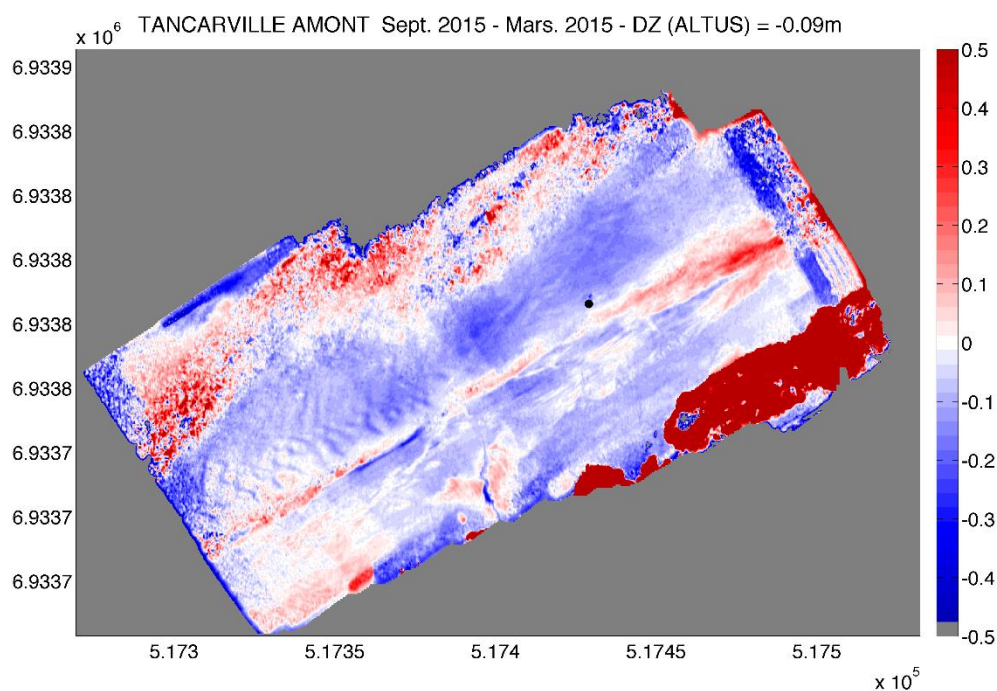


Figure 33 : Différentiel topographique sur le site de Tancarville Amont entre Septembre 2015 et Mars 2015. Le point localise l'ALTUS qui sert de référence verticale commune aux deux relevés.

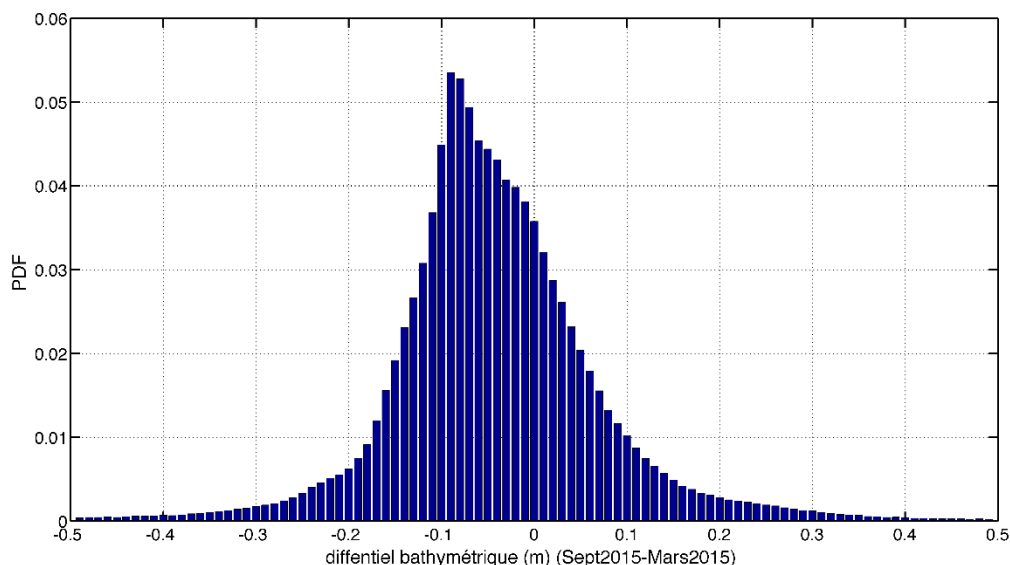


Figure 34 : Distribution des érosions/dépôts sur le site Tancarville Amont entre Mars 2015 et Septembre 2015

1.2.5 Relevés TLS

Concernant les différents levés TLS sur les trois sites, l'effort a été mis dans le traitement des données acquises sur la Vasière Nord. Aujourd'hui, 2 levés (février et juin 2015) sont disponibles. Ce travail a fait l'objet du stage de Master 2 de l'ENSTA de Julien Le Mercier (rapport en annexes).

Traitement du nuage de point et précision des relevés TLS

Le nuage de points issu des mesures TLS est par construction dense et non structuré. Cependant, la densité de point par surface élémentaire diminue avec l'éloignement du laser. Un premier travail a consisté à analyser la configuration optimale du futur MNT, un compromis entre résolution, portée et densité de point (Figure 35). Afin de pouvoir comparer les MNT drone (11 mars 2015) et TLS (19 février 2015), le MNT TLS a été projeté sur une grille régulière de 5cmx5cm. A cette résolution, la densité de point par maille chute avec l'éloignement du pixel au laser, i.e. avec la surface couverte par le TLS. Il faut dès maintenant noter que les références verticales absolues des levés bruts TLS et bruts drone étaient significativement différentes, de près de 3m, avec plusieurs causes probables : référencement incertain des cibles de base (TLS ou drone), incertitude sur la prise en compte des altitudes des perches DGPS... Dans un premier temps, l'offset optimal minimisant les écarts entre TLS et drone a été recherché (soit 2.909m (Figure 36) – les données ALTUS mesurant des différences altimétriques de l'ordre de 5mm entre les deux dates). Sur cette base, les écarts moyens et RMSE entre mesures par drone et mesures TLS ont été calculés en fonction de la densité de point du TLS. L'écart RMSE est stable, autour de 2cm, pour une densité de point supérieure à 10. Cette incertitude est proche de celle estimée par le drone à partir des cibles références, et confirme la précision des relevés drone (à densité de point forte, la mesure TLS est considérée comme proche de la référence). La densité optimale a été choisie à 5 points par

maille, permettant de couvrir une surface de 2000m² (près de 2 fois plus qu'avec une densité de 10 points par maille) et en limitant l'incertitude en z à 2.3cm.

Contrairement aux relevés par Drone, les mesures TLS n'ont pas été associées à de mesures complémentaires géoréférencées qui permettraient de tester directement la qualité du MNT produit. On peut toutefois estimer que celle-ci est au meilleure que 2.3cm. Un exemple de MNT restitué est présenté : pour la configuration choisie, le TLS ne permet pas une couverture parfaitement continue du transect, mais une série de disques de 20m de diamètre, avec une limite de pixel diffuse au delà de 20m.

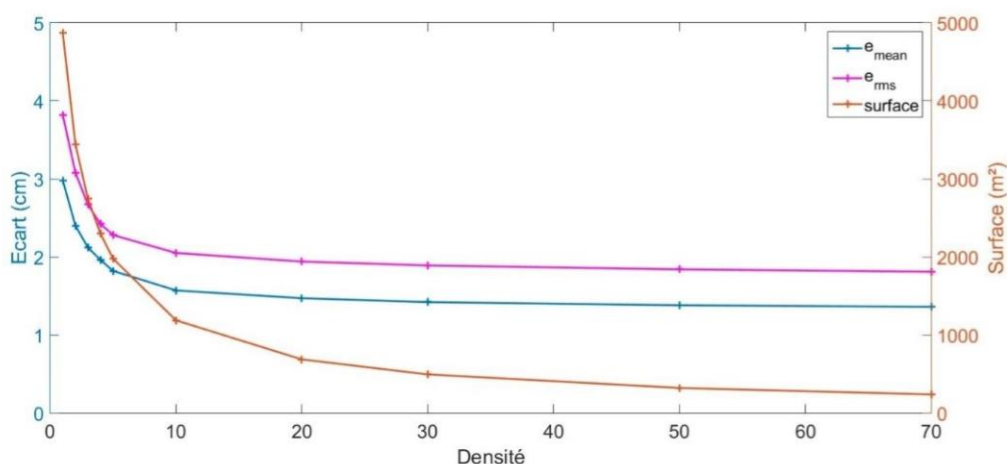


Figure 35: Structuration du nuage de points des mesures TLS (pour un maillage cible de 5cmx5cm) et écart altimétrique issu de la comparaison avec le MNT drone (février 2015 (TLS) et mars 2015 (Drone)).

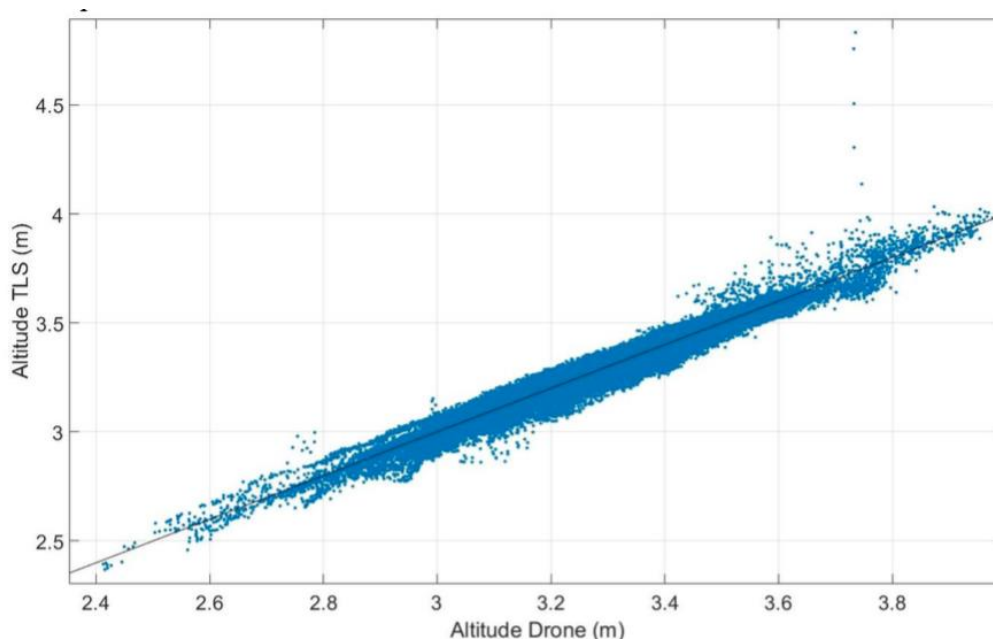


Figure 36 : Comparaison pixel à pixel des données altimétriques TLS et drone

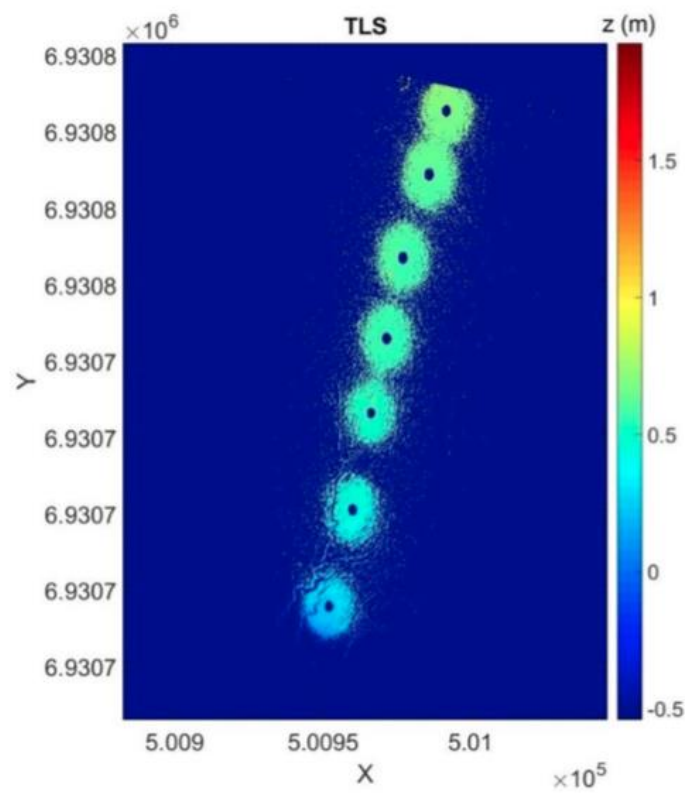


Figure 37 : Exemple de MNT issue de la mesure TLS – Vasière Nord, février 2015

Analyse morphologique – exemple du transect en Vasière Nord

L'apport du TLS pour l'évaluation des évolutions morphologiques a été testé en s'intéressant au différentiel topographique entre juin et février 2015 (Figure 38). Une analyse préliminaire montre une accrétion générale du transect, de 5cm +/- 2cm, avec une très forte hétérogénéité spatiale associée à des microstructures alignées Nord/Sud. La dynamique générale est en accord avec les mesures ALTUS, qui confirment une accrétion de 1 à 1.5cm entre le haut et le bas estran. Les variabilités à micro-échelle confirment l'intérêt de quantifier la représentativité des mesures ALTUS.

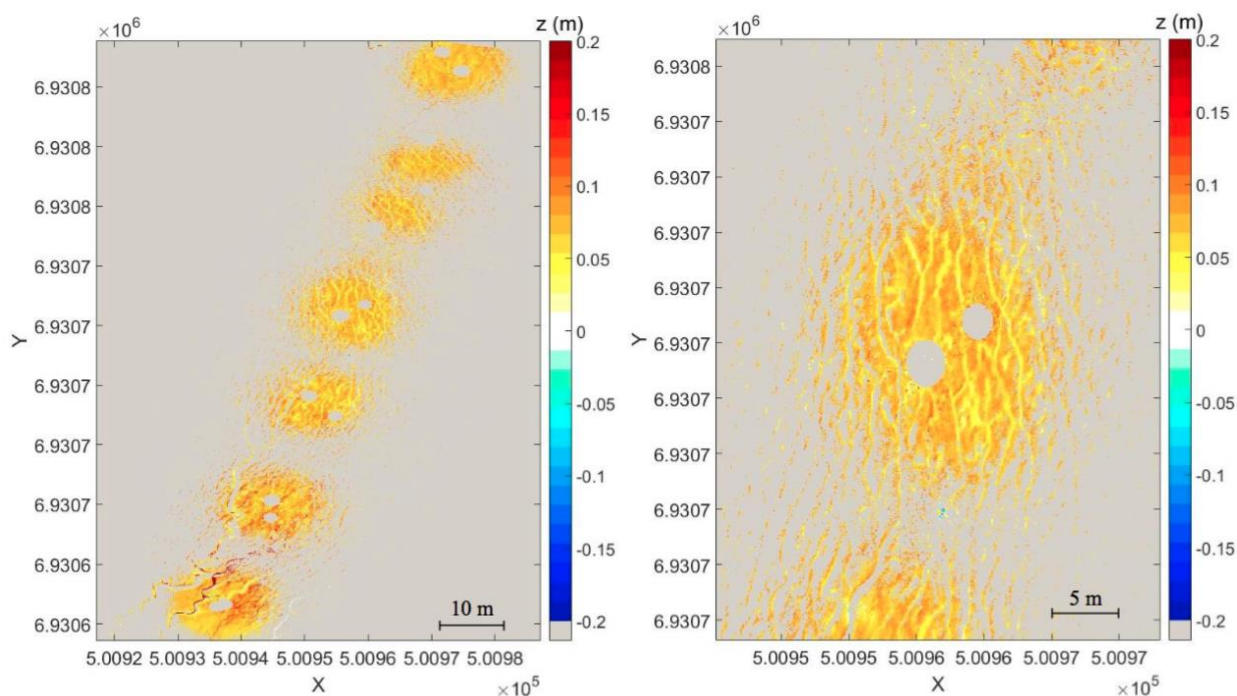


Figure 38 : Analyse des évolutions morphologiques sur la Vasière Nord issue des différentiels TLS du 30 juin 2015 et du 19 février 2015 (gauche : transect complet, droite zoom sur la zone mi-estran)

1.2.6 Intercomparaison et complémentarités des techniques d'observations ALTUS/TLS/DRONE

Représentativité des mesures ALTUS

Pour cette analyse de représentativité, nous utiliserons les données drone, qui permettent d'obtenir une vision saisonnière et annuelle de la dynamique (Figure 39). Les ALTUS haut et bas estrans seront utilisés, car couvrant l'ensemble de la période de mesure contrairement à l'ALTUS de mi-estran. Concernant l'ALTUS bas estran, l'ALTUS montre un bilan positif avec 3 à 4cm d'accrétion, conforme au bilan issu des données drone. Il est toutefois important de noter la forte variabilité à petite échelle, avec une zone au sud est de l'ALTUS sans dynamique marquée, qui pourrait être associée à l'intervention des opérateurs lors du déchargement des données. Concernant l'ALTUS de haut estran, une analyse quantitative des variations altimétriques autour de l'altimètre est réalisée, en calculant le bilan moyen sur des surfaces concentriques croissantes : 2, 5 et 10 m (Tableau 5). Les dynamiques

saisonnnières sont bien représentées par les deux techniques d'observations. Entre septembre 2014 et mars 2015, l'ALTUS mesure une érosion de 2 à 3cm, tandis que le différentiel altimétrique vu par le drone, pour une zone de 2m de rayon, donne une érosion moyenne de 4.9cm (± 4.7 cm). Entre mars 2015 et septembre 2015, l'ALTUS enregistre une accrétion de 5cm à 6cm, contre 3.1cm (± 4.4 cm) pour les données altimétriques par Drone. Cependant, l'élargissement de la zone autour de l'ALTUS montre qu'au delà de 5m de rayon, les données altimétriques peuvent ne plus être représentatives du fait de la présence de structures moyennes échelles qui possèdent leur propre dynamique, comme les micro-filandres, les patches de végétation... La mesure ALTUS reste donc une mesure ponctuelle, qui doit être complétée par une observation plus spatialisée.

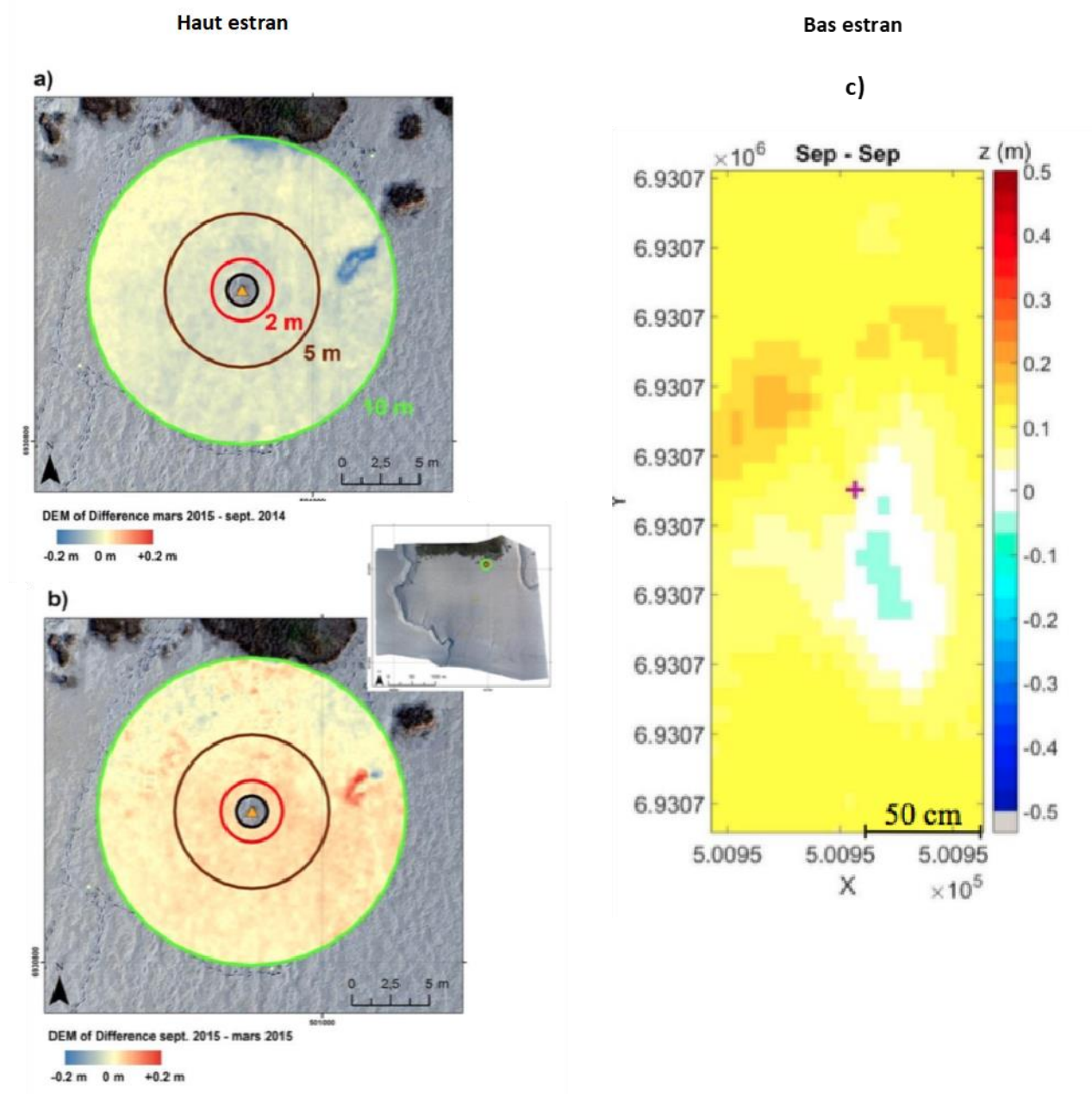


Figure 39 : Représentativité des mesures ALTUS. a-b : ALTUS haut estran : les bilans érosion/dépôt sont calculés sur des zones concentriques croissantes pour estimer la représentativité spatiale de l'ALTUS (2, 5 et 10m). c : ALTUS bas estran.

	Septembre 2014 - Mars 2015	Mars 2015 - Septembre 2015
Variation altimétrique mesurée par l'ALTUS	-2cm à -3cm	+5cm à +6cm
Variation altimétrique mesurée par Drone et moyennée sur un disque de 2m de rayon	-4.9cm (+/-4.7cm)	+3.1cm (+/-4.4cm)
Variation altimétrique mesurée par Drone et moyennée sur un disque de 5m de rayon	-4.2cm (+/-4.7cm)	+2.6cm (+/-4.4cm)
Variation altimétrique mesurée par Drone et moyennée sur un disque de 10m de rayon	-3.7cm (+/-4.7cm)	+1.6cm (+/-4.4cm)

Tableau 5 : Bilan des variations altimétriques observées par ALTUS et par Drone : analyse de la représentativité spatiale des ALTUS (les précisions entre parenthèses sont celles des MNT drone)

Discussion générale

Toutes les vasières intertidales de l'estuaire de Seine étudiées dans le cadre du projet HYMOSED se caractérisent par une très forte variabilité temporelle, associée aux forçages hydrologiques, hydrodynamiques et à la disponibilité en sédiment directement corrélée à ces forçages. En ce sens, les ALTUS démontrent totalement leur intérêt, seul instrument permettant une observation précise, autonome, en continu et à haute fréquence. Cependant, à cette variabilité temporelle se superpose une intense variabilité spatiale, avec des gradients d'accrétion/érosion significatifs à l'échelle du mètre à la centaine de mètre, souvent générés par ces mêmes forçages. De plus, il est important de rappeler que ces vasières intertidales se caractérisent par des patterns sédimentaires structurants : des étendues à faibles gradients bathymétriques (estrans) où se développent des micro-chenaux organisant le drainage de la vasière en jusant et se regroupant à l'aval du système pour former des filandres qui segmentent l'estran du schorre au chenal. Ces différentes échelles spatiales ont parfaitement pu être observées et leurs évolutions quantifiées à travers les relevés drone ou TLS. Un verrou majeur a cependant été identifié, et qui reste encore à lever : la nécessité « absolue » de bénéficier d'un ou plusieurs points de repères fixes, parfaitement géoréférencés, qui permettraient un recalage optimal des MNTs réalisés. En effet, lors du levé Drone de mars 2015 (pour la vasière Nord, mais également observé sur les autres sites), l'altitude de la perche n'a pas été notée, qui a ainsi nécessité un calage manuel du MNT, diminuant la confiance dans la précision du MNT (cf différences de traitement entre la publication de Jaud et al., (2016), pour lequel le MNT a été recalé, comparé au rapport de J Le Mercier, avec les données brutes). Une difficulté du même ordre est apparue lors d'un relevé TLS, où les altitudes des cibles de références n'avaient pas été correctement notées. Des amers fixes permettraient de palier à ces difficultés de géoréférencement absolues, primordiales pour les analyses des différentiels altimétriques. Un second point critique, tant pour les levés par drone ou TLS, est associé au nombre et à l'espacement des cibles de références géolocalisées. Si l'option de concentrer les cibles autour des ALTUS a permis d'obtenir des précisions intéressantes près des instruments, une distribution plus homogène de ces cibles permettrait une spatialisation plus fiable de l'information altimétrique.

Un futur suivi des vasières intertidales devrait donc faire appel à minima à deux des techniques mises en œuvre, à savoir une mesure ponctuelle haute fréquence (ALTUS) et une mesure spatialisée basse fréquence (TLS ou Drone), avec la prise en compte des pistes d'amélioration détaillées plus haut. La mesure haute fréquence permet un suivi fin des

processus de contrôle, de la marée à l'échelle annuelle. La mesure spatialisée est indispensable pour compléter cette vision locale, observer les modifications morphologiques des vasières et estimer des bilans sédimentaires plus précis. La fréquence de réalisation de ces levés spatialisés est à envisager au cas par cas, en fonction de leur position dans l'estuaire, des processus contrôlant les transferts sédimentaires et de la question posée. Les données ALTUS permettent de replacer dans un contexte haute fréquence les relevés spatialisés, et d'évaluer la qualité des MNT sur quelques points de contrôle. Si la quantification du bilan sédimentaire est facilement accessible en volume par le couplage de ces méthodes, l'évaluation bilans massiques globaux nécessite, en parallèle des mesures spatialisées, d'effectuer des prélèvements de sédiments superficiels afin de proposer une estimation réaliste de la concentration en sédiment.

II. Etude des structures turbides de surface à l'embouchure de l'estuaire de Seine : apport des images satellite MODIS AQUA

L'utilisation des images couleur de l'eau est largement répandue en domaine hauturier et dans les mers côtières pour quantifier la production primaire (via la chlorophylle a) et la concentration en MES (Gohin 2011 ; Doxaran et al., 2009). L'exploitation des données couleur de l'eau et des réflectances satellite devient plus complexe en domaine estuarien car le rapport signal/bruit peut devenir faible avec l'augmentation des concentrations, augmentant significativement les incertitudes. L'objectif de l'action Télédétection consiste à consolider les résultats obtenus lors du projet SA4 MODEL au sein de l'estuaire, en proposant des évolutions de l'algorithme empirique et en construisant un algorithme régional à partir de mesures de réflectances in situ. Après un travail méthodologique sur les algorithmes d'inversion et leur validation, le rejeu de l'archive MODIS FR 250m 2002/2014 sera produit et mis à disposition. Cette base de données sera ensuite exploitée en termes de dynamique des structures turbides d'embouchure et proche baie de Seine.

1.3 Méthodes

La méthode d'inversion des données satellite couleur de l'eau consiste le plus souvent à adapter une relation empirique entre les réflectances de certaines bandes spectrales, ou des rapports de bandes spectrales, et le paramètre étudié quantifié à partir de mesures in situ (turbidité et/ou concentration en MES). Les deux approches décrites dans la littérature et mises en œuvre dans le cadre du projet HYMOSED sont présentées ci-dessous.

1.3.1 Algorithme empirique et « Matchups »

La construction d'un algorithme empirique utilise les « Matchups », i.e. la correspondance entre une mesure in situ (de turbidité ou de concentration en MES) et la valeur de réflectance satellite du pixel le plus proche, qui suppose une relative homogénéité de l'environnement côtier à l'échelle du pixel. Cette méthode est appliquée avec succès en mer côtière, où les gradients horizontaux de MES sont relativement faibles. La tâche se complique en estuaire où plusieurs difficultés se cumulent : i) les gradients horizontaux de MES sont très importants, ii) la proximité de la côte induit des effets de bords et nécessite un filtrage particulier des données satellite.

Dans le cadre de l'estuaire de Seine, un filtre spatial contraignant a été mis en place pour exclure de l'analyse les données bruitées la présence de la côte, et particulièrement à l'amont du Pont de Normandie. Du fait de la faible largeur de la section du fleuve en amont, de la résolution des images satellite (250m), aucune donnée n'est conservée à l'amont de La Roque.

1.3.2 Algorithme régional et mesures in situ

La construction d'un algorithme « régional » s'appuie sur une relation empirique entre les réflectances mesurées in situ et les MES. Cette méthode s'affranchit de la faible résolution

des images satellite comparée aux gradients de MES, ainsi que des corrections atmosphériques.

Une campagne de mesures in situ a été menée le 10 Septembre 2014, au niveau de la station SYNAPSES Fatouville. Des capteurs (radiomètres) TRIOS mesurent le spectre d'éclairement en longueur d'onde en mode quasi continu de 350nm à 950nm, tandis que des prélèvements de MES sont effectués en parallèle pour la calibration de l'algorithme en concentration en MES. Des mesures ont été réalisées sur un demi cycle de marée, de fin de flot à mi jusant, permettant de cumuler des observations sur un large gradient de MES, représentatif des variations de concentration observés dans le bouchon vaseux (Figure 40). Ces concentrations en MES sont alors confrontées aux réflectances spectrales des capteurs TRIOS, qui recouvrent parfaitement les bandes spectrales de MODIS AQUA (Figure 41).

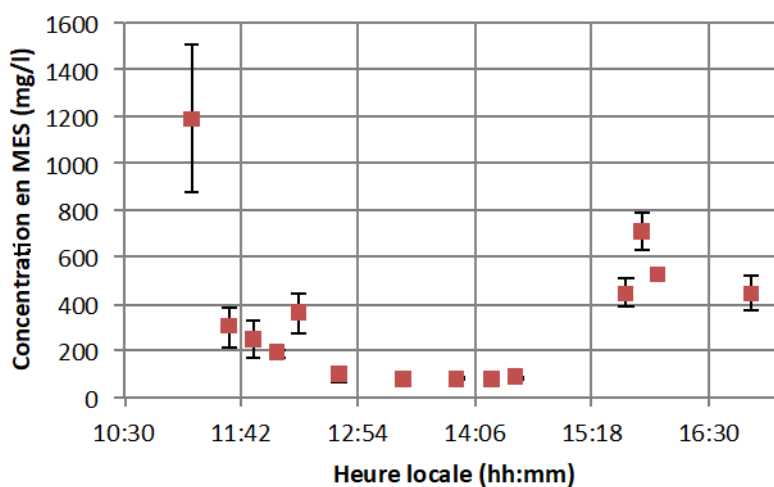


Figure 40 : Mesures (triplicat) de concentration en MES échantillonnées lors de la campagne in situ

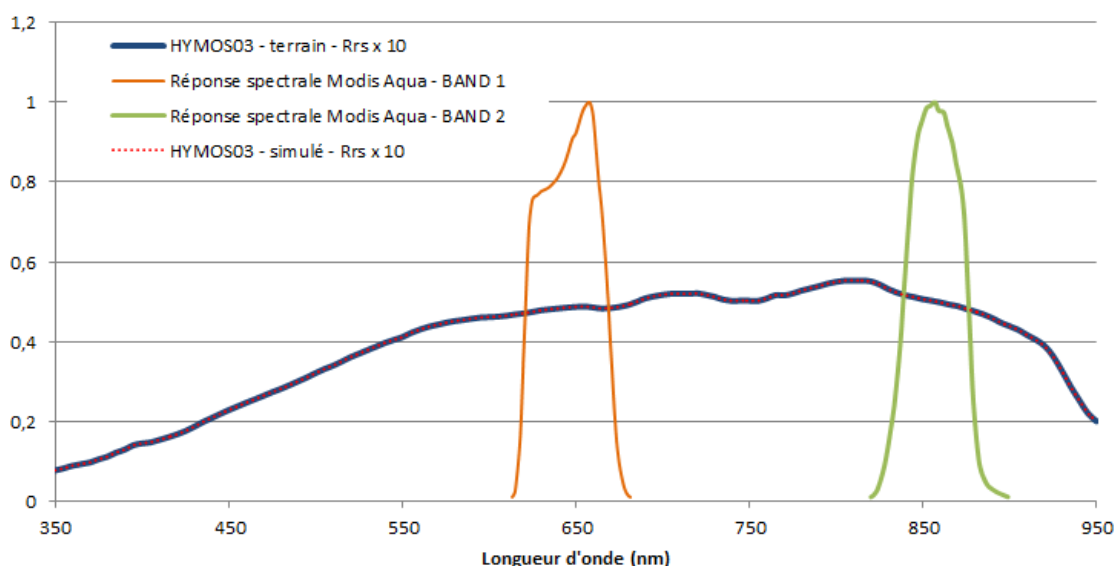


Figure 41 : Exemple de réflectances spectrales des capteurs TRIOS et étalement des bandes spectrales du capteur MODIS AQUA

1.3.3 Jeux de données utilisés

Deux jeux de données satellite ont été mobilisés : une archive MODIS AQUA 250m de 2002 à 2014 de réflectance de surface, construite par Géotransfert pour ce projet, une archive MODIS AQUA 250m/1000m de 2002 à 2016 de concentration en MES fournie par RBINS à partir de l'algorithme Nechad et al. (2010).

Différents jeux de données in situ ont également été utilisés : Pour MODIS Géotransfert : les données MAREL Honfleur de 2003 à 2006, les données MODEL Carosse (oct. 2008-2009), MODEL Fatouville (sept. 2010- avril 2011), MODEL Ratiers (janv. 2010-juin 2011), et pour MODIS RBINS : les données D4-Carosse (avril 2015-2016).

1.4 Résultats

1.4.1 Construction d'un algorithme régional

La confrontation des réflectances TRIOS correspondant aux bandes 1 et 2 de MODIS AQUA 250m avec les concentrations en MES montre une sensibilité différente en fonction des concentrations en MES, comme déjà observé dans la littérature. Pour les faibles concentrations en MES inférieures à 150mg/l, chaque bande spectrale a une forte sensibilité à l'augmentation en MES. Cette sensibilité diminue pour les concentrations supérieures à 150mg/l (Figure 42). Afin d'augmenter la performance du futur algorithme dans les fortes concentrations, le ratio des réflectances R_{rs850}/R_{rs650} est également confronté aux mesures de concentration en MES (Figure 43). On observe ainsi une très bonne corrélation entre les rapports de réflectance et la concentration en MES pour des valeurs de concentrations supérieures à 150mg/l, avec une dispersion limitée. En deçà de cette concentration seuil, le rapport des réflectances permet de recalculer des concentrations mais pourrait ne pas être le proxy le plus pertinent.

Suite à ces calibrations, un premier algorithme peut être proposé :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} < 0.1 & MES_{mg/l} = ? \\ \text{Si } 0.1 < \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} < 0.34 & MES_{mg/l} = 81.78 \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} + 65.23 \\ \text{Si } 0.34 < \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} & MES_{mg/l} = 1536.5 \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} - 364.16 \end{array} \right.$$

Il faut noter que la faible densité de concentrations inférieures à 50mg/l ne permet pas de conclure sur la robustesse de l'algorithme pour cette gamme de turbidité. A l'opposé, seule une valeur a été mesurée au delà d'un rapport de réflectance supérieur à 0.62. Il faut donc prendre avec précaution les valeurs recalculées au delà de cette limite.

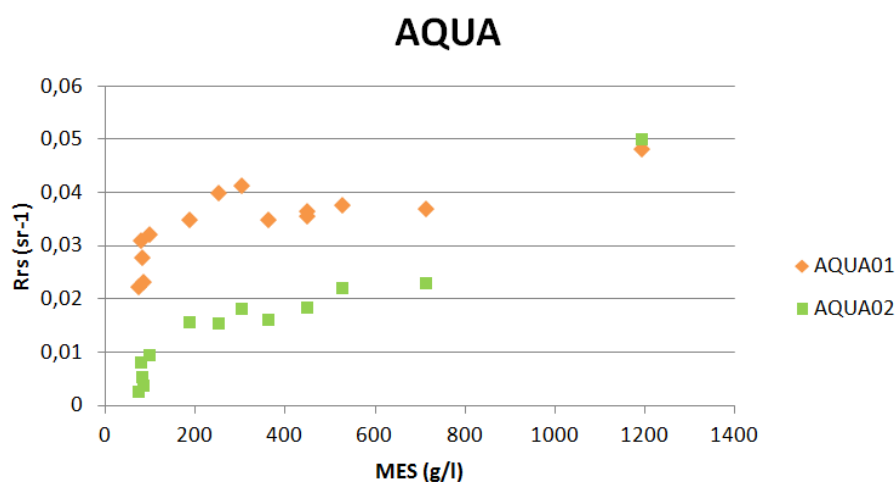


Figure 42 : Sensibilité des réflectances in situ à 650nm (AQUA1) et 850nm (AQUA2) en fonction de la concentration en MES (mg/l)

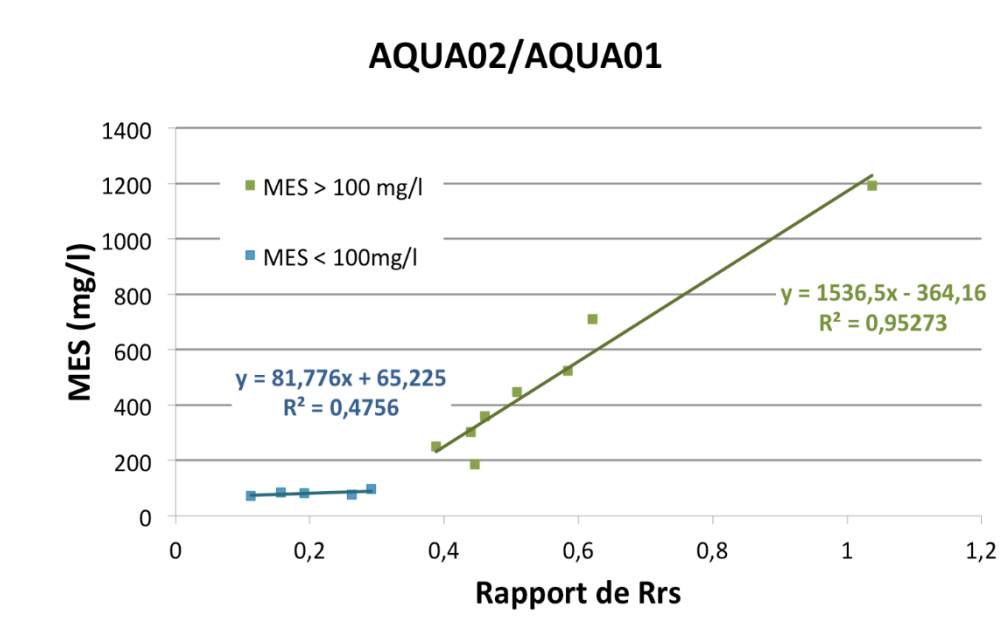


Figure 43 : Relation entre rapport de réflectances in situ R_{rs850}/R_{rs650} et concentration en MES

1.4.2 Construction d'un algorithme empirique

Les mesures in situ bancarisées par Seine Aval et utilisées pour la validation de l'algorithme régional peuvent également être utilisées pour calibrer un algorithme empirique. Avec cette approche, les mesures de réflectance utilisées pour la construction de l'algorithme sont celles directement issues du capteur MODIS AQUA, à la résolution de 250mx250m. La moitié des points sont utilisés pour calibrer l'algorithme utilisant le rapport des bandes 850nm et 650nm (Figure 44).

Une relation correcte peut être établie entre les rapports de bandes spectrales et la concentration en MES (mg/l), tel que :

$$MES_{mg/l} = 503 \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} - 27.1$$

Contrairement à l'algorithme régional, la gamme de concentration en MES utilisée pour la construction de l'algorithme empirique est plus faible. Cependant, la dispersion et l'incertitude des données de validation restent raisonnables. Il est également important de noter que par cette approche la concentration en MES estimée est plus faible que celle mesurée in situ pour des concentrations supérieures à 100mg/l.

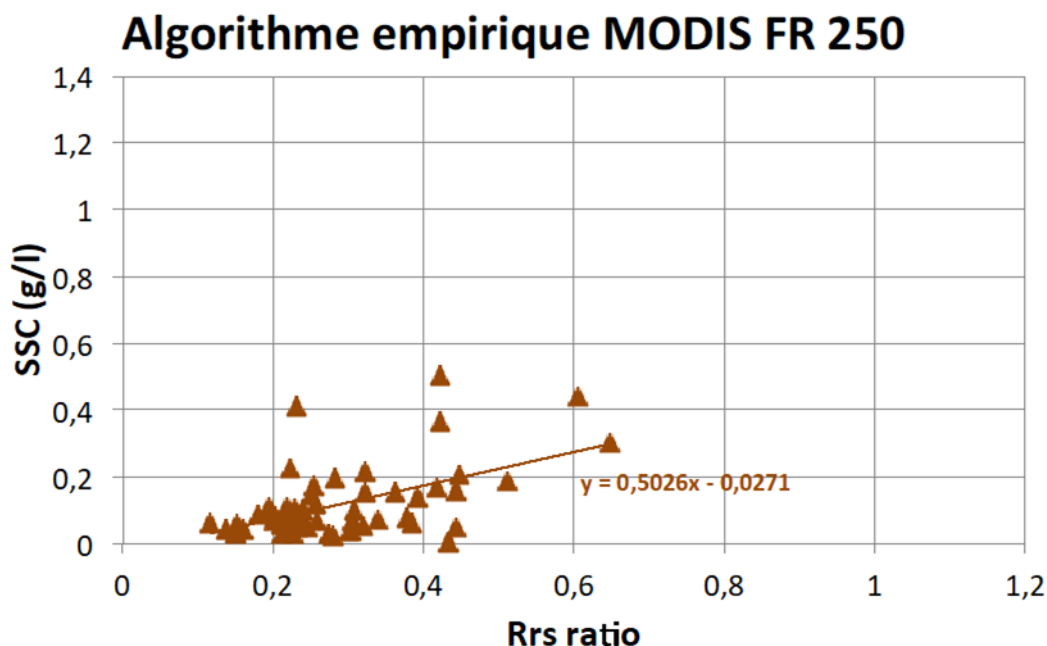


Figure 44 : Calibration de l'algorithme empirique : concentration MES in situ Vs réflectances MODIS AQUA

1.4.3 Proposition d'un algorithme hybride Régional/Empirique

Pour compenser les gammes limitées de chacun des algorithmes, différents algorithmes hybrides, mêlant données de réflectances par TRIOS et données satellites sont testés.

HYBRIDE 1

On se propose dans un premier temps d'utiliser chacun des algorithmes dans leur gamme optimale :

$$\begin{cases} Si \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} < 0.32 & MES_{mg/l} = 503 \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} - 27.1 \\ Si \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} > 0.32 & MES_{mg/l} = 1536 \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} - 364 \end{cases}$$

HYBRIDE 2

Un second algorithme recherche une unique relation entre les deux jeux de données (Figure 45), tel que :

$$MES_{mg/l} = 1000 * 10^{2.8 * \frac{R_{rs850}}{R_{rs650}} + 0.5}$$

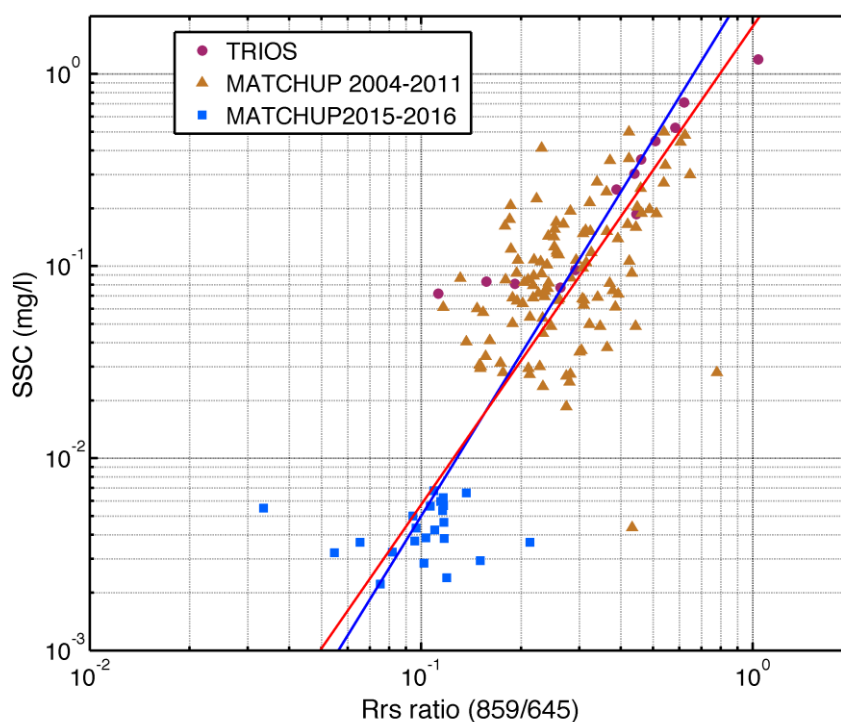


Figure 45 : Calibrations du modèle HYBRIDE 2 recherchant une relation unique entre réflectances et concentrations en MES

HYBRIDE 3

Le modèle HYBRIDE 2 surestime les concentrations en MES dans les faibles gammes de concentrations (inférieures à 20mg/l) là où le modèle du RBINS (ou OC5 de l'Ifremer) sont les plus pertinents. Ce dernier modèle combine les données issues de HYBRIDE 2 pour les concentrations supérieures à 50mg/l et le modèle de Nechad et al (2010) recalibré en 2016 pour les concentrations inférieures. Le modèle Nechad utilisé dans HYMOSED est un composite de deux produits satellite du RBINS, le produit MES à 667nm pour les concentrations inférieures à 15mg/l et le produit MES à 859nm pour les concentrations supérieures à 15mg/l.

Discussion autour des performances des algorithmes

Les performances des différents algorithmes sont présentées Figure 46 et Figure 47. Le modèle HYBRIDE1, qui n'est calibré que pour des concentrations supérieures à 100mg/l, est de facto le plus performant sur cette gamme, mais à l'inverse produit les plus fortes erreurs pour les concentrations inférieures à 100mg/l. Les modèles HYBRIDE2 et HYBRIDE3 présentent des incertitudes proches, faibles pour des concentrations inférieures à 10mg/l ou supérieures à 100mg/l (de l'ordre de 50%), et supérieures à 150% entre 10 et 100mg/l. Un

effort doit donc encore être fourni pour améliorer les produits. Il est également important de noter que dans cette zone les données issues des algorithmes HYBRIDE2 et HYBRIDE3 divergent fortement jusqu'à un rapport 5 entre les valeurs de concentrations estimées. Un travail complémentaire doit être mené pour i) comprendre ces différences (calcul des corrections atmosphériques, paramètres de calibration, validité et incertitudes des observations in situ) et ii) tenter une fusion complète des jeux de données. En effet, le recollement des deux sources de données dans le cas du modèle HYDRBID3 génère de fortes discontinuités dans la gamme 10-100mg/l. Un lissage spatial et temporel pourrait être effectué mais ces différences témoignent surtout d'une hétérogénéité dans le traitement des données brutes (i.e. par exemple les corrections atmosphériques) qu'il est nécessaire d'harmoniser pour construire un jeu de données fiable sur l'ensemble du continuum estuarien.

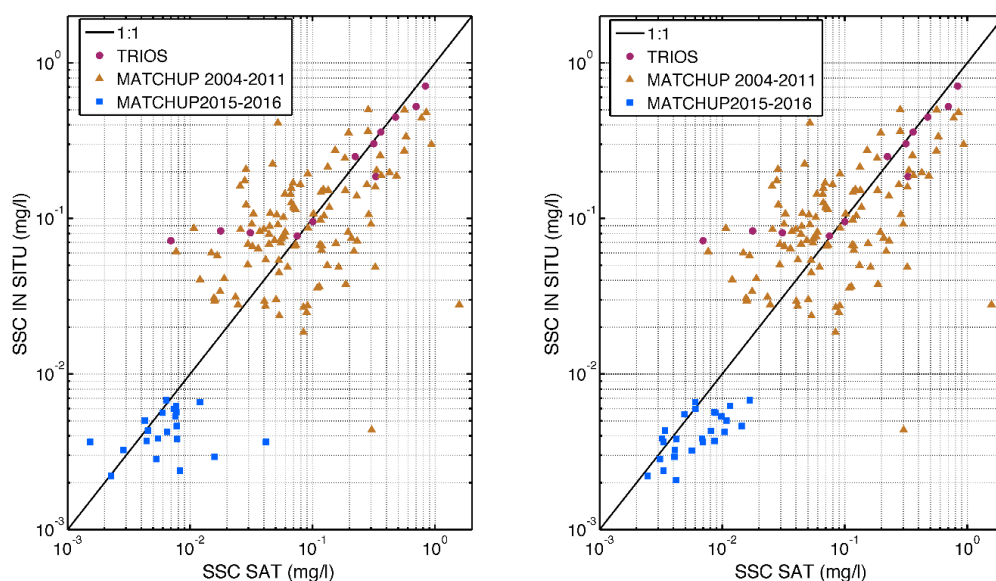


Figure 46 : Comparaison des données in situ de concentration en MES et des concentrations calculées à partir des données satellite pour les modèles HYBRIDE2 (gauche) et HYBRIDE 3 (droite)

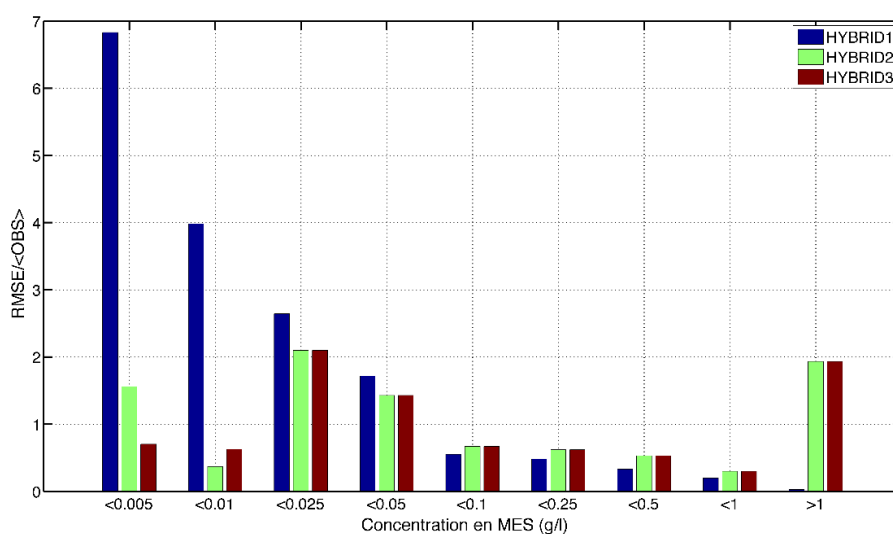


Figure 47 : Rapports entre erreur et concentration moyenne observée pour les différents modèles HYBRIDE (1/2/3) et pour différentes gammes de concentrations en MES.

1.4.4 Dynamique des structures turbides : analyse des données satellite en concentration en MES

Dans la suite du document et du fait des gammes de performances des différents algorithmes, deux modèles distincts seront valorisés en fonction des questions et de l'environnement. Dans le cas de l'étude des structures turbides à fortes concentrations (supérieures à 50mg/l, caractéristiques du bouchon vaseux en limite aval), les données issues de l'algorithme HYBRIDE1 seront utilisées car considérées comme les plus fiables sur la gamme de concentration visée. L'étude du panache de l'estuaire (soit des concentrations inférieures à 15mg/l) sera réalisée à partir d'un second jeu de données reposant sur les données satellite fournies par le RBINS et quantifiées par l'algorithme de Nechad et al. (2010) modifié.

Représentativité des données satellite

Le capteur MODIS AQUA passe sur la zone estuaire/baie de Seine quasi-quotidiennement entre 12h et 13h30 TU. Cette périodicité se traduit par une représentativité partielle des phases de la marée à l'échelle d'un cycle VE/ME (Figure 48). En vives eaux, l'image MODIS est acquise après la pleine mer du Havre, lorsque le bouchon vaseux est situé à l'amont de l'embouchure, et pour lesquelles les turbidités sont relativement faibles (par exemple la Figure 48 montre les turbidités enregistrées au fond à Balise A en fonction du phasage avec la pleine mer, inférieures à quelques 100mg/l). Les images acquises proche de la basse mer sont représentatives des mortes eaux, pour lesquelles les concentrations sont elles aussi peu élevées, du fait du faible hydrodynamisme.

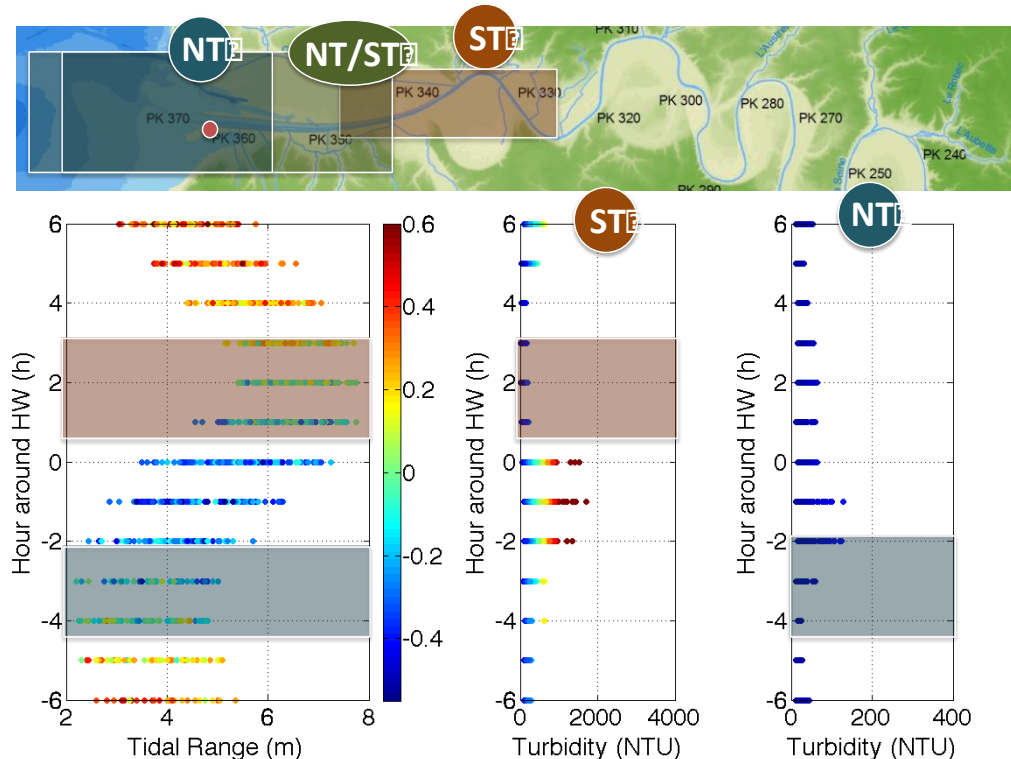


Figure 48 : Représentativité des images satellite en fonction des marées. Gauche : heure de prise de l'image satellite en fonction de l'heure de la pleine mer au havre. Centre et droite : distributions des turbidités enregistrées par la station SYNAPSES Balise A en fonction de la pleine mer et pour une vive eau (centre) et une morte eau (droite).

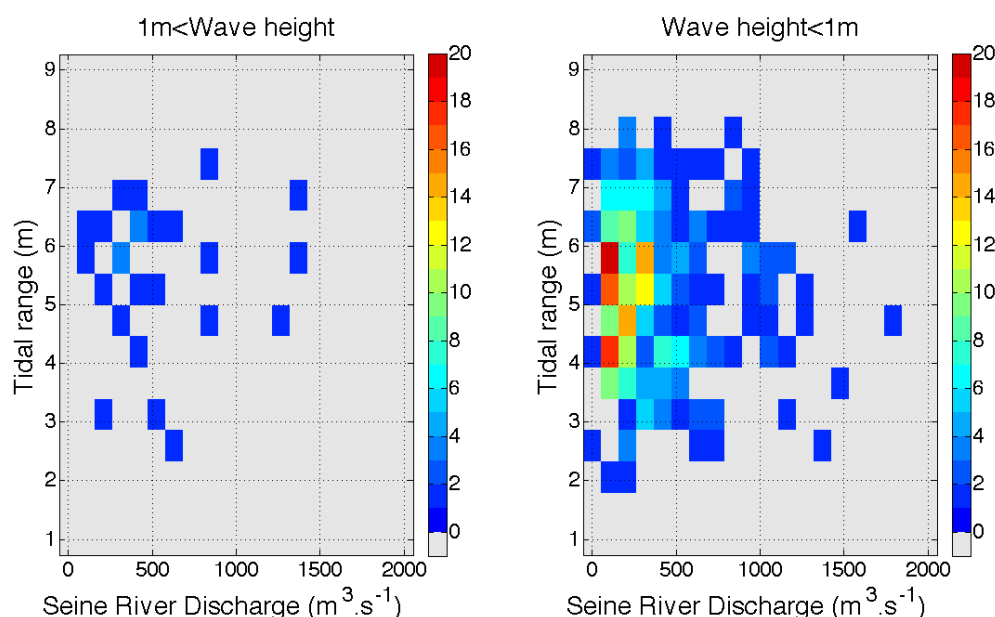


Figure 49 : Densité d'images satellite pour des périodes de vagues fortes (gauche) et faibles (droite), classées en fonction de l'amplitude de marée et débit de la Seine.

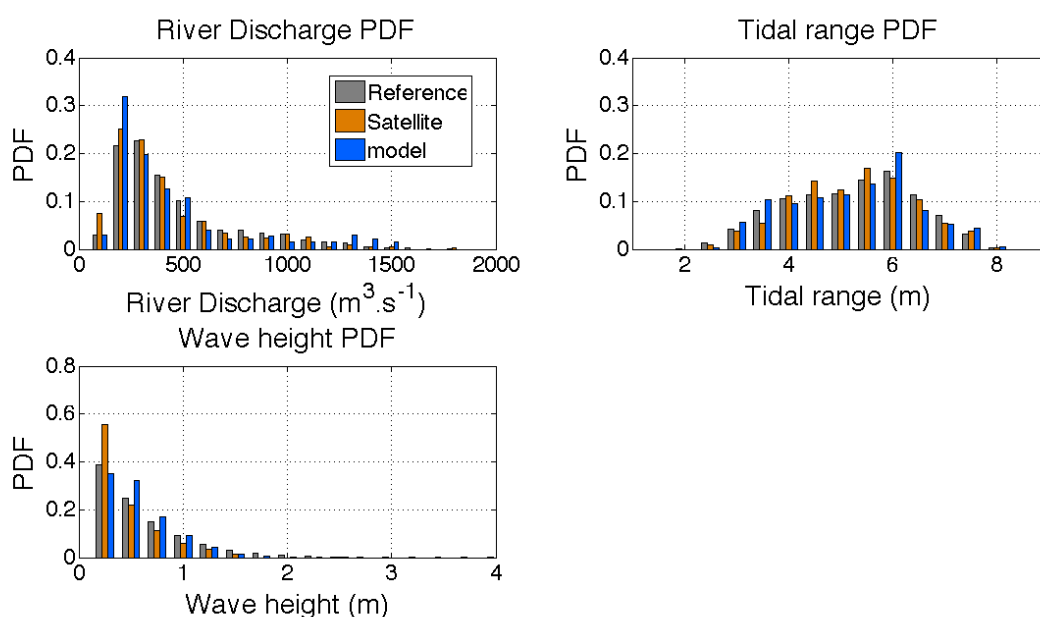


Figure 50 : Distribution des densités d'images sur la base de la fréquence brute des images (référence), pour les images sélectionnées (satellite) et des données de modèle disponible en 2014-2015, et ce pour les forçages en débit, marée et hauteur significative de vagues.

Statistiquement, en lien avec la distribution individuelles des forçages, une majorité d'images sont acquises par marnage moyen (entre 4m et 6m), temps calme, et pour des débits faibles. Outre la plus faible occurrence des épisodes de tempêtes et de crue, la forte couverture nuageuse potentiellement associée à ces événements peut réduire la densité d'images satellite de qualité acquises pour ces périodes. Une analyse statistique a été réalisée à la fois sur la distribution des images potentielles et des images de qualité (avec un taux de couverture de plus de 50%) par types forçage (Figure 50). Le nombre d'images satellite de qualité suffisante disponible, bien que faible par rapport au potentiel d'une image quotidienne (10%

en moyenne) permet d'étudier l'ensemble des situations, sans surreprésentation significative d'évènements particuliers, mis à part les vagues où les épisodes calmes sont sur-échantillonnés de 20%.

Structures turbides à forte concentration en MES : proxy de la présence du bouchon vaseux à l'embouchure

Pour cette étude nous analysons l'archive issue du modèle HYBRIDE2 adapté aux fortes turbidités. Dans ce contexte, seule la zone d'embouchure à l'Est du méridien est étudiée. La faible probabilité de succession d'images ne permet pas une analyse temporelle des processus, il est donc proposé de regrouper les images par typologie de forçage : différents débits et marnages, par temps calme ou tempête. Ces images appartenant à un même triplet de conditions sont moyennées, de façon à obtenir une image représentative des concentrations en MES sur ces périodes. Cette image moyenne est ensuite analysée à travers un métrique simple : la surface cumulée sur la zone d'étude pour laquelle la concentration en MES est supérieure à égale à un certain seuil. Pour l'étude des zones fortement turbides, les seuils de 10mg/l, 20mg/l, 100mg/l et 500mg/l sont testés. Deux classes de débit, contrastées, sont étudiées : inférieurs à $300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (étiage) et supérieurs à $800\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (crue). Six classes de marnage sont considérées : inférieurs à 4m (ME), entre 4 et 5m et 5 et 6m, et supérieurs à 6m (VE). Pour les marnages moyens, les périodes de déchet et revifs sont différenciées. On ne considère ici que les périodes peu agitées (hauteur significative de vague inférieure à 1m).

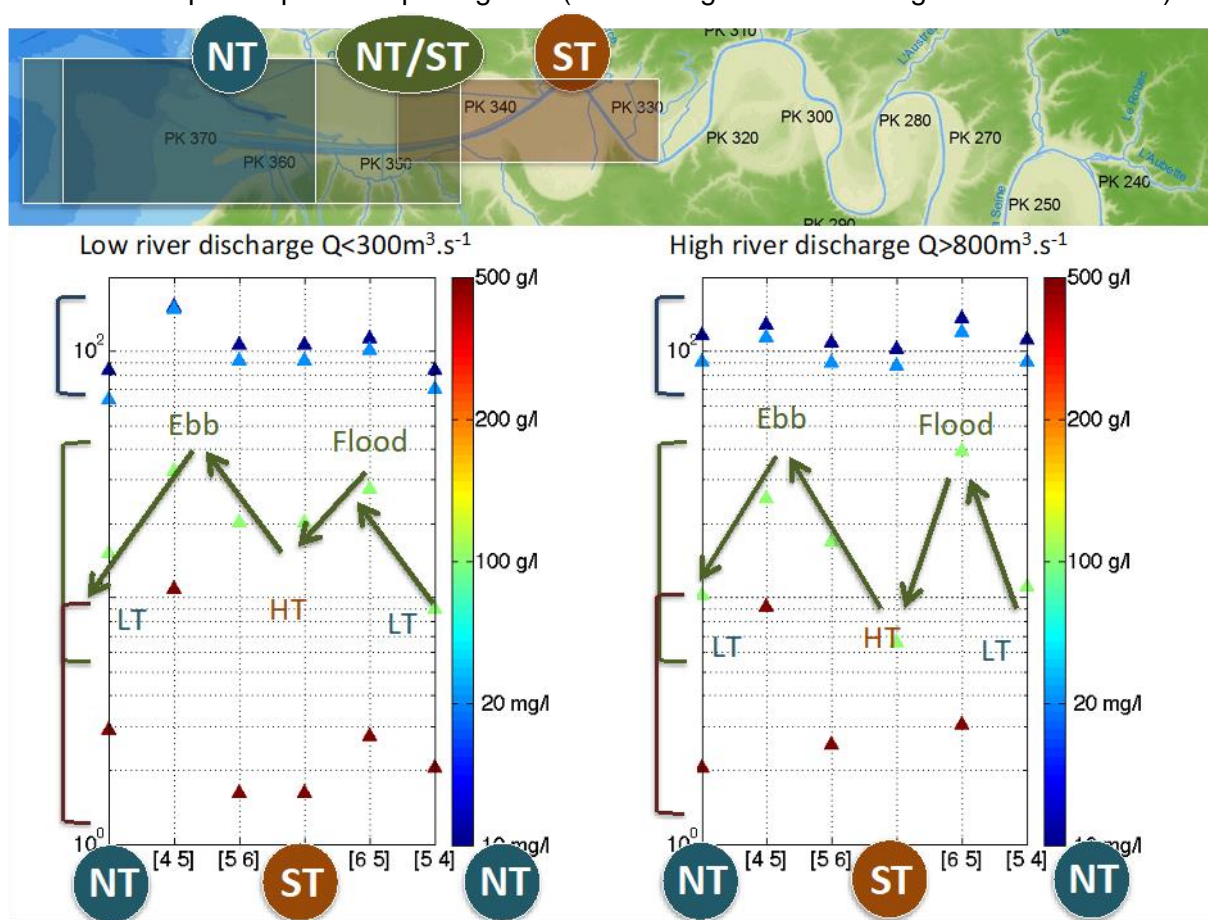


Figure 51 : Utilisation d'un indicateur de surface pour l'étude de la dynamique des structures turbides à fortes concentrations en MES.

La Figure 51 présente la synthèse de cette dynamique. Logiquement, les surfaces dépassant un certain seuil de concentrations sont inversement proportionnelles au seuil lui-même : pour un seuil de 500mg/l, les surfaces considérées sont $O(1\text{km}^2)$, tandis que le seuil à 100mg/l concerne des surfaces autour de 10km^2 . Les seuils les plus bas, mais aussi pour lesquels l'algorithme est en limite de validité, sont associés à des surfaces $O(100\text{km}^2)$. Ces seuils évoluent assez peu en fonction du débit. Ce résultat est surprenant pour les seuils de concentration faible mais s'explique par le fait que la zone de travail est limitée aux pixels à l'Est du méridien, et tronquent le panache et in fine l'analyse. Le panache et sa dynamique seront donc traités dans la section suivante. Le seuil à 500mg/l montre une certaine stabilité, avec une surface très faible, principalement due à la limite Est de la zone d'étude, qui s'arrête typiquement à l'aval de la pointe de la Roque, et qui limite donc la zone considérée par ces fortes concentrations (ici 1km^2 représente un très faible (16) nombres de pixels concernés). Le seuil dynamique est à 100mg/l : on observe une variabilité marquée à l'échelle du cycle VE/ME, avec des surfaces importantes par marnage moyen et des surfaces peu développées en VE et ME. Cette dynamique est principalement due à la prise de vue quotidienne du satellite : en VE, les images sont prises autour de la pleine mer, avec un bouchon vaseux à l'amont et donc des turbidités faibles à l'embouchure. En ME, les images satellites sont acquises autour de la BM, mais les courants, plus faibles, limitent la remise en suspension du bouchon vaseux et se traduisent également par des turbidités faibles à l'embouchure. Finalement, les périodes de déchet et revifs sont le plus « turbides » car elles combinent une prise d'image à mi flot ou mi jusant, et une turbidité dans la colonne d'eau significative.

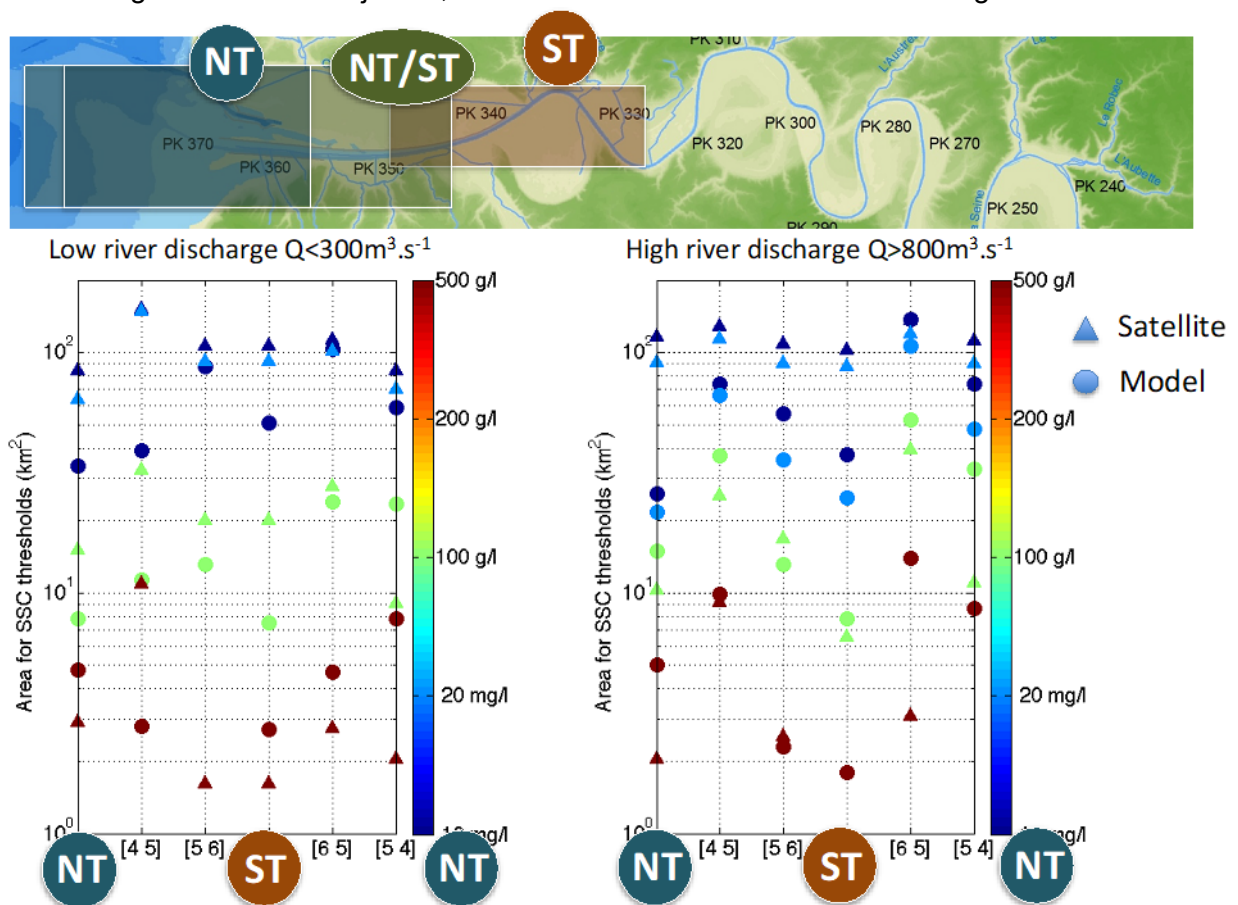


Figure 52 : Exemple d'utilisation de la surface cumulée associée à un seuil de concentration comme métrique permettant de comparer données satellite (triangles) et le modèle hydrosédimentaire (ronds). Résultats de modèle issus d'une simulation réalisée en juin 2015.

Cette métrique est ensuite utilisée pour évaluer la représentativité du modèle hydrosédimentaire à l'embouchure (Figure 52). Les résultats du modèle sont issus d'une simulation de travail intermédiaire, réalisée en juin 2015. Cette même analyse doit maintenant être renouvelée avec la version définitive du modèle hydrosédimentaire. Toutefois, les résultats montrent déjà une bonne concordance des ordres de grandeurs de surfaces cumulées pour les quatre seuils testés. La dynamique observée pour le seuil à 100mg/l concorde raisonnablement pour les deux conditions de débit. Une évaluation des différences en concentrations en MES est réalisée Figure 53. Cette figure montre que pour le seuil de 100mg/l, les écarts de surfaces cumulées correspondent à des écarts en moyenne de 100%, avec des valeurs extrêmes allant de 0% à 300%. Ces différences peuvent être imputées à la fois au modèle et à l'incertitude associée aux algorithmes de traitement des données satellite couleur de l'eau.

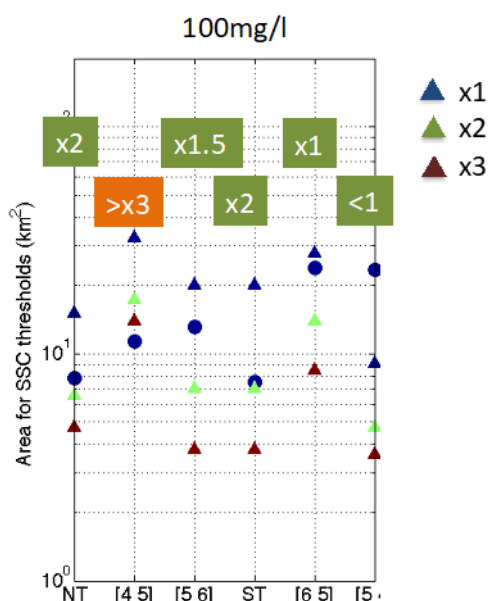


Figure 53 : Evaluation des différences de concentration en MES entre modèle et satellite à partir du métrique de surface un seuil de concentration en MES de 100mg/l.

Panache de l'estuaire de Seine

Une analyse similaire est réalisée pour l'étude de la dynamique du panache à l'embouchure, soit des concentrations en MES comprises entre 5 et 10mg/l. Dans ce cas les mêmes classes de marnage sont considérées, pour des périodes sans vagues ($HS < 0.5m$) et 4 classes de débit : $Q > 300m^3.s^{-1}$ (étiage), $Q = [300-500]m^3.s^{-1}$ (débit moyen), $Q = [500-800]m^3.s^{-1}$ (débit soutenu) et $Q > 800m^3.s^{-1}$ (crue). Les images moyennées pour ces différentes classes de débit et un marnage moyen compris en 4m et 5m sont présentées Figure 54. Ces résultats montrent une nette extension du panache vers l'Ouest corrélé avec l'augmentation du débit, ainsi qu'une augmentation significative des zones de fortes concentrations ($> 30mg/l$) à l'embouchure. Cette extension du panache est de l'ordre de $150km^2$ par débit d'étiage et dépasse les $400km^2$ en crue (Figure 55). Cette figure montre une faible variabilité de la surface du panache avec le marnage pour un débit donné, comparativement à la forte variabilité induite par le débit lui-même. Une même variabilité est associée à l'indicateur de masse en suspension (somme sur l'ensemble des pixels de concentration supérieure à 5mg/l du produit

de la concentration en MES et de la surface du pixel) avec des valeurs allant de 1500Tonne/m à plus de 4000Tonne/m.

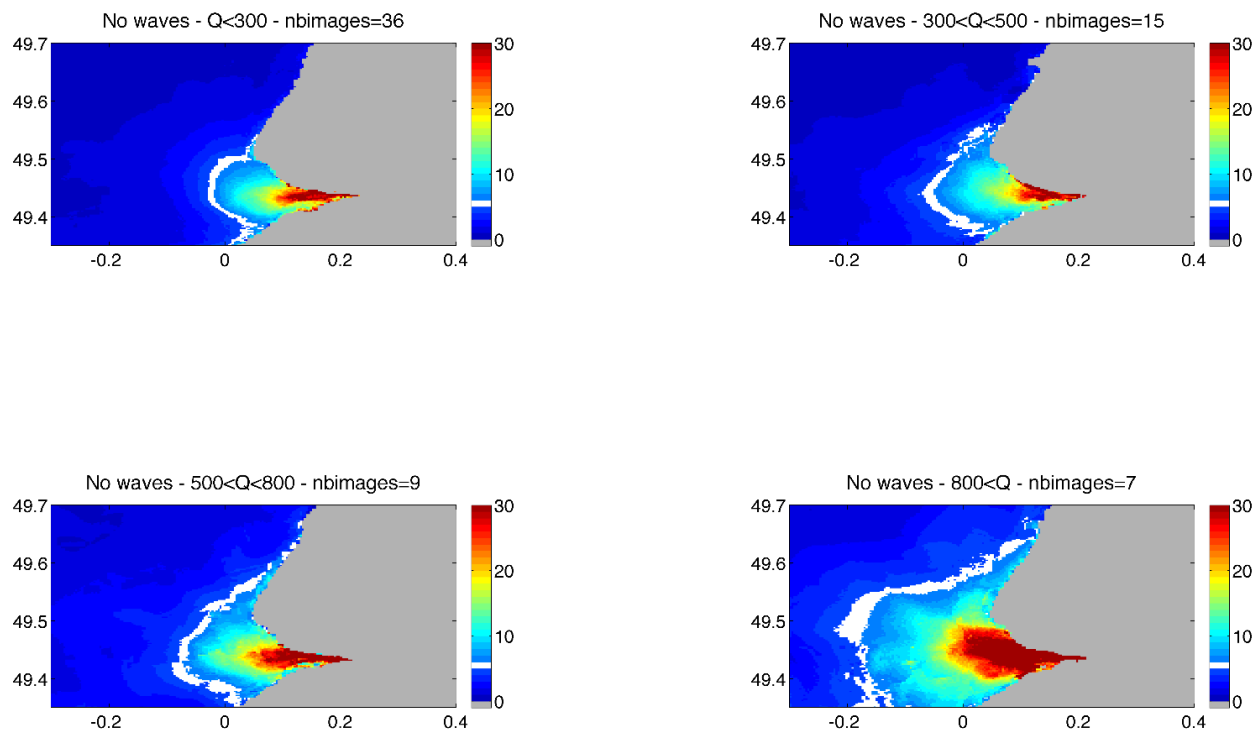


Figure 54 : Images satellite moyennées du panache de surface à l'embouchure de l'estuaire de Seine par temps calme, marnage moyen et pour 4 classes de débit : $Q > 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (étiage), $Q = [300-500] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (débit moyen), $Q = [500-800] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (débit soutenu) et $Q > 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (crue). La limite à 5mg/l est symbolisée par la frange blanche.

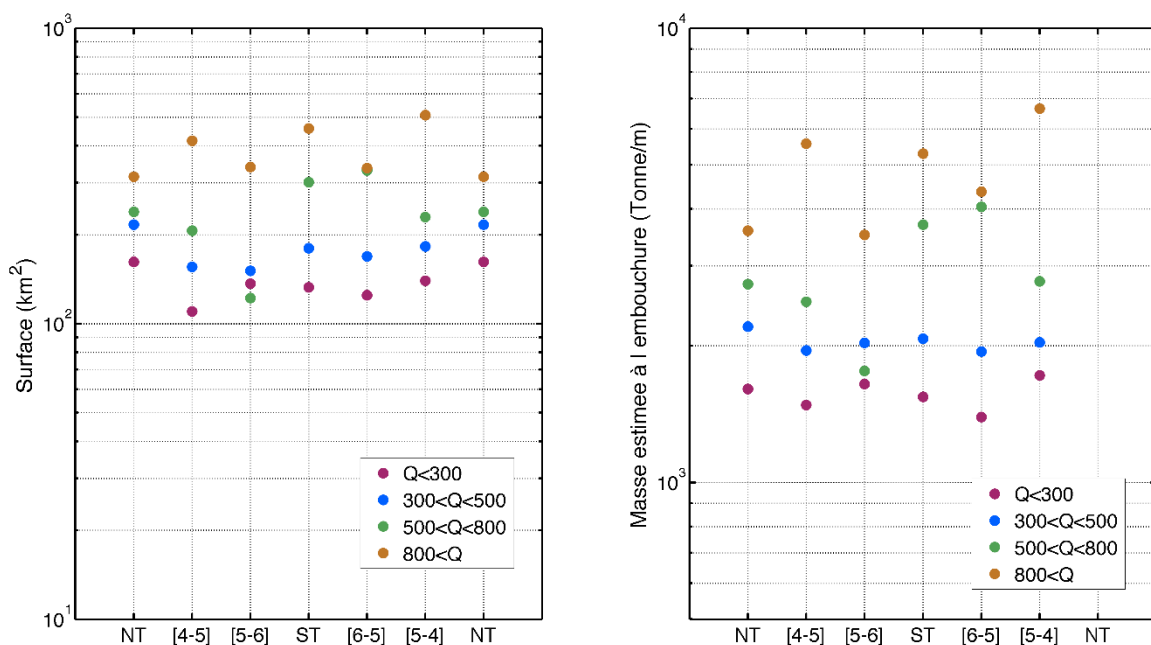


Figure 55 : Variabilité des surfaces cumulées observées par satellite pour un seuil de concentration en MES de 5mg/l (gauche) et de la masse dans la couche de surface pour des pixels à plus de 5mg/l (droite)

L'influence des vagues a également été étudié, en s'intéressant à 4 classes de houle à l'embouchure : inférieure à 0.5m, entre 0.5m et 1m, entre 1m et 1.5m et supérieures à 1.5m, pour un débit inférieur à 500m³/s et des ME (marnage inférieur à 4m) (Figure 56). Comme attendu, les vagues remettent en suspension les sédiments à la côte et sur les bancs d'embouchure (se rappeler que les données en ME sont acquises autour de la marée basse).

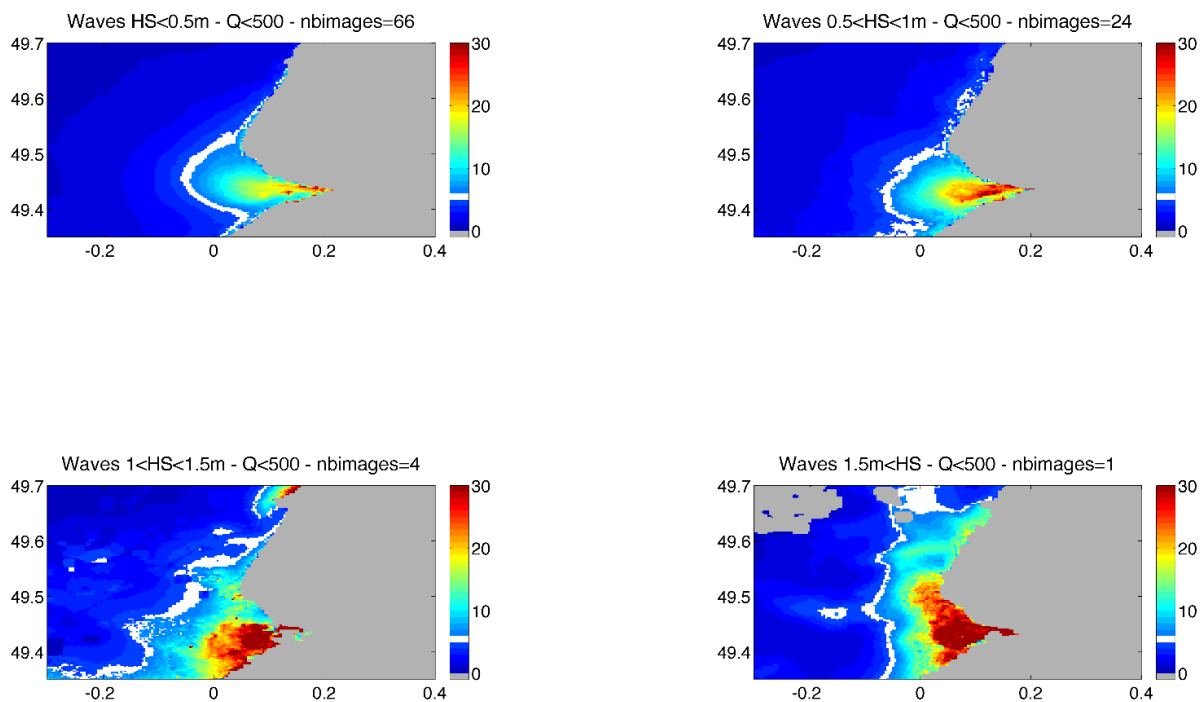


Figure 56 : Influence des vagues sur les turbidités à l'embouchure

Conclusions

Le volet HYMOSED-Mesures se découpe en deux actions distinctes : i) l'évaluation de notre capacité d'observer les évolutions morphodynamiques des vasières intertidales à l'aval de Tancarville en combinant et comparant trois approches complémentaires : l'ALTUS, le TLS et les relevés photogrammétriques par drone ; ii) la consolidation des algorithmes de traitement des réflectances mesurées par satellite, dans le but d'étudier la variabilité spatio-temporelle des structures turbides de surface entre l'embouchure et la proche baie de Seine.

Évolutions morphodynamiques des vasières intertidales à l'aval de Tancarville

Les différentes acquisitions ALTUS ont permis d'observer la dynamique haute fréquence des vasières latérales, à la fois en Vasière Nord, mais également sur deux nouveaux sites : Pointe de la Roque et Tancarville. Les observations en Vasière Nord ont permis de confirmer la dépendance du site aux vives et dans un degré moindre du débit. Elles ont surtout permis de quantifier l'importance des vagues, avec une analyse fine des corrélations entre événements de dépôt/érosion et la vitesse orbitale des vagues. Les deux autres sites sont principalement contrôlés par les forçages hydrodynamiques et hydrologiques, pilotant à la fois les contraintes hydrodynamiques et la disponibilité en sédiment. Les mesures de topographie par drone et TLS ont été couronnées de succès, avec l'acquisition et le traitement des MNT sur les différentes stations, permettant de mettre en évidence des dynamiques à différentes échelles

spatiales, de la présence de ride à l'organisation du réseau de drainage de la vasière avec la formation et l'évolution des filandres. L'évaluation des différentes méthodes a permis de quantifier la précision de chaque méthode, croissante du drone (de l'ordre de 4cm) au TLS (de l'ordre de 1cm) puis à l'ALTUS (de l'ordre de 1mm). La conclusion principale de ce travail porte sur la parfaite complémentarité des données petites échelles spatiales (ALTUS) et grandes échelles spatiales (Drone ou TLS) qui apportent une compréhension d'ensemble de l'évolution du système. Ce travail a également mis en évidence des points d'améliorations, notamment la nécessité de référencer les mesures topographiques par rapport à des points fixes géoréférencés, de façon à limiter les incertitudes sur les altimétries, et une bonne spatialisation des points de recalages temporaires des nuages de points.

Etude des structures turbides à l'embouchure de l'estuaire de Seine

Dans la poursuite du projet SA4 MODEL, de nouvelles mesures ont été acquises en 2014 (mesures de radiances in situ) et 2015-2016 (mesures de concentration en MES – Bouée D4 Carosse). Ces mesures ont permis d'étendre la gamme de concentration pour la validation des algorithmes. Différents produits sont proposés, afin de s'adapter de façon optimale à la gamme de concentrations observées en estuaire, soit de quelques milligrammes par quelques grammes par litre. Pour les concentrations supérieures à 100mg/l, les modèles HYBRID1 ou 2, reposant sur les mesures in situ de réflectances, sont les plus adaptés, et constituent une plus value par rapport au projet SA4 MODEL. Pour les concentrations inférieures à 20mg/l, les modèles côtiers (OC5 ou RBINS) sont les plus pertinents quantitativement. Cependant, la gamme de transition entre 20mg/l et 100mg/l reste la moins précise, et la fusion des deux environnements complexes. Un travail complémentaire de validation, via l'acquisition de nouvelles données par le projet PHRESQUES, doit permettre de consolider les méthodes de traitement des images satellite. Grace à ces différents algorithmes, la dynamique des structures turbides a pu être observée, en lien avec les forçages hydrodynamiques (marée, vagues, débit) et quantifiée via des métriques intégrateur, comme les surfaces cumulées pour des seuils de concentrations en MES, et les masses de sédiments en surface. Il faut noter cependant que contrairement aux images analysées dans SA4 MODEL, les algorithmes testés n'ont pu remonter aussi loin en amont. Les analyses par métriques devront être également prochainement évaluées à partir de l'archive SA4 MODEL, voire améliorées avec la prise en compte de la partie amont du pont de Normandie.



BIBLIOGRAPHIE

Cuvilliez, A., Lafite, R., Deloffre, J., Lemoine, M., Langlois, E. and Sakho, I. (2015) River flow control on intertidal mudflat sedimentation in the mouth of a macrotidal estuary. Geomorphology, 239, 174-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.020>

Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S., Cuvilliez, A. and Taylor, J. A. (2006). "Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the maximum turbidity zone in the macrotidal Seine estuary, France." Marine Geology **235**(1-4): 151-164.

Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Castaing, P. and Babin, M. (2009). "Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data." Estuarine, Coastal and Shelf Science **81**(3): 321-332.

Gohin F. (2011). Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters . Ocean Science , 7(5), 705-732. <http://doi.org/10.5194/os-7-705-2011>

Nechad, B., Ruddick, K. and Park, Y. (2010) Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. Remote Sensing of Environment, 114 (4), 854-866

ANNEXES

Grasso F., (coord.), Verney R, 2018. *Projet HYMOSED : Modélisation du fonctionnement HYdro-MOrpho-SEdimentaire de l'estuaire de la Seine – Volet Mesures »*, Annexes du rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 58 p.

1. Présentation des levés Drone acquis lors du projet HYMOSED



POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupelement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115, Boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

Grasso F. (coord.), Verney R., 2018. Projet HYMOSED : Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine – Volet « Mesures », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 57 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.
Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

