

Titre du Projet :

Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine Aval

Acronyme : COLMATAGE

Coordinateur : Jean-Claude Dauvin

Responsable scientifique de l'équipe concernée : Jocelyne Morin

<p>Environnement physique – Bilan des opérations 2008-2011</p> <p>RAPPORT FINAL</p>

Equipe n° 5

Organisme : Ifremer (Brest et Dinard)

- **DYNECO/Brest** : Pierre Le Hir (Responsable scientifique), *Chercheurs permanents* : Philippe Bassoullet, Philippe Cann, Hervé Jestin, Pierre Le Hir et Romaric Verney
Chercheur contractuel : Youen Kervella. *Technicien* : David Le Berre
- **RDT/Brest** : Michel Répécaud, avec le soutien de plongeurs Ifremer / Brest et Boulogne
- **LER-Dinard** : *Chercheur permanent* : Nicolas Desroy.

Sommaire

Synthèse. Conclusions.....	3
I. Rappel des objectifs.....	7
II. Matériels et méthodes.....	8
II.1. Les moyens à la mer	
II.2. Stratégie mise en œuvre pour la caractérisation physique des habitats. Réalisation des tests érodométriques	
II.3. Mesures altimétriques du niveau de sédiment	
III. Déroulement des opérations de 2008 à 2011.....	11
III.1. Durant COLMATAGE 1 / 2008 - 2009	
III.2. Durant COLMATAGE 2 / 2010 – 2011	
IV. Synthèse des données altimétriques.....	15
IV.1. Description sommaire des types de fonds des sites d’implantation des stations	
IV.2. Analyse des enregistrements de la 1 ^{ère} période (COLMATAGE 1) des mouillages ALTUS	
IV.3. Analyse des enregistrements de la 2 ^{ème} période (COLMATAGE 2) des mouillages ALTUS aux stations Ratelets et Ratier SE	
Conclusions sur l’ensemble des variations altimétriques 2008-2011	
V. Analyse des résultats de la campagne d’érodimétrie d’avril 2010 - rôle de la faune benthique.....	41
Contribution des organismes benthiques à l’érodabilité des sédiments de l’embouchure de la Seine	
Bibliographie.....	51
Valorisation des données	52

Couplages bio-morpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine Aval

Coordinateur Jean-Claude Dauvin

Observations de la variabilité de l'environnement physique et recherche de liens avec la macro-faune benthique

Thème développé par l'équipe Ifremer-Brest

Contributeurs

Ifremer/DYNECO/PHYSED : P. Le Hir (Resp. scientifique), Ph. Bassoullet, Ph. Cann, H. Jestin, D. Le Berre, R. Verney

Ifremer/RDT/Brest : M. Répécaud et le soutien d'une équipe de plongée d'Ifremer Brest et Boulogne

Ifremer/LER/Dinard : N. Desroy

Rappel des objectifs

De façon à mieux connaître la stabilité des biotopes de l'embouchure de la Seine, Il était proposé de décrire la variabilité morphosédimentaire en quelques secteurs clés de l'embouchure de la Seine et les facteurs principaux de cette variation, qu'ils soient d'origine physique ou d'origine biologique. En particulier, il s'agissait de rechercher un éventuel impact des organismes benthiques sur le comportement physique du sédiment superficiel, pouvant le cas échéant expliquer pour partie la variabilité des faciès sédimentaires (puisque les peuplements benthiques expriment une très grande variabilité d'abondance) et conduire à des mécanismes de couplage entre dynamique de ces peuplements et variations morpho-sédimentaires.

Actions réalisées

Si la distribution spatiale des paramètres hydro-morpho-sédimentaires à l'embouchure de la Seine est relativement bien connue, les observations récentes faites dans le cadre du Programme Scientifique Seine-Aval avaient montré que cette distribution variait fortement au gré des forçages physiques, peut-être plutôt de manière événementielle que saisonnière (cf Lesueur et al., Fascicule Seine-Aval N°3 sur les sédiments). Mais les observations réalisées par campagnes étalées dans le temps ne permettaient pas d'affecter une échelle temporelle aux variations constatées.

Pour préciser les processus de dépôt et remise en suspension dans le secteur des bancs d'embouchure, des systèmes ALTUS, échosondeurs autonomes capables de mesurer en continu l'évolution locale du niveau de sédiment avec une précision de quelques millimètres) ont été déployés en deux campagnes :

- de septembre 2008 à juin 2009, 2 stations en zone subtidale, l'une au nord de l'engainement dans le « triangle des épaves », l'autre sur le site des Ratelets à l'ouest du banc du Ratier ; ce point Ratelets est considéré comme représentatif d'un large secteur, et peu influencé à court terme par les forçages anthropiques tels que les pratiques de dragages ; il est remarqué qu'il s'agissait des premières mesures altimétriques en continu en zone subtidale dans le secteur, réalisées avec succès grâce à la ténacité d'une équipe de plongée intervenant par visibilité nulle ; une troisième station a été placée en intertidal dans le secteur de la Fosse Nord, entre le chenal Nord et la digue basse Nord, où l'impact de la construction de Port 2000 se fait encore sentir

- de septembre 2010 à mai 2011, 2 stations ont été placées de part et d'autre du banc du Ratier, l'une à l'est en bordure de fosse Nord, l'autre à l'ouest, toujours aux Ratelets, de façon à pouvoir « relier » les deux campagnes de mesures et pour la bonne représentativité de ce point de mesure, qui en particulier peut révéler les modulations de la progradation du banc du Ratier (celle du banc d'Amfard au Nord étant surtout influencée par le rejet de dragages du Kannig).

Les faciès sédimentaires investigués sont sablo-vaseux pour les 2 stations ouest (Ratelets et Triangle des épaves) et vaseux pour les stations est (avec passées sableuses en Fosse Nord).

Les systèmes ALTUS possèdent un capteur de pression pour mesurer la hauteur d'eau, et donnent accès aux surcotes si l'on connaît par ailleurs la pression atmosphérique. Mais les possibilités d'acquisition de salves à haute fréquence (4 minutes à 2 Hz toutes les 16') pendant plusieurs mois permettent de mesurer les vagues locales, et d'en produire un spectre d'énergie. Ainsi des mesures de climat de vagues dans les différentes stations ont été obtenues, constituant une base de données unique pour la calibration et la validation de modèles de génération/propagation/dissipation des vagues en baie de Seine orientale. Il a été vérifié que la variabilité des forçages climatiques (vents en baie de Seine et débit de la Seine) et tidaux (amplitudes des marées) pendant les périodes de mesure était bien représentative de celle observée depuis une quinzaine d'années.

En ce qui concerne l'effet des organismes sur le comportement des sédiments, une campagne d'érodimétrie quasi *in situ* a été réalisée pendant la 2^{ème} partie du projet (avril 2010). 22 carottages ont été réalisés en des points sélectionnés avec le concours des benthologues (N. Desroy et J-C Dauvin), en essayant de cibler une variation des faciès sédimentaires (fournie par S. Lesourd) et une diversité d'abondance des peuplements benthiques. Les faciès purement sableux ou graveleux étaient écartés, les conditions de remaniement de ces sédiments non cohésifs étant connues et a priori indépendantes de la faune benthique. Les mesures d'érodabilité (contraintes critiques de remaniement et flux d'érosion) ont été réalisées à l'aide de l'érodimètre Ifremer installé au Havre dans les locaux de la cellule de Suivi du Littoral Haut-Normand, tandis que les mesures sédimentologiques d'accompagnement (granulométrie, densité et concentration, teneur en matière organique, rhéométrie) ont été faites a posteriori dans les laboratoires d'Ifremer-Brest. Les comptages de faune benthique ont été faits à Ifremer-Dinard par N. Desroy. Les abondances obtenues sont à peu près représentatives de celles habituellement observées dans le secteur d'embouchure de la Seine.

Résultats majeurs

Variabilité morphosédimentaire

Des quatre sites instrumentés, celui des Ratelets est le plus dynamique pour ses variations altimétriques. Les épisodes d'érosion, parfois brutaux, comme les épisodes de dépôts significatifs interviennent tous en conjonction avec des vagues importantes, en général corrélées à des vents de secteur ouest qui les génèrent. En particulier une érosion exceptionnelle de 30 cm a pu être observée sous l'effet de vagues de hauteur significative (H_s) de 3 m, intervenant peu après une tempête de 4-5 jours qui avait généré des vagues atteignant 2.5 m (H_s). Il semblerait qu'un phénomène de liquéfaction soit intervenu, le sédiment constitué de sables fins (légèrement envasés) ayant perdu sa structuration sous l'effet du cisaillement oscillant généré par les vagues voit sa viscosité apparente diminuer fortement (thixotropie). Le « rechargement du site » en 3 mois, mais principalement au cours d'épisodes de vagues, est remarquable. On peut généraliser ces observations : dans tous les secteurs sablo-vaseux, des variations rapides du sédiment (typiquement de l'ordre de la dizaine de cm) sont observées, la plupart du temps suivies de dépôts du même ordre de grandeur, intervenant lors de tempêtes ultérieures. La dominance des vagues comme agent de remaniement de ces fonds sablo-vaseux est indéniable (même dans l'environnement macro-tidal de l'embouchure de la Seine), et

puisque en un point donné des tempêtes de même secteur sont susceptibles d'entraîner érosion ou dépôt, il semblerait que les tempêtes provoquent des érosions et dépôts distribués spatialement, les sédiments sableux se redéposant très rapidement. Les schémas de transports n'ont pas été élucidés par nos seules observations ponctuelles, d'autant moins que les évolutions résiduelles sont faibles. Toujours sur le site des Ratelets, où les observations sont les plus longues, une stabilité avait été constatée en 2008-2009 tandis qu'une érosion résiduelle d'une vingtaine de cm a été observée en 2010-2011. Ces tendances à une légère érosion sur ce point central du front ouest du banc du Ratier semblent révéler une stabilisation voire une régression temporaire du banc du Ratier, observation qu'il conviendrait de confirmer avec les cartes de différentiels bathymétriques. Au passage, on observe que ces évolutions semblent indépendantes du débit de la Seine (une crue de $1500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pendant près d'un mois n'a pas d'effet visible sur la tendance résiduelle). Enfin, on relève que l'effet des marées n'a été mis en évidence que pour les fortes vives-eaux.

En Fosse Nord, un engraissement résiduel de 16 cm en 9 mois sur le site instrumenté a été observé : ce dépôt se produit principalement au cours des périodes de calme. Pour ce site, les mesures de vagues mettent en évidence un amortissement de l'ordre de 50-60% par rapport aux stations externes.

Le site du Ratier sud-est enregistre une érosion résiduelle de 10 cm en 7 mois de mesures. Les variations du niveau de sédiment au cours d'épisodes de vagues y sont plus atténuées que sur le flanc ouest du banc du Ratier. Les vents de SE comme ceux d'ouest sont susceptibles de générer des érosions, tandis que les dépôts interviennent au cours de tempêtes d'ouest (par exemple lorsqu'une érosion est observée aux Ratelets).

Erodabilité du sédiment et rôle de la faune benthique

Les mesures d'érodabilité ont été réalisées sur des faciès s'étalant entre sables légèrement envasés (~ 5% vase) et vases sableuses (84% vase). Globalement, les valeurs des contraintes critiques de resuspension sont un peu inférieures à la gamme de variation observée dans notre laboratoire avec le même instrument sur un ensemble de sites français (façades Manche-Atlantique et méditerranéenne).

Une forte dépendance en fonction de la teneur en matière organique est observée, en gardant cependant à l'esprit que cette fraction organique et la fraction de vase sont corrélées. Le modèle d'érosion proposé par P. Cann (2010) est confirmé par les mesures de la campagne COLMATAGE 2010 (première campagne opérationnelle de mesures érodométriques en baie de Seine orientale), et a pu être étendu en introduisant la concentration relative de vase (C_{relva}), c'est à dire la concentration de particules d'argiles ou de silts dans l'espace non occupé par les sables, qui constitue le paramètre caractérisant la matrice cohésive d'un sédiment mélangé sable/vase. Cette loi d'érosion s'écrit :

$$\tau_{cr} = a.C_{relva}^6 \cdot \exp(0.57 \text{ MO/frVA})$$

avec : MO : teneur en matière organique

frVA : fraction massique de vase

a : constante ($= 0.2 \cdot 10^{-18}$)

Le rôle des organismes n'a pu être véritablement mis en évidence. Malgré un échantillonnage réalisé dans une gamme de variation représentative des habitats de l'embouchure, tant sur le plan des faciès sédimentaires (entre vases et sables envasés à 35%) que des biocénoses, aucune corrélation n'a pu être établie entre les abondances globales ou par espèce et les caractéristiques des sédiments, en particulier leur érodabilité. Ainsi la contribution du polychète *owenia fusiformis*, espèce ingénieuse très présente en baie de Seine orientale et dans nos échantillons testés n'a pas été mise en évidence.

Une première conclusion pourrait être que dans les environnements sablo-vaseux qui dominent l'embouchure de la Seine, la variabilité de la contrainte critique d'érosion (en général inférieure à 2 Pa) n'est pas très élevée devant la variation des contraintes exercées par les vagues, qui sont donc suffisantes pour remanier le sédiment. Les organismes présents ne semblent pas susceptibles de modifier ce résultat. Il en va sans doute autrement des vases fossiles indurées qui affleurent à certains endroits, et dans ce cas la présence d'organismes bioturbateurs pourrait modifier le comportement du sédiment.

Perspectives

Pour comprendre la dynamique sédimentaire dans le secteur d'embouchure de la Seine, dont on a vu qu'elle est principalement contrôlée par les vagues, il est essentiel de reprendre la modélisation hydrosédimentaire d'ensemble, de façon à reconstituer la distribution spatiale des érosions/dépôts, en s'appuyant sur les mesures réalisées dans le cadre de Colmatage pour valider le modèle. C'est la priorité des actions à entreprendre avant toute investigation in situ complémentaire.

D'autre part, l'analyse des phénomènes d'érosion/dépôt observés montre des difficultés d'interprétation du fait de la méconnaissance de la variabilité concomitante de la nature du sédiment superficiel. En effet, même si dans beaucoup de cas l'érodabilité des sables ou des vases plus ou moins mélangés n'est pas très sensible, les conditions de dépôt (et donc de transport) sont elles très différentes pour les sables et les vases. Il faudrait donc pouvoir disposer de mesures simultanées des forçages, des variations altimétriques (c'est les cas aujourd'hui) mais aussi de la nature du sédiment superficiel. L'analyse du signal acoustique recueilli par l'Altus est une piste qui mériterait d'être poursuivie.

S'agissant de l'influence des organismes, nous préconisons de porter un effort complémentaire sur les faciès de vases indurées, susceptibles d'être « déstructurées » par certains organismes bioturbateurs, et de mener cette investigation en suivant un protocole d'échantillonnage fin, en concertation entre sédimentologues et biologistes benthiques .

I. Rappel des objectifs

L'anthropisation de l'estuaire de la Seine sur les trois dernières décennies a conduit à de profondes modifications morphologiques dont les principales conséquences ont été caractérisées : réduction globale du volume de l'estuaire, réduction des surfaces intertidales et migration vers l'aval de la sédimentation entraînant un envasement significatif de l'estuaire aval. Cette dynamique particulièrement complexe des sédiments fins a fait l'objet de nombreux travaux, citons : Avoine, 1980 ; Guezennec, 1999 ; Lesourd, 2000 ; Garnaud, 2003 ; Delsinne, 2005 ; Deloffre, 2005 ; Waeles, 2005 ; Cuvilliez, 2008.

Le projet COLMATAGE a notamment pour ambition de décrire la variabilité des habitats marins à l'embouchure de la Seine. Contribuant fortement à la définition de ces habitats, les biotopes peuvent se structurer en fonction de paramètres *morphologiques* (bathymétrie), *hydrodynamiques* (intensité des vagues et des courants, hauteurs d'eau) et *sédimentaires* (nature et compaction du substrat sur lesquelles les biocénoses peuvent avoir éventuellement une influence).

L'implication générale de ces paramètres est relativement connue, par contre, les études récentes au sein de Seine-Aval ont montré que leur distribution relative pouvait varier au gré des forçages physiques, plus souvent de manière événementielle que saisonnière. Notamment, ces études antérieures ont mis en évidence une forte variabilité de la couverture sédimentaire dans des échelles de temps qui restent à préciser : l'évolution est-elle saisonnière ou bien la variabilité est-elle contrôlée par les événements météo-océaniques, avec un temps de réponse court du système ? Dans le but de répondre à cette question et en s'appuyant sur le modèle hydro-sédimentaire élaboré dans le cadre du programme Seine-Aval 3 (en cours de validation avec le projet MODEL), il a été effectué :

- 1) parallèlement à l'analyse de la macrofaune réalisée par les benthologues sur des *prélèvements sédimentaires*, des *carottages courts et bennes* qui permettent de mesurer le comportement physique de divers types de faciès associés à des biocénoses distinctes ; ceci pour une éventuelle prise en compte des effets majeurs des organismes benthiques sur le comportement du sédiment et son éventuelle transformation
- 2) des *enregistrements en continu d'altimétrie* haute résolution du niveau de sédiment. Depuis de nombreuses années, cette technique s'est avérée très fructueuse pour un suivi continu efficace permettant de corréler les événements d'érosion/dépôt aux conditions de forçages. Un capteur de pression intégré au système permet de mesurer des spectres de vagues. Face à l'absence de mesures rendant compte de la variabilité à courte échelle de temps (quelques mois) des processus de dépôt/érosion dans des secteurs clés de bancs d'embouchure (Ratier, Amfard...) et dans la fosse Nord, les enregistrements en continu ont donc été privilégiés sur ces secteurs présentant un intérêt du point de vue de l'évolution saisonnière des habitats, entre septembre 2008 et mars 2009, ou juin 2009 pour l'une des stations. Dans certains cas, des turbidimètres en continu ont été installés sur les supports des altimètres ou à proximité, de façon à disposer au même endroit d'une information de forçage essentielle pour la faune benthique, la quantité de matière en suspension (MES).

Au sein du projet COLMATAGE, trois stations autonomes de mesures altimétriques ont été mises en œuvre avec des balisages spécifiques :

- à l'embouchure, en *domaine subtidal* : station « Bouée des Ratelets » et station « Triangle des épaves » et,
- en *domaine intertidal* : station « Fosse Nord », sur la vasière adossée à la digue basse Nord.

Ces stations ont été complétées (2010 – 2011) par deux autres, en *domaine subtidal*, dans le cadre du projet MODEL de Seine-Aval 4 : stations « Bouée des Ratelets » et « Ratier Sud-Est », en fosse sud.

Pour plus de clarté dans la compréhension des phénomènes et d'homogénéité dans les analyses, nous avons choisi d'inclure les résultats de la totalité des stations dans ce rapport, qui de ce fait est un chapitre commun aux projets COLMATAGE et MODEL.

II. Matériels et méthodes

II.1. Les moyens à la mer :

Les carottages courts et bennes Shipeck ont été réalisés au moyen du navire N/O « Côtes de la Manche » de l'INSU. La réalisation des 3 mouillages des systèmes altimétriques Altus et leurs balisages en zone d'embouchure de la Seine : *Ratelets* (2 périodes), *Triangle des épaves* et *Ratier SE* a été exécutée avec ce même navire. Le mouillage de la station *Fosse Nord* a été réalisé avec le zodiac et le concours de la Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN).

Les campagnes à la mer pour la calibration des sondes turbidimétriques sur des cycles de marée de 12h ont été menées avec divers moyens nautiques, tels que : la vedette hydrographique « Maïmiti » du GPM de Rouen dans le chenal, le chalutier *Flipper* et la vedette *Eclat* de la CSLN pour la *Fosse Nord*.

II.2. Stratégie mise en œuvre pour la caractérisation physique des habitats

Une campagne d'érodimétrie des sédiments fins de l'embouchure de la Seine a été conduite, de façon à caractériser les conditions de remobilisation des sédiments superficiels, sables fins ou vases, sous l'action d'une contrainte de cisaillement exercée par les courants ou par les vagues. En dehors d'une série d'essais réalisée il y a une dizaine d'années au cours d'une campagne « Vastedeba », et de quelques mesures faites à Brest sur des culots de tassements expérimentaux (Le Hir *et al.*, 2005), c'est la première fois qu'une campagne d'érodimétrie était réalisée dans le secteur d'embouchure de la Seine en quasi *in situ*. Mais dans le cadre du projet COLMATAGE, il s'agissait en plus d'examiner l'influence des organismes benthiques sur les conditions d'érosion des sédiments. L'échantillonnage adopté a été réalisé en concertation avec des benthologues (J-C Dauvin et N Desroy), de façon à cibler des secteurs occupés ou non par des organismes susceptibles de changer le comportement à l'érosion des sédiments, et cela si possible pour différents faciès sédimentaires. Les faciès purement sableux ou graveleux étaient a priori écartés, dans la mesure où les conditions de remaniement des sédiments purement non cohésifs sont a priori connues (le cas des sables hétérométriques n'était pas pris en compte dans cette étude).

Réalisation des tests érodimétriques

Les mesures réalisées à partir du canal érodimétrique Ifremer exigeaient d'être faites le plus rapidement possible après les carottages courts de la campagne de prélèvements sédimentaires (25-30 avril 2010). L'utilisation d'un local mis à disposition au sein de la CSLN du Havre a permis à l'équipe Ifremer de faire les tests érodimétriques au fur et à mesure des prélèvements (typiquement, le lendemain).

Canal érodimétrique Ifremer, installé dans les locaux de la CSLHN



Carottier interface multitubes



Interface eau/sédiment d'une carotte avant passage dans le canal érodimètre

Figure B-1 : Les diverses opérations pour les études érodimétriques des sédiments carottés

Les prélèvements eux-mêmes ont été réalisés à bord du Côte de la Manche avec un carottier préservant l'interface eau-sédiment (figure B-1). Le carottier multitubes « Bowers & Connelly », correctement lesté, permet de prélever jusqu'à 4 carottes de 90 mm de diamètre avec une hauteur de sédiment maximum d'environ 30 cm et en préservant l'eau surnageante. Pour chaque station de prélèvement, une carotte est destinée à l'échantillonnage pour l'investigation des faciès et la détermination des paramètres sédimentologiques classiques : teneur en eau, concentration sèche du sédiment, spectres granulométriques et éventuellement test scissométrique. Une autre carotte est découpée par tranches, successivement ; celles-ci sont soumises au test en canal érodimétrique. La fonction de cet *érodimètre* est de déterminer les seuils et flux d'érosion d'un sédiment fin vaseux à sablo-vaseux (Le Hir *et al.*, 2007). Le test consiste à soumettre l'échantillon non remanié à un courant forcé dans le canal. Un turbidimètre, en aval de la zone de test, contrôle la remise en suspension des particules fines tandis que les sables sont récupérés dans un piège. Le forçage est paramétré par la *contrainte de cisaillement* au niveau de l'interface eau-sédiment. L'érodabilité d'un sédiment apparaît donc caractérisée par un flux d'érosion (en masse ou volume/unités de temps et surface) que l'on cherche à exprimer en fonction de la contrainte hydrodynamique (courant ou vagues) et des caractéristiques du sédiment. Dans le cas où un seuil d'érosion est déterminé, il représente la valeur critique de la contrainte de cisaillement au-dessous de laquelle il n'y a pas d'entraînement du sédiment par le fluide.

Ce canal érodimétrique permet donc en particulier de caractériser l'érosion de mélanges naturels vaseux à sableux.

II-3. Mesures altimétriques du niveau de sédiment

Les mesures en continu des variations altimétriques (avec une précision de l'ordre de ± 2 mm) du niveau de sédiment ont été réalisées au moyen de systèmes ALTUS immergeables (Jestin *et al.*, 1998 ; Bassoullet *et al.*, 2000). Cette instrumentation autonome fonctionne sur le principe d'un échosondeur avec une fréquence d'émission d'ondes acoustiques de 2 MHz. Le transducteur, orienté vers le bas, est positionné à une trentaine de centimètres au-dessus du sédiment ; le module enregistreur/énergie est déporté. Le transducteur est placé au centre d'un trépied adapté afin de s'affranchir des phénomènes d'affouillements sous le transducteur, affouillements dus aux tiges d'ancrage dans le sédiment.

Le temps de trajet depuis l'émission de l'onde acoustique et sa réception par le transducteur est converti en distance, en tenant compte de la célérité du son qui dépend de la température et de la salinité du milieu.

Le système ALTUS peut acquérir jusqu'à 4 seuils de détections d'énergie acoustique reçue. Ces seuils ont pour but d'améliorer la précision altimétrique de l'interface eau-sédiment ; ce sont des indicateurs de l'état de sédimentation/consolidation des dépôts. Le niveau maximum du signal acoustique reçu par le transducteur (« écho max. »), par rapport au signal émis, est également enregistré et donne la possibilité de valider ou non la mesure altimétrique. Un capteur de pression, intégré au module, permet de connaître la hauteur d'eau sur le site. Lorsque l'acquisition du signal de pression se fait à haute fréquence (typiquement 2 Hz), le traitement des données de pression permet de calculer les principaux paramètres caractéristiques des vagues (spectre d'énergie, fréquence de pic, hauteur significative, mais pas la direction...) : le système ALTUS fonctionne alors en mode « vagues » (Bassoullet *et al.*, 2010).

Les systèmes ALTUS des 3 stations « Ratelets, Triangle des épaves et Ratier SE », situés en domaine subtidal, ont été placés par plongeurs (figure B-2). L'intervention est assez délicate, car les plongeurs doivent « visser » dans le sédiment 3 tiges inox sur une distance de l'ordre de 60 cm, et les mettre à niveau pour un positionnement bien vertical du transducteur acoustique, tout cela avec une visibilité quasi nulle. Lors des relèves intermédiaires, il était possible de récupérer les données enregistrées en utilisant un système de communication inductif, sans démontage du système ni connexion sous-marine.



Instrumentation de la station « Triangle des Epaves », le 09/10/2008 :

- Système ALTUS par plongeurs
- Balisage du site

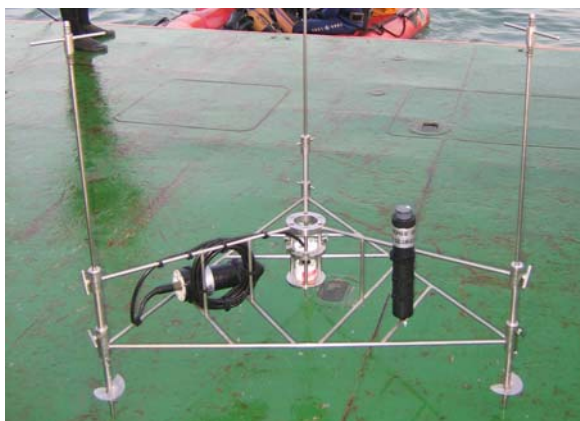


Figure B-2 : Le système ALTUS : à gauche, le transducteur central relié au module enregistreur/énergie et un pinger ; à droite, détail.

III. Déroulement des opérations de 2008 à 2011

III.1. Durant « COLMATAGE 1 » 2008-2009 (figure B-3):

Mise en place de 2 stations de mesures altimétriques ALTUS, à l'embouchure, en domaine subtidal :

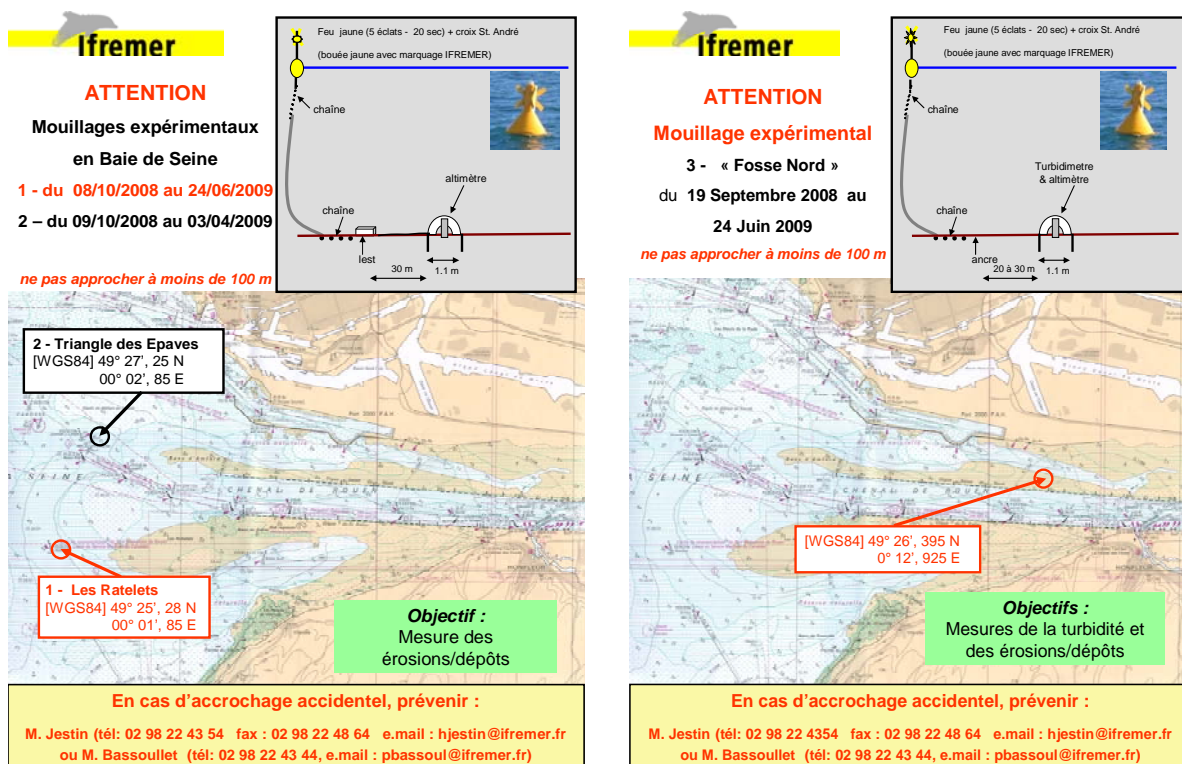


Figure B-3 : Affiches pour autorisations de mouillage des trois stations de mesures 2008-2009
Localisation des stations

- a) Station « **Bouée des Ratelets** » [WGS 84 : 00° 01', 85 E ; 49° 25', 28 N]
Durée des enregistrements : 08/10/2008 au 24/06/2009.
Interruption dans les mesures : du 02/04/2009 au 07/05/2009 (ALTUS relevé/vérification et remise en état de la station)
- b) Station « **Triangle des Epaves** » [WGS 84 : 00° 02', 85 E ; 49° 27', 25 N]
Durée des enregistrements : 09/10/2008 au 03/04/2009.
Interruption dans les mesures : la station ayant été chalutée, seule une partie des données, du 09/10/2008 au 15/02/2009, est exploitable.

Mise en place d'une station de mesures altimétriques ALTUS, en domaine intertidal, en fosse Nord, sur la vasière adossée à la digue basse Nord :

- c) Station « **Fosse Nord** » [WGS 84 : 00° 12', 93 E ; 49° 26', 40 N]
Durée des enregistrements : *Altimétrie* – du 19/09/2008 au 24/06/2009, *Turbidité* (turbidimètre mis en place sur cette station pour les besoins de validation liés au projet)

« MODEL ») - du 19/09/2008 au 12/02/2009.

Interruption dans les mesures : la station ayant basculé, seules les données altimétriques de la période du 19/09/2008 au 14/01/2009 et du 12/02/2009 (*après remise en place de la station*) au 24/06/2009, sont exploitables.

NB. : Parallèlement et pour les besoins du projet MODEL (validation réactualisée du modèle de bouchon vaseux), des enregistrements de turbidité, conductivité, pression et température ont été réalisés du 18/09/2008 au 12/02/2009, aux 3 stations **Marel Honfleur** [WGS 84 : 00° 14', 00 E ; 49° 25', 69 N], **Fatouville** [WGS 84 : 00° 19', 00 E ; 49° 25', 98 N] et à la station de la **Fosse Nord**, instrumentée pour les mesures altimétriques (voir localisation ci-dessus).

III.2. Durant « COLMATAGE 2 » 2010-2011 :

Les déploiements expérimentaux de COLMATAGE 2 se sont focalisés sur la campagne d'érodimétrie, pour caractériser le comportement sédimentaire et sa variabilité en fonction des biocénoses benthiques dans le secteur de l'embouchure de la Seine. La localisation des carottages a été déterminée en concertation avec les benthologues.

22 carottages ont ainsi été réalisés lors de la mission embarquée (N/O « Côtes de la Manche »), du 25 au 30 avril 2010 (figure B-4 et tableau B-1). Les correspondances dans la nomenclature de ces stations – habituellement échantillonnées par les benthologues - sont données en dernières colonnes du tableau.

N° Station	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Correspondance Stat. Dauvin	Correspondance Stat. Lesourd
1	49° 31', 860 N	00° 01', 086 E	7	
2	49° 33', 610 N	00° 03', 393 E	5	
3	49° 27', 605 N	00° 01', 906 E	13	
4	49° 26', 160 N	00° 00', 543 E	15	
5	49° 25', 480 N	00° 00', 557 E	16	
6	49° 23', 490 N	00° 00', 500 W	20	
7	49° 28', 269 N	00° 08', 189 W	AK8b	
8	49° 30', 473 N	00° 00', 007 W		S179(C305)
9	49° 31', 543 N	00° 01', 526 E		S182(C311)
10	49° 29', 518 N	00° 01', 015 E		S13 (C240)
11	49° 28', 944 N	00° 00', 912 E		S23 (C241)
12	49° 29', 493 N	00° 01', 989 E		S15 (C237)
13	49° 28', 000 N	00° 04', 955 E		S56
14	49° 26', 492 N	00° 03', 465 E		S96
15	49° 25', 001 N	00° 06', 613 E		S126
16	49° 26', 490 N	00° 02', 000 E		S104
17	49° 26', 042 N	00° 00', 441 E		S103(C29)
18	49° 26', 522 N	00° 00', 956 E		S91 (C107)
19	49° 27', 018 N	00° 00', 991 E		S74 (C115)
20	49° 25', 300 N	00° 01', 850 E		S294
21	49° 27', 989 N	00° 04', 018 E		S55 (C286)
22	49° 25', 000 N	00° 02', 000 E		S120

Tableau B-1 : Position et nomenclature des carottages réalisés lors de la campagne "COLMATAGE 2"

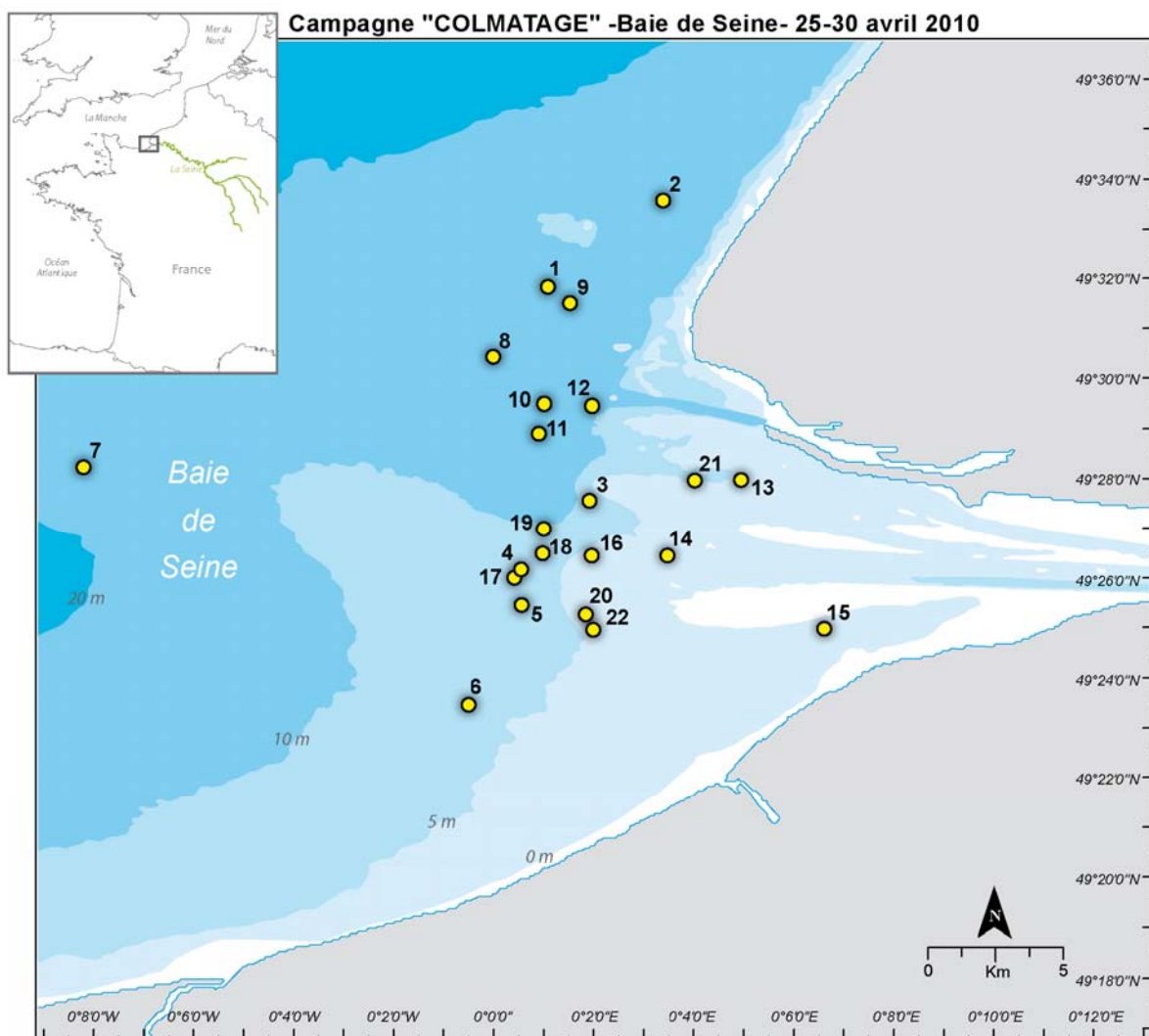


Figure B-4 : Carte de localisation des carottages

En complément à ces tests COLMATAGE 2, l'étude des corrélations entre variations morpho-sédimentaires et forçages physiques a été poursuivie au sein du projet « MODEL 2 » par la mise en place de **2 stations de mesures altimétriques ALTUS**, à l'embouchure, en domaine subtidal (figure B-5) :

- a) Station « **Bouée des Ratelets** » [WGS 84 : 00° 01', 94 E ; 49° 25', 26 N]
Durée des enregistrements : 08/09/2010 au 26/01/2011 et 26/01/2011 au 11/05/2011 (*non exploitable dans sa totalité pour cause de fouling important par fixation de balanes*)
- b) Station « **Ratier SE** », en fosse Sud [WGS 84 : 00° 06', 51 E ; 49° 24', 83 N]
Durée des enregistrements : 09/09/2010 au 09/12/2010 et 09/12/2010 au 11/05/2011 (*également non exploitable dans sa totalité pour la même cause*)

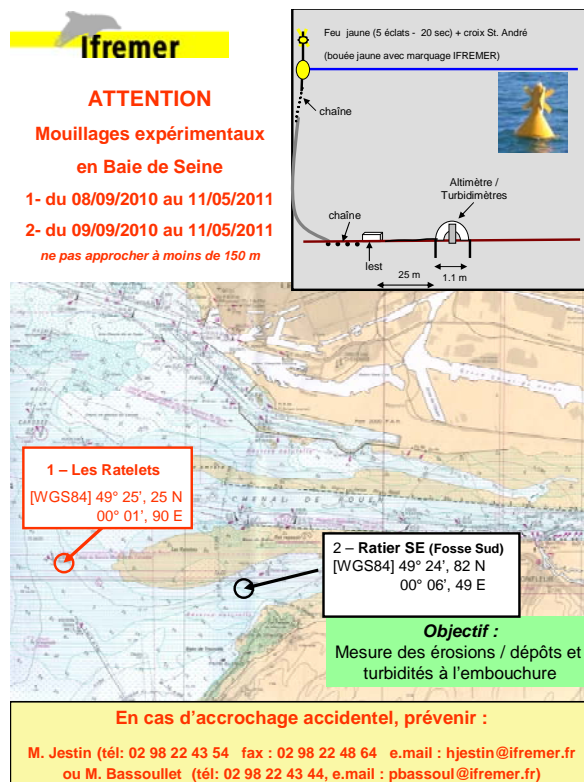


Figure B-5 : Affiche pour l'autorisation de mouillage des deux stations de mesures 2010-2011
Localisation des stations

La motivation pour ces nouvelles mesures résulte de la méconnaissance des processus sédimentaires dans la fosse sud, le besoin d'y observer les teneurs en matières en suspension (décrites dans le projet MODEL), et l'opportunité d'en profiter pour mesurer au même endroit les érosions/dépôts. L'emplacement du système de mesures (Ratier SE) correspond à une zone où les différentiels bathymétriques d'une part, et des calculs hydro-morpho-sédimentaires antérieurs d'autre part, révélaient des évolutions particulières (Waeles, 2005). De façon à pouvoir « raccrocher » de nouvelles mesures altimétriques à celles de la campagne de 2009, il a été décidé de renouveler la mesure des Ratelets, très représentative d'un secteur (flanc occidental du banc du Ratier) où la dynamique était importante, selon les mesures de 2009.

Parce que les deux projets, COLMATAGE d'une part, et MODEL d'autre part s'intéressent à la variabilité des conditions de remaniements des sédiments superficiels, il est proposé de tenter une analyse des mesures altimétriques commune aux deux projets.

IV. Synthèse des données altimétriques

IV.1. Description sommaire des types de fonds des sites d'implantation des stations

Pour le site des Ratelets, selon les périodes d'intervention, la couche de sédiment de surface peut-être très différente et liée à l'agitation ou période de calme précédant ces interventions. Pour les stations subtidales, les types de faciès relevés proviennent des observations des plongeurs et des prélèvements à la benne (notamment lors de la mission de prélèvements de S. Lesourd d'avril 2009).

Station Ratelets : Lors de l'implantation (Oct. 2008) : une couche de vase fine (quelques cm) surmontant des sables fins. En Avril 2009 : Sables très fins en surface sur une vase très sableuse. En Septembre 2010, il était noté une couche de crème de vase de (2-3 cm) surmontant des sables très fins à moyens envasés (épaisseur décimétrique, selon les plongeurs) et, sous-jacent, une vase sableuse.

Station Triangle des épaves : Lors de l'implantation (Oct. 2008) : Vase très sableuse en surface. Fond ridé (5 cm de hauteur environ signalé par les plongeurs). En Avril 2009 : Vase sableuse (quelques cm) sur sables fins envasés.

Station Ratier SE : Une couche de crème de vase (quelques cm) surmontant une vase grisâtre très compacte.

Station Fosse Nord : Vase avec silts et sables fins comportant des passées plus riches en sables fins.

Un planning de synthèse des différentes mesures altimétriques, complété par leur positionnement, est fourni sur les figures B-6 et B-7.

L'examen de la figure B-8 permet d'évaluer la représentativité des périodes de mesures d'un point de vue météorologique. Quatre roses des vents ont été produites sur la base d'une information homogène, à savoir la simulation 4 fois par jour du vent au large de La Hève à l'aide du modèle météorologique Arpège de Météo-France, pour la période 1995-2011 (16 ans). La rose globale (fig. B-3a) fournit une image de la statistique des vents en baie de Seine, avec une dominance bien marquée du secteur SW à W, en particulier pour les vents forts. La figure B-3b montre que pendant la période des mesures (de septembre 2008 à juin 2009 et de septembre 2010 à mai 2011) les statistiques de vent sont assez fidèles aux statistiques sur 16 ans. Cela reste vrai si l'on considère la seule période 2 (septembre 2010-mai 2011), mais l'est un peu moins pour la première période (septembre 2008 à juin 2009), au cours de laquelle les vents d'ouest sont dominants. Il est remarquable de constater la rareté des vents de nord et de sud-est.

Cet aperçu rapide des conditions météorologiques au cours de la période de mesure nous indique que les conditions environnementales rencontrées sont à peu près représentatives, et viennent donc renforcer l'analyse de la dynamique qui sera faite à partir des mesures d'érosion/dépôt.

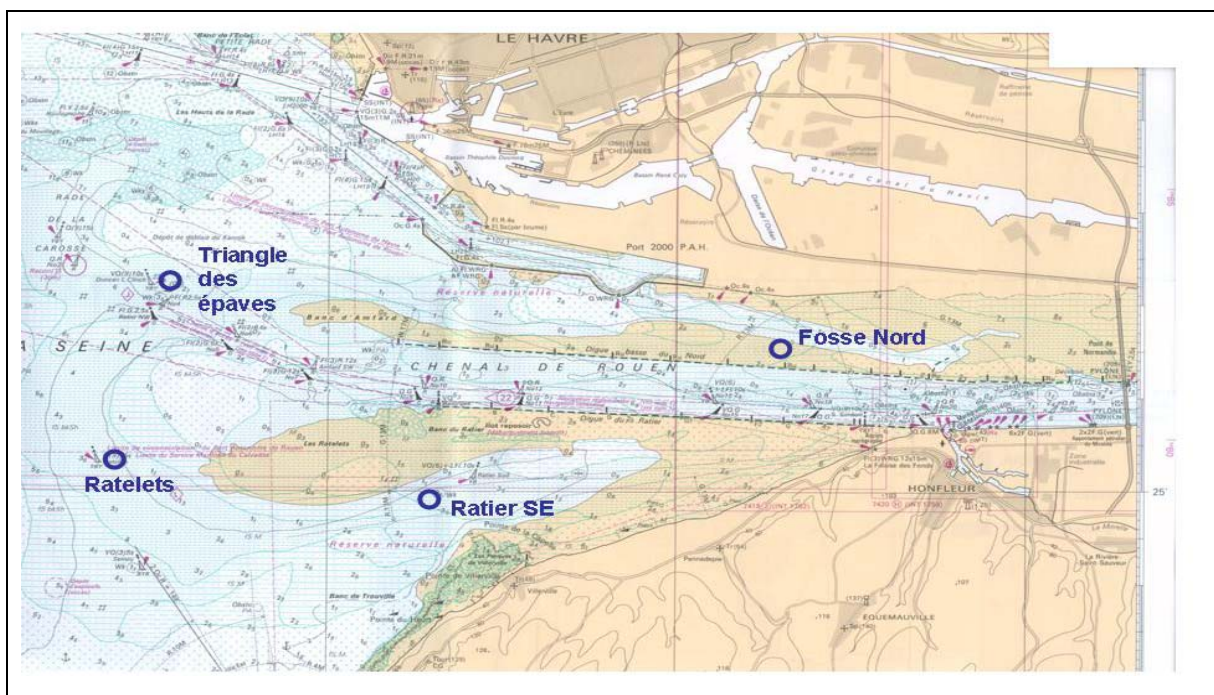


Figure B-6 : Synthèse des mesures altimétriques ALTUS menées de 2008 à 2011 à l'embouchure de la Seine. Positionnement des stations.

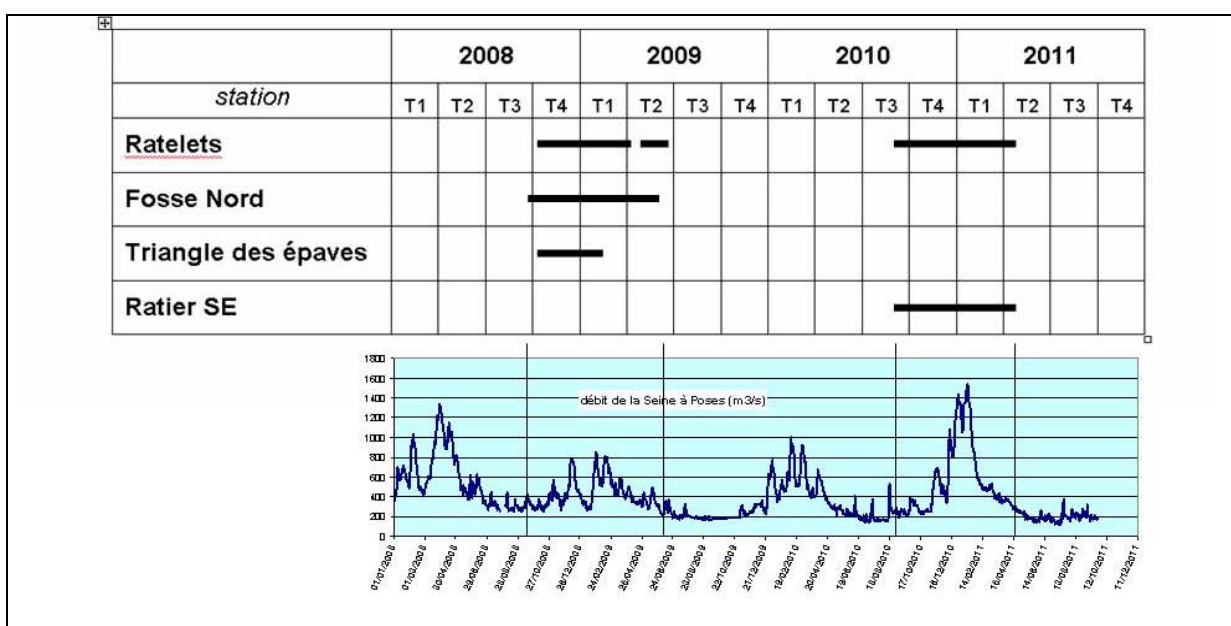


Figure B-7 : Planning des mesures altimétriques réalisées, et débit de la Seine à Poses.

S'agissant des débits, représentés sur la figure B-7, on observe une bonne variabilité de ceux-ci pendant les périodes de mesures, entre 250 et 800 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ de septembre 2008 à juin 2009, et entre 200 et 1500 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ en 2010-2011. En particulier la deuxième période de mesure a encadré une crue bien représentative de celles de la Seine.

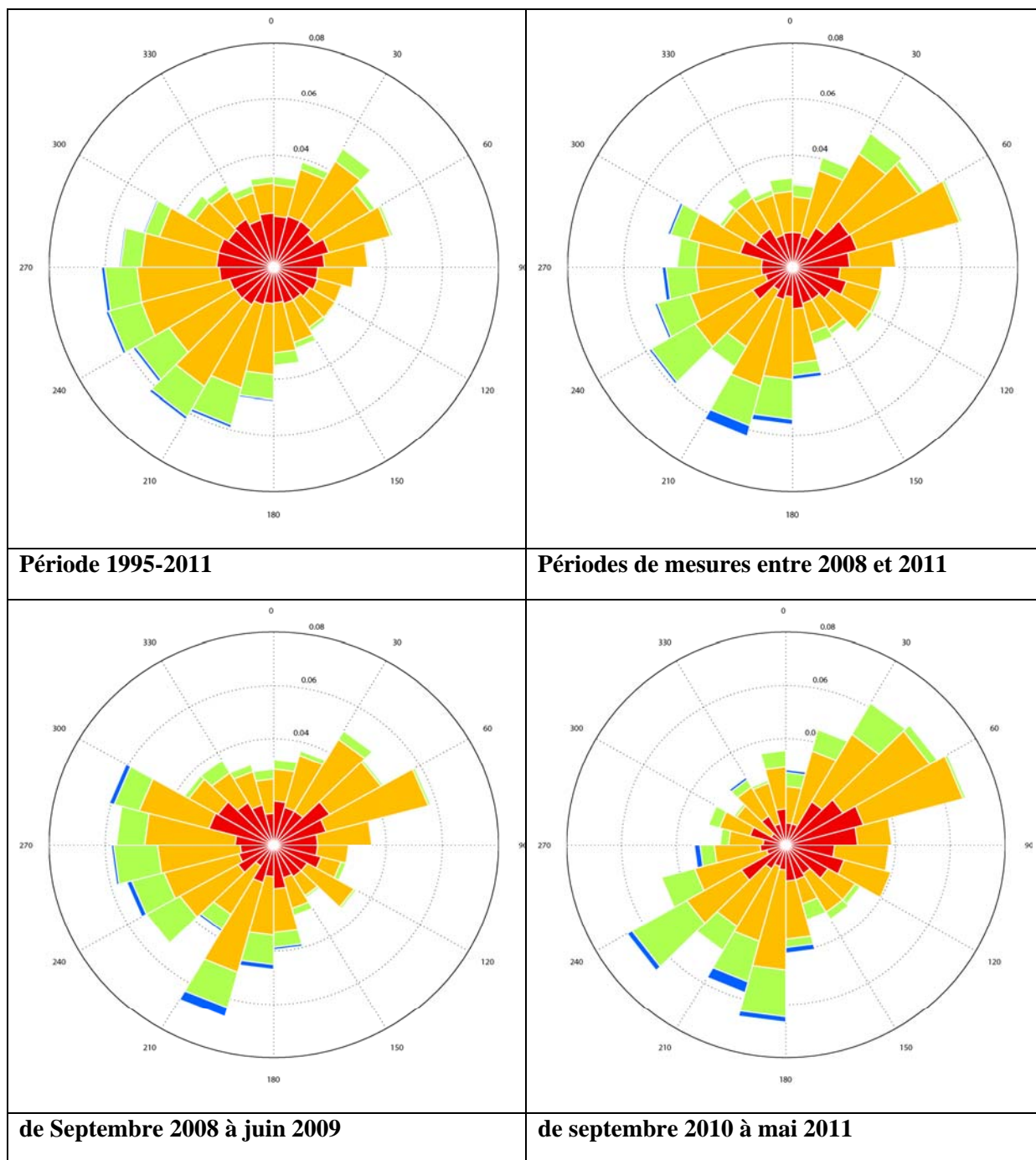


Figure B-8 : Statistiques de vents en baie de Seine (49.5 °N, 0.0 °E) calculées à partir d'une simulation du modèle ARPEGE de Météo-France (résolution : 0.5°).

Légende commune aux 4 roses : coordonnée radiale : probabilité ; rouge : vents entre 0 et 5 m/s, orange : vents entre 5 et 10 m/s, vert : vent entre 10 et 15 m/s ; bleu : vent entre 15 et 20 m/s

IV.2. Analyse des enregistrements de la 1^{ère} période (COLMATAGE 1 / 2008-2009) des mouillages ALTUS

Outre les données altimétriques, chaque système ALTUS mesure également la pression selon des cadences permettant de capter aussi bien la marée et les surcotes/décotes météorologiques que la

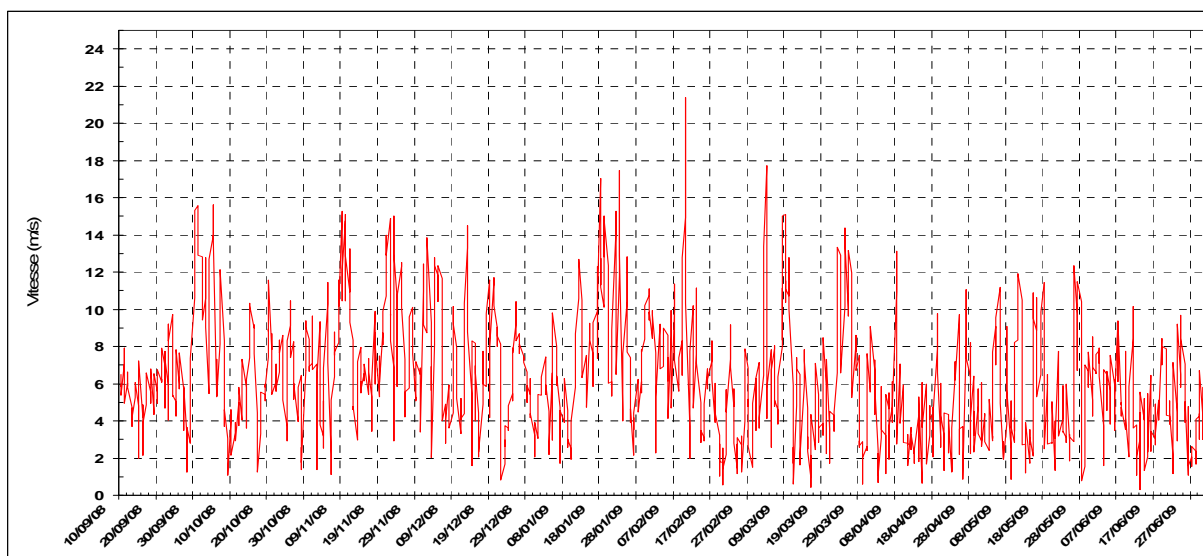


Figure B-9 : Vitesse des vents (en m.s^{-1}) sur la période Septembre 2008 – Juin 2009

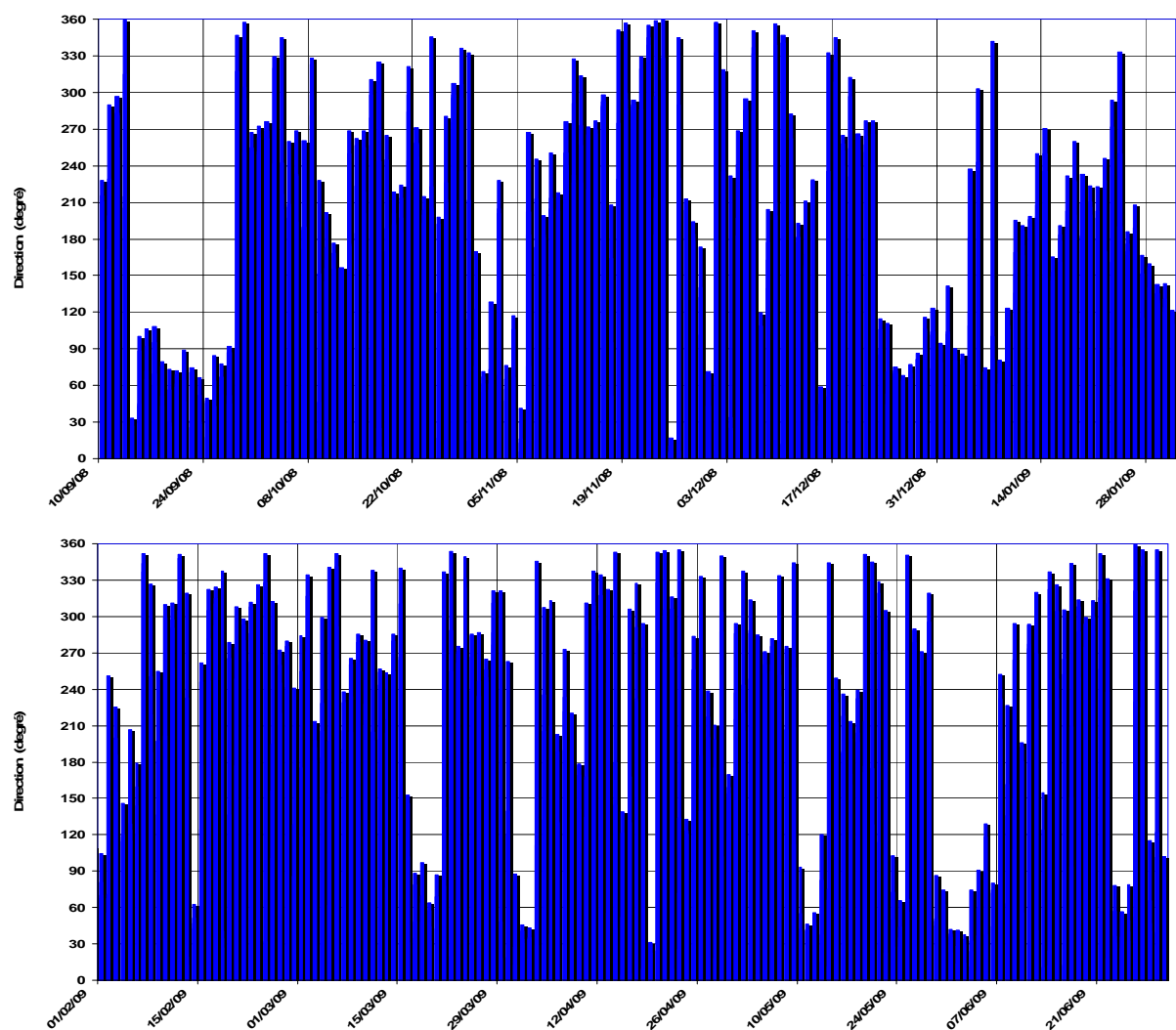


Figure B-10 : Direction des vents sur la période Septembre 2008 – Juin 2009

répartition spectrale de l'énergie des vagues. Les résultats et discussions sont présentés à partir des 3 séries de diagrammes des stations Ratelets, Triangle des épaves et Fosse Nord. Le positionnement des stations est donné dans le paragraphe III.1. Chaque enregistrement comporte : la hauteur d'eau, le débit fluvial, les composantes de vitesse du vent, les hauteurs de vagues (H_{sig}), la période des vagues et les variations du niveau de sédiment, mettant ainsi en évidence les phases de dépôt/érosion du sédiment. Selon les stations, 7 à 9 mois de mesures ont été enregistrés.

Les caractéristiques des vents (vitesse et direction) au cours de la période de mouillage des équipements, de Septembre 2008 à Juin 2009, sont données en figures B -9 et B-10.

Pour cette campagne de mesures, la programmation des systèmes ALTUS des 3 stations (Ratelets, Triangle des épaves et Fosse Nord) était la suivante : (1) *Vagues* : bursts de 520 mesures (260 s à 2Hz), toutes les 16 min, (2) *Altimétrie* : 4 mesures durant 260 s toutes les 16 min.

L'analyse globale des variations altimétriques de ces stations (figures B-11 à B-13) fait ressortir des érosions/dépôts pouvant être très marqués (plusieurs décimètres), surtout pour la station externe *Ratelets* (figure B-11). Le site des *Ratelets* se présente globalement comme étant «en équilibre» sur la période de 5 mois (Oct. 2008 à fin Fév. 2009), après des situations érosives intenses suivies de rechargements. Ensuite, pour la période de 45 jours s'étendant du 07/05 au 24/06/2009, il est constaté une érosion de 8 cm, à mettre en relation avec une période d'agitation comme il sera discuté par la suite. Concernant le site en *Fosse Nord* (figure B-12), il est constaté un lent engraissement sur la période de 9 mois, avec un dépôt résiduel de 16 cm sur cette période ; cet engraissement apparaît plus intense sur la période s'étendant de mi-décembre 2008 à mi-janvier 2009 et est à corrélérer avec une période d'agitation pratiquement nulle. Quant au site du *Triangle des épaves* (figure B-13), il est difficile d'interpréter une différence entre niveaux de sédiment final et initial pendant la période de 6 mois d'enregistrements, la station ayant, semble-t-il, subi un chalutage au cours de la 1^{ère} quinzaine de décembre 2008. Le système a été remonté le 03/04/2009 après plusieurs investigations par plongeurs.

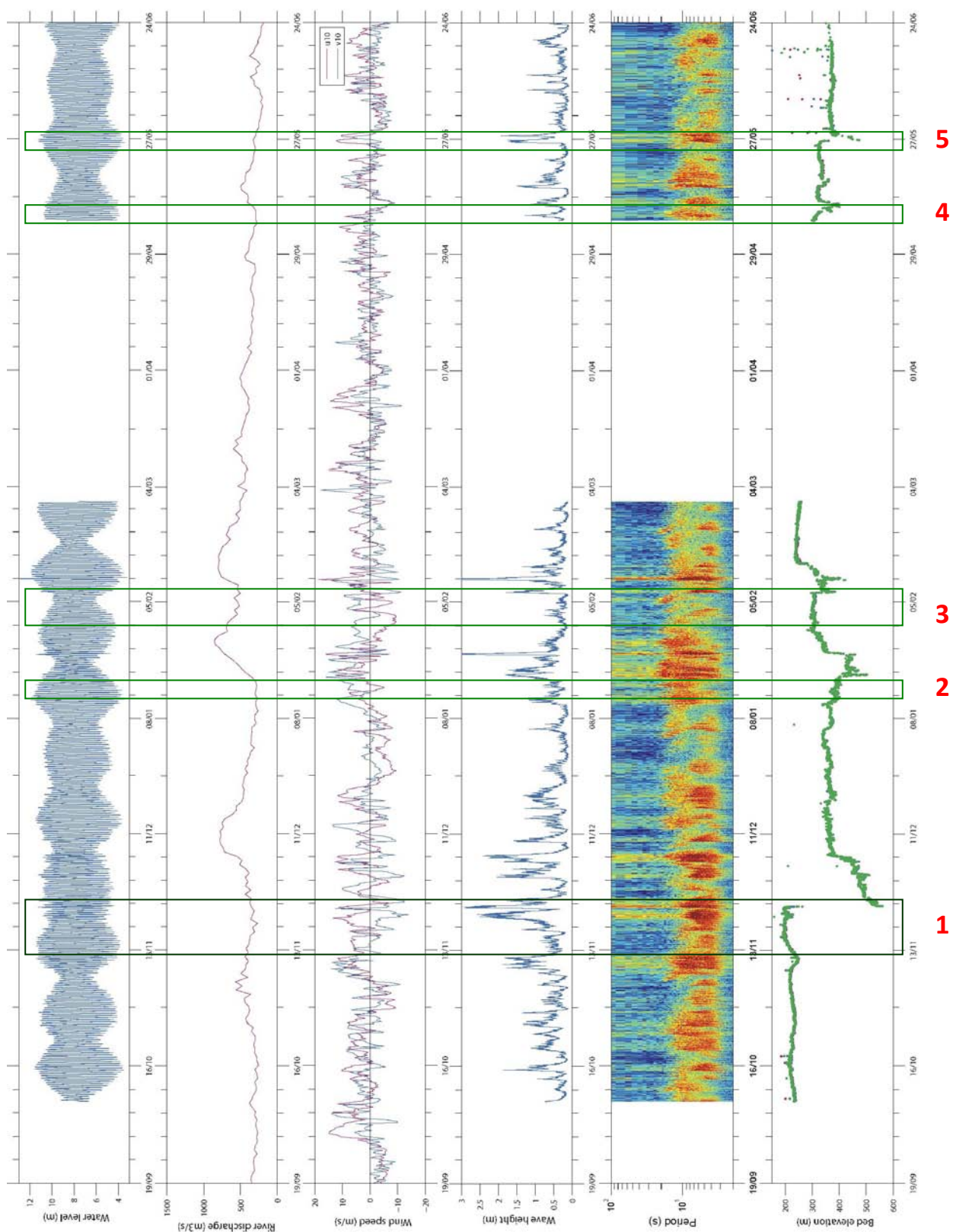


Figure B-11 : Enregistrement ALTUS aux Ratelets (Octobre 2008 – Juin 2009) – Les valeurs altimétriques sont données en mm

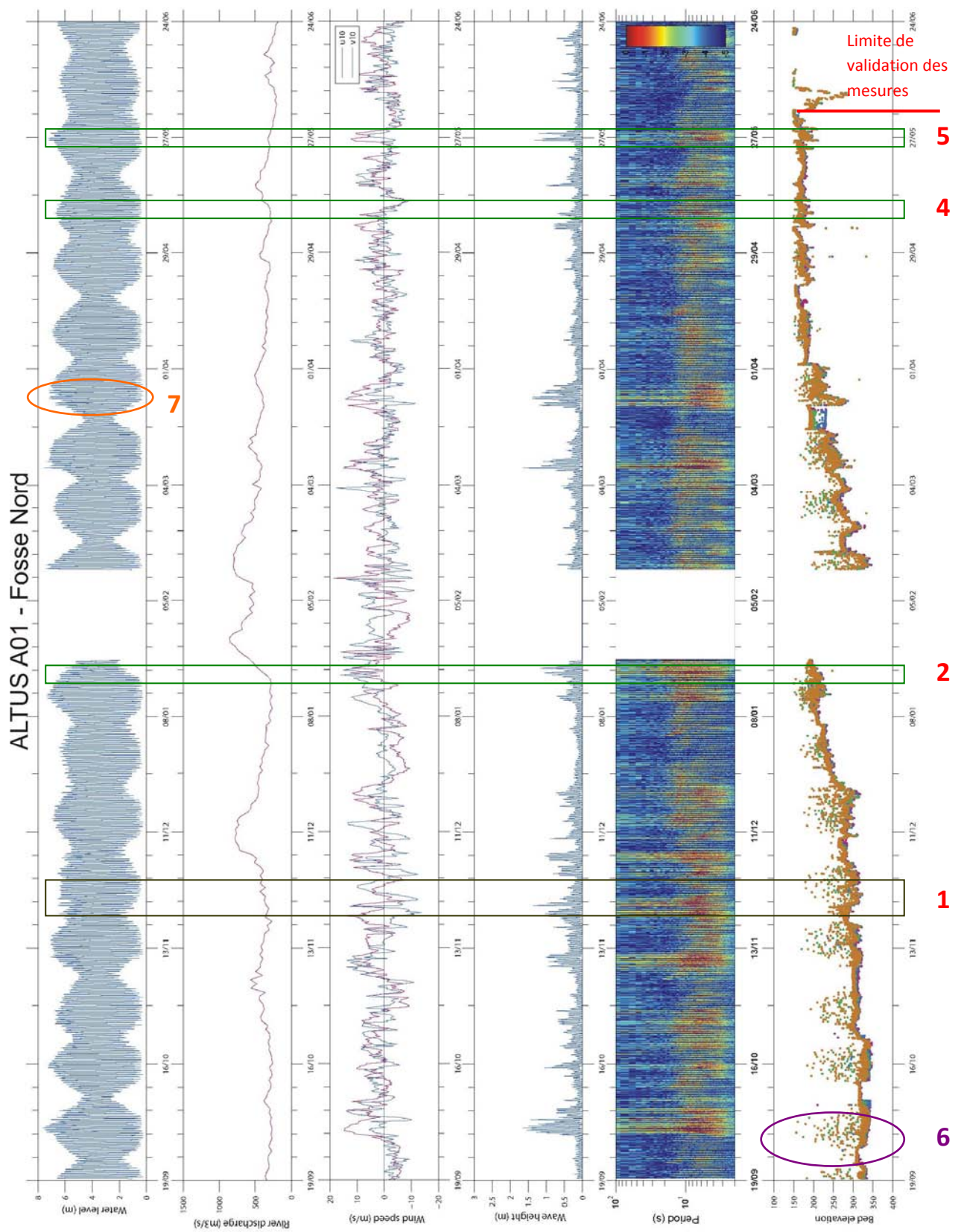


Figure B-12 : Enregistrement ALTUS en Fosse Nord (Septembre 2008 – Juin 2009) – Les valeurs altimétriques sont données en mm

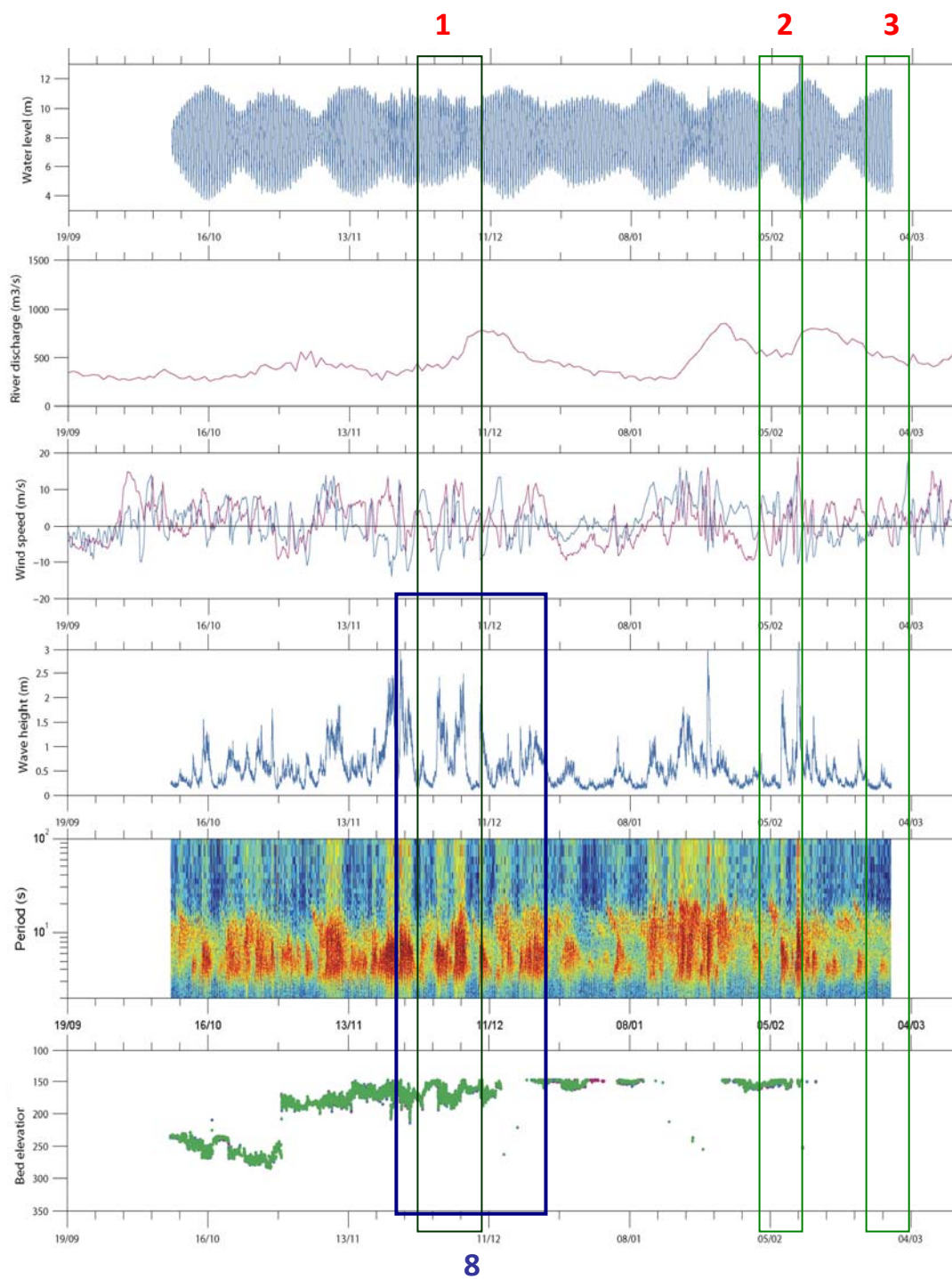


Figure B- 13 : Enregistrement ALTUS au « Triangle des épaves » (Octobre 2008 – Février 2009) – Les valeurs altimétriques sont données en mm

Quels ont été les principaux événements durant ce cycle d'enregistrements marqué par des périodes d'agitation importantes (vagues atteignant 3 m pour les stations externes) alternant avec des périodes calmes ?

Plusieurs constats peuvent être établis en analysant les variations altimétriques (érosion/dépôt) en fonction des forçages océano-météo :

Aux Ratelets et en Fosse Nord. Les érosions générées par des vagues de hauteur significative de 2 à 3 m (N° 1 à 5 sur les figures B-11 et B-12) sont particulièrement actives aux Ratelets et le sont corrélativement très peu sur les deux autres sites. Elles sont principalement engendrées lors de tempêtes de secteur ouest. L'érosion aux *Ratelets* de 35 cm de sédiment lors de l'épisode N° 1 (figure B-11), le 24/11/2008, est brutale et survient après 4 jours de tempête (avec vents de NNW à W de 15 m.s^{-1}) et des vagues de hauteur significative de 3 m. Une explication peut-être la suivante : lors du 1^{er} épisode de vagues (20-23/11/2008) un phénomène de liquéfaction du sédiment (faciès de sables fins légèrement envasés, à caractère thixotrope) ; due à l'effet de cisaillement oscillant généré par les vagues ; permet une érosion en masse de ce sédiment au cours du 2^{ème} épisode de vagues (le 24/11/2008) plus brutal et intense que le premier. Aucune incidence de cet épisode érosif n'est enregistrée à la station *Triangle des épaves* (figure B-13) et il est constaté une faible érosion de 4 cm à la station *Fosse Nord* (figure B-12). La mesure de pression en continu avec le système ALTUS a permis de connaître l'amortissement des vagues dans ce secteur de la *Fosse Nord* ; il est estimé entre 50 et 60 %. Ainsi, le 24/11/2008, alors que la hauteur des vagues (H_{sig}) aux *Ratelets* était de l'ordre de 2.50 m à 3.00 m, elle n'atteignait que 1.00 m à 1.30 m en *Fosse Nord*.

Les épisodes érosifs N° 4 et 5 aux *Ratelets*, par vents de secteur ouest, décapent respectivement 11 et 13 cm avec des hauteurs de vagues (H_{sig}) de 1.10 m et 1.80 m ; les hauteurs correspondantes sont alors de 0.60 m et 1.30 m à la station *Fosse Nord*.

Par contre force est de constater qu'une période d'agitation (avec des vagues de 2 à 3 m) peut conduire à des épisodes érosifs de l'ordre de la journée, mais aussi à des épisodes de rechargement ; ainsi, aux *Ratelets* (figure B-11), le rechargement après l'épisode N° 1 s'établit avec des vagues de 2 m et des vents de secteurs SW à W sur quelques jours. Il est semble-t-il raisonnable d'envisager un apport essentiellement sableux (en nappage temporaire et/ou par transit près du fond). En effet, l'écho reçu par l'ALTUS n'est pas perturbé et ne correspond pas à un dépôt de type « crème de vase ». Il en est de même lors du rechargement après l'épisode érosif N° 2 ; celui-ci s'effectue en un seul jour, avec des vagues de 3 m et des vents de secteur est. Parfois ce rechargement se produit en période de calme, sur une période légèrement plus longue, comme lors de l'épisode N° 3. Il est alors constaté que les dépôts sont particulièrement importants. Cela met en relief une très forte capacité de mobilité des sédiments ; il en sera également discuté lors des analyses de la 2^{ème} période d'acquisition de données (COLMATAGE 2, 2010-2011).

Concernant la *Fosse Nord*, il est à noter : (i), sur le graphe du bas de la figure B-12, les très fortes turbidités enregistrées au voisinage du fond lors des cycles de Vives-Eaux (N° 6 sur ce graphe) ; (ii) qu'à partir du 03/06/2009, en *Fosse Nord*, les données altimétriques ne sont plus valides par suite d'une déstabilisation du support trépied du transducteur.

Au Triangle des épaves : les épisodes d'érosion/dépôt sont peu marqués sur ce site (figure B-13) mis à part un brusque dépôt de sédiment (de l'ordre de 7 cm) le 30 octobre 2008, qui ne trouve pas d'explication en fonction des événements océano-météo connus. Par ailleurs, plus tard, le tripode support du système ALTUS semble avoir été déstabilisé par un chalutage, selon les observations des plongeurs lors de la relève définitive. Ce chalutage pourrait avoir eu lieu après la 1^{ère} relève des données *in situ* par l'équipe des plongeurs, le 11 décembre 2008. De ce fait, la distance entre le transducteur et le sédiment s'est trouvée réduite (inférieure à 15 cm) impliquant un phénomène de « saturation » du signal avec perte de l'écho.

Les remaniements plus faibles constatés à cette station peuvent, peut-être, trouver une explication par le type de faciès sédimentaire. Par rapport à la station *Ratelets*, la fraction sableuse du sédiment de surface y est plus grossière. Une illustration peut être donnée avec la période

d'agitation marquée sur ce secteur fin Novembre 2008 (N° 8), avec des vagues de Hsig de 3 m qui ne produisent qu'une érosion de l'ordre de 5 cm. A noter aussi que d'une manière générale, les hauteurs de vagues au Triangle des épaves sont proches de celles observées aux Ratelets.

Plus généralement, sur les trois sites instrumentés, les enregistrements de « surcotes » sont relativement fréquents (exemple N° 7 sur les graphes *Fosse Nord* (figure B-12). Il s'agit en fait ici de « surpressions », et il faudrait enlever la variation concomitante de la pression atmosphérique pour en déduire la vraie valeur de surcote.

Les constats établis lors de cette première période de 9 mois d'enregistrements sur deux secteurs « externes » (*Ratelets* et *Triangle des épaves*) et un secteur « interne » à l'estuaire (*Fosse Nord*) conduisent à conclure que :

- les érosions les plus marquées proviennent de l'action des vagues engendrées par des vents de secteur Ouest. A l'embouchure de l'estuaire, le rôle des vagues sur les remaniements sédimentaires superficiels domine nettement celui de la marée. Ce dernier n'est pas négligeable mais ce n'est pas le forçage le plus important en terme de matériel érodé. Sur cette séquence, les enregistrements n'ont pas permis de déceler une action du forçage débit fluvial sur ces remaniements. Cependant il est à noter que les événements de crue ont été à chaque fois accompagnés de périodes d'agitation élevée, d'où la difficulté d'apprécier la contribution de ce forçage « débit fluvial »
- le site instrumenté en Fosse Nord a permis de quantifier l'amortissement des vagues (de 50 à 60 %) par rapport aux stations externes des Ratelets et du Triangle des épaves.

IV.3. Analyse des enregistrements de la 2^{ème} période (COLMATAGE 2 / 2010-2011) des mouillages ALTUS aux stations Ratelets et Ratier Sud Est

L'étude des corrélations entre variations morpho-sédimentaires et forçages physiques s'est poursuivie au sein du projet MODEL 2 par la mise en place de 2 stations de mesures altimétriques ALTUS, à l'embouchure, en domaine subtidal sur la période Septembre 2010 à Mai 2011. La station des Ratelets a été replacée au même endroit pour cette nouvelle campagne de mesures altimétriques, les résultats concernant la 1^{ère} campagne sur ce secteur ayant été fructueux et jugés représentatifs de cette zone externe d'embouchure. Le secteur du Ratier, en Fosse Sud, était un secteur identifié comme important pour la validation du modèle numérique hydro-morpho-sédimentaire. Sur cette station du Ratier, pour les besoins du projet MODEL 2, le système ALTUS a aussi été complété pour la mesure de la turbidité en surface et au voisinage du fond.

Le positionnement de ces 2 stations est donné en paragraphe III.2.

Au cours de la période de mouillage des équipements, de Septembre 2010 à Mai 2011, les caractéristiques des vents (vitesse et direction), sont données en figures B-14 et B-15 :

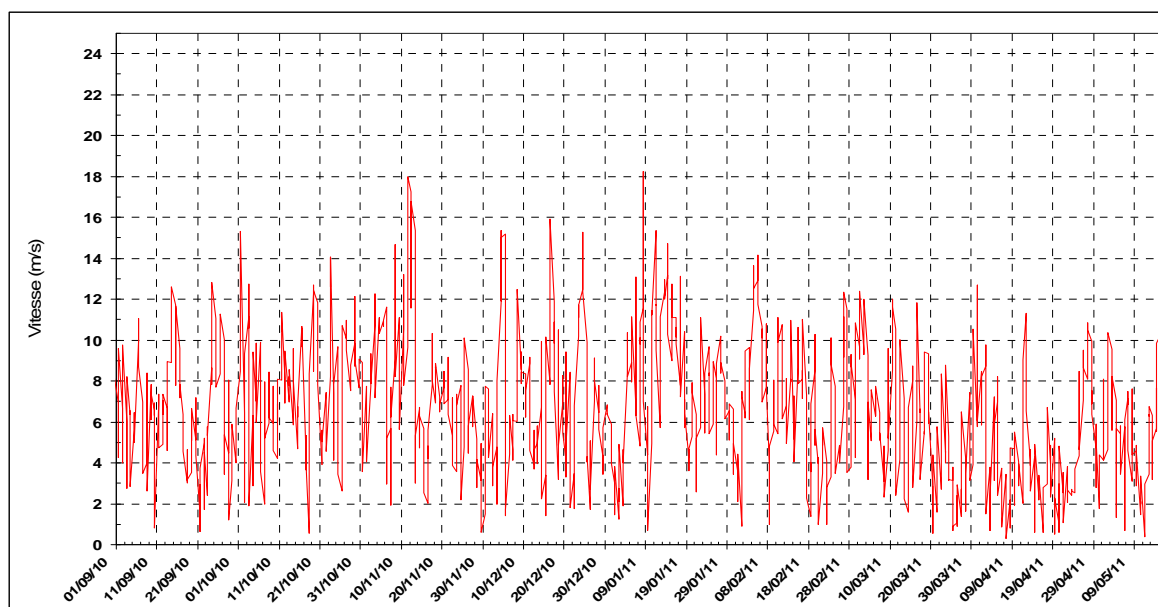


Figure B-14 : Vitesse des vents sur la période Septembre 2010 - Mai 201

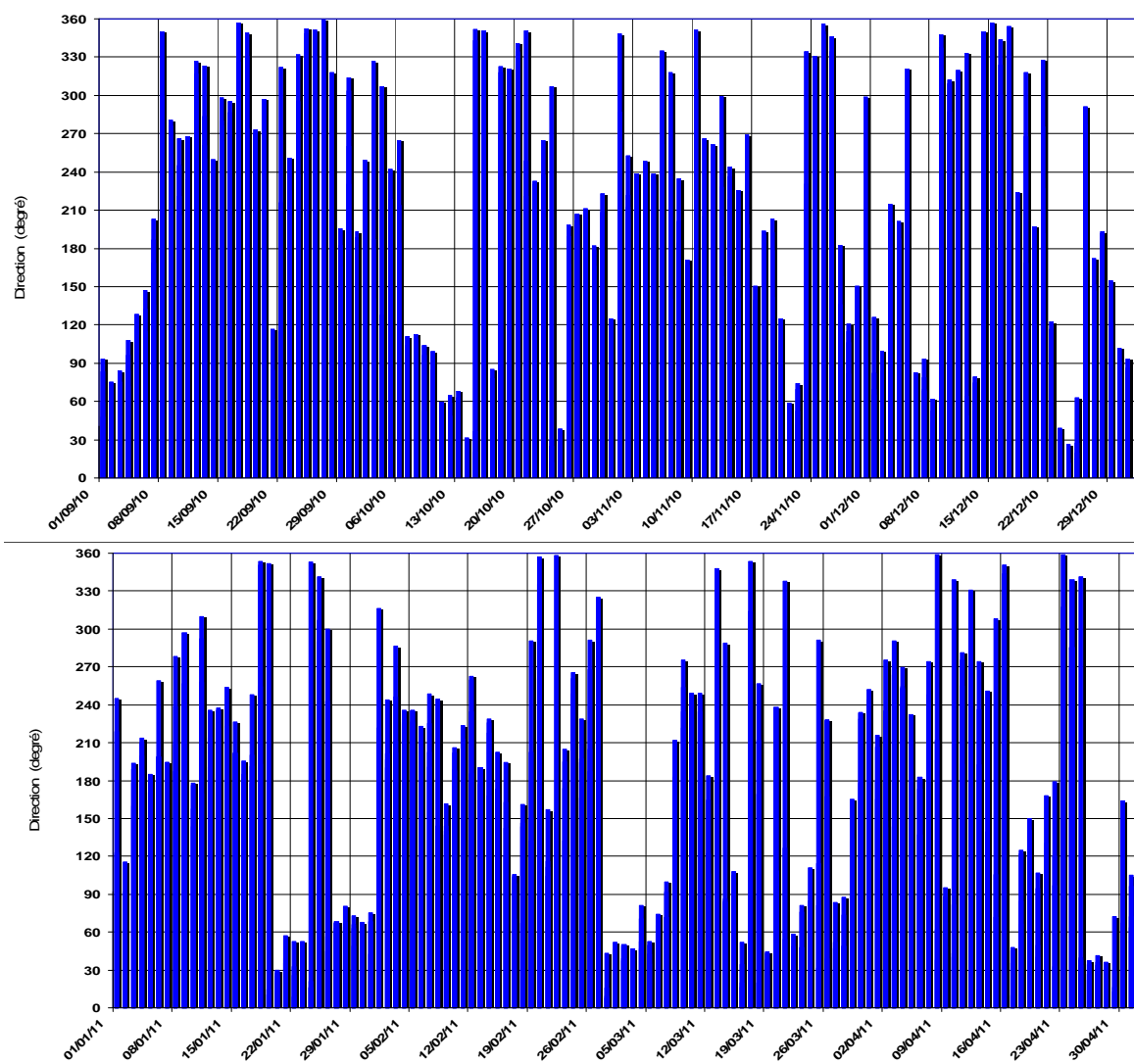


Figure B-15 : Direction des vents sur la période Sept. 2010 – Avril 2011

Tout comme pour la 1^{ère} période (COLMATAGE 1 / 2008-2009) les résultats et discussions sont présentés à partir des 2 séries d'enregistrements aux stations *Ratelets* et *Ratier* (figures B-16 à B-21). Chaque enregistrement comporte : la hauteur d'eau, le débit fluvial, les composantes de vitesse du vent, les hauteurs significatives de vagues, la période de la houle et les variations du niveau de sédiment, mettant ainsi en évidence les phases de dépôt/érosion du sédiment.

Lors de cette seconde campagne de mesures, la programmation des systèmes ALTUS des 2 stations (*Ratelets* et *Ratier*) était la suivante : (1) *Vagues* : bursts de 560 mesures (280 s à 2Hz), toutes les 35 min, (2) *Altimétrie* : 7 mesures durant 280 s toutes les 35 min.

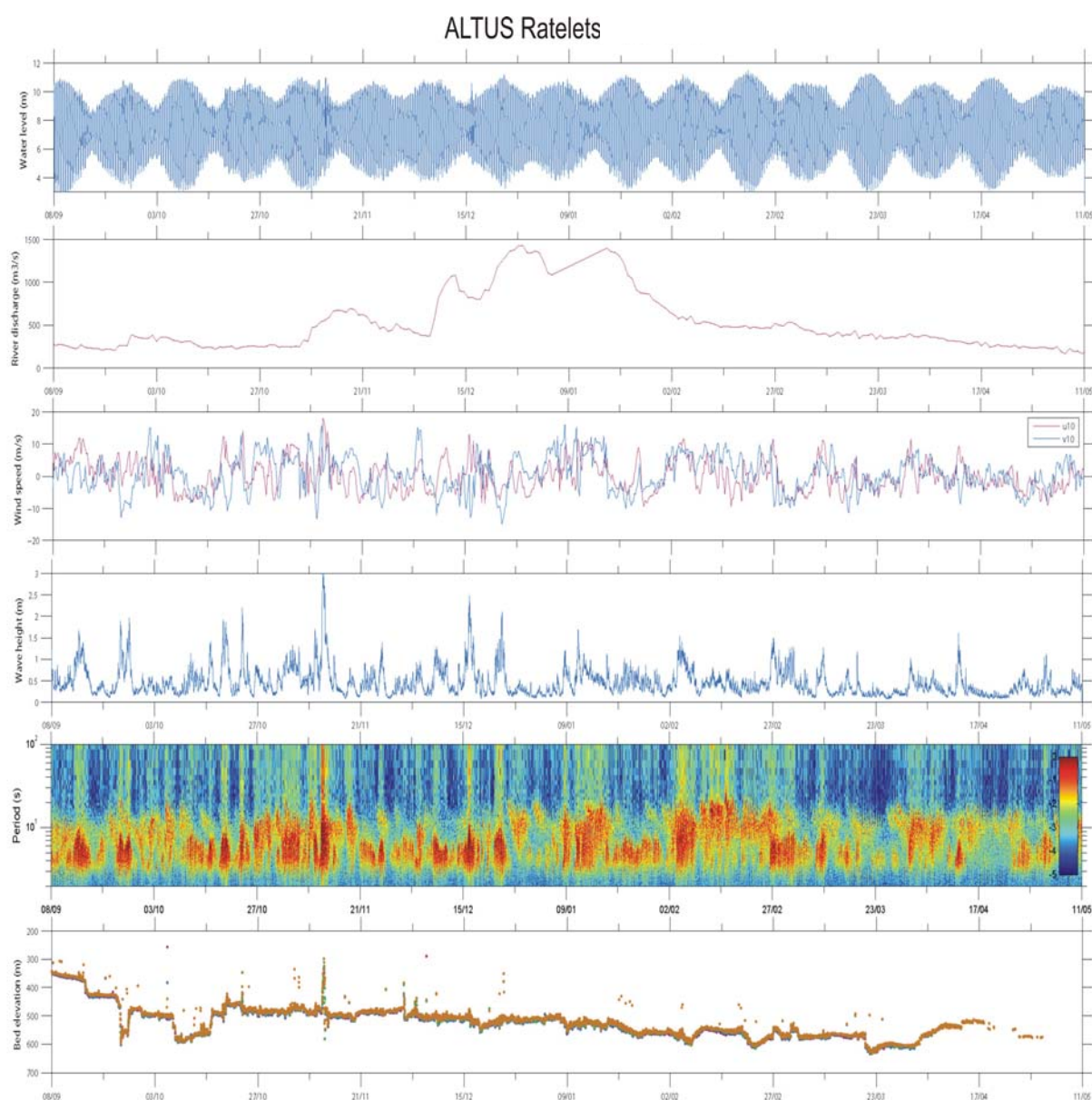


Figure B-16 : Totalité de l'enregistrement ALTUS à la station Ratelets (08 Septembre 2010 – 11 Mai 2011) – Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

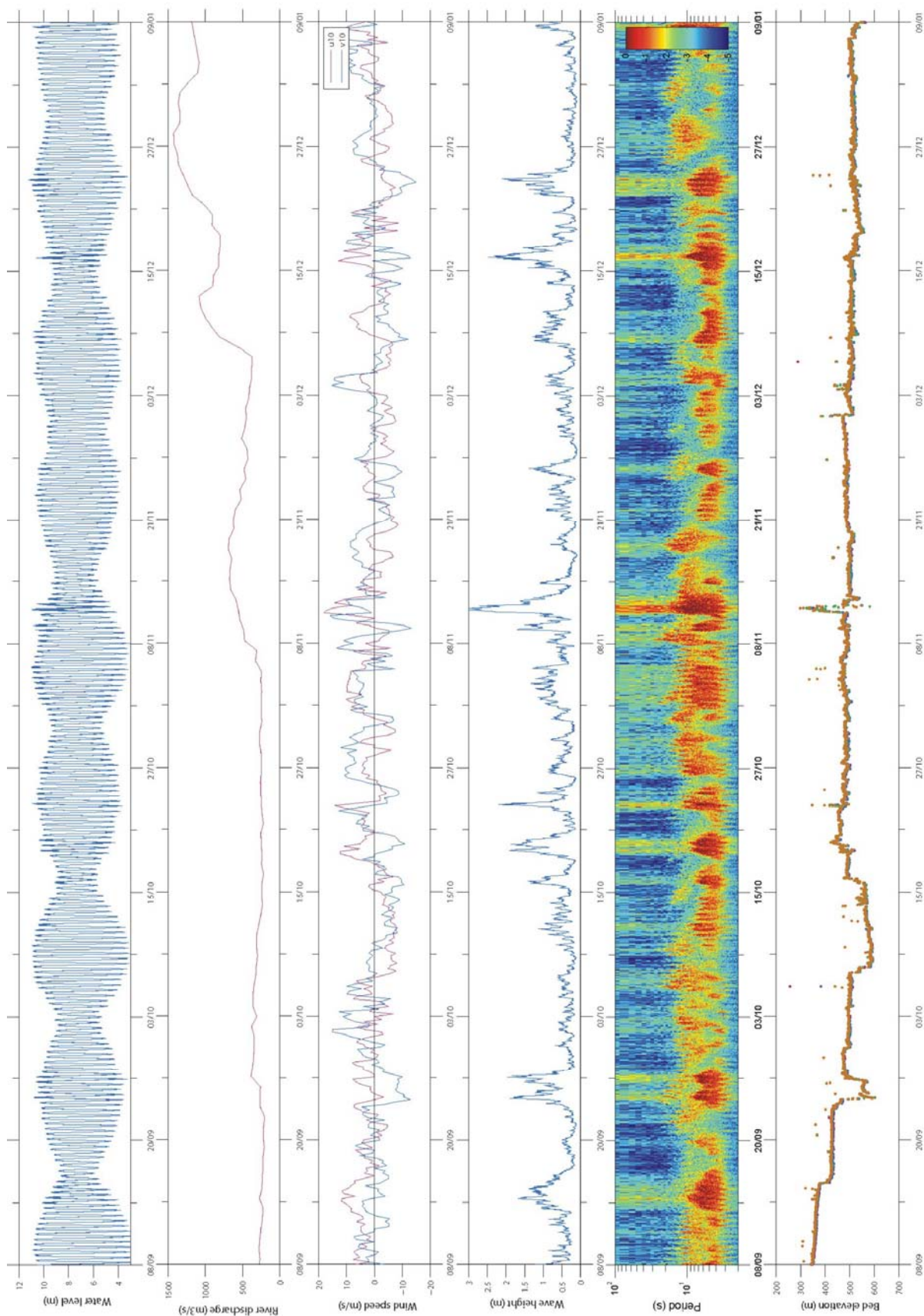


Figure B-17 : Enregistrement ALTUS à la station Ratelets - Période du 08 Septembre 2010 au 09 Janvier 2011) – Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

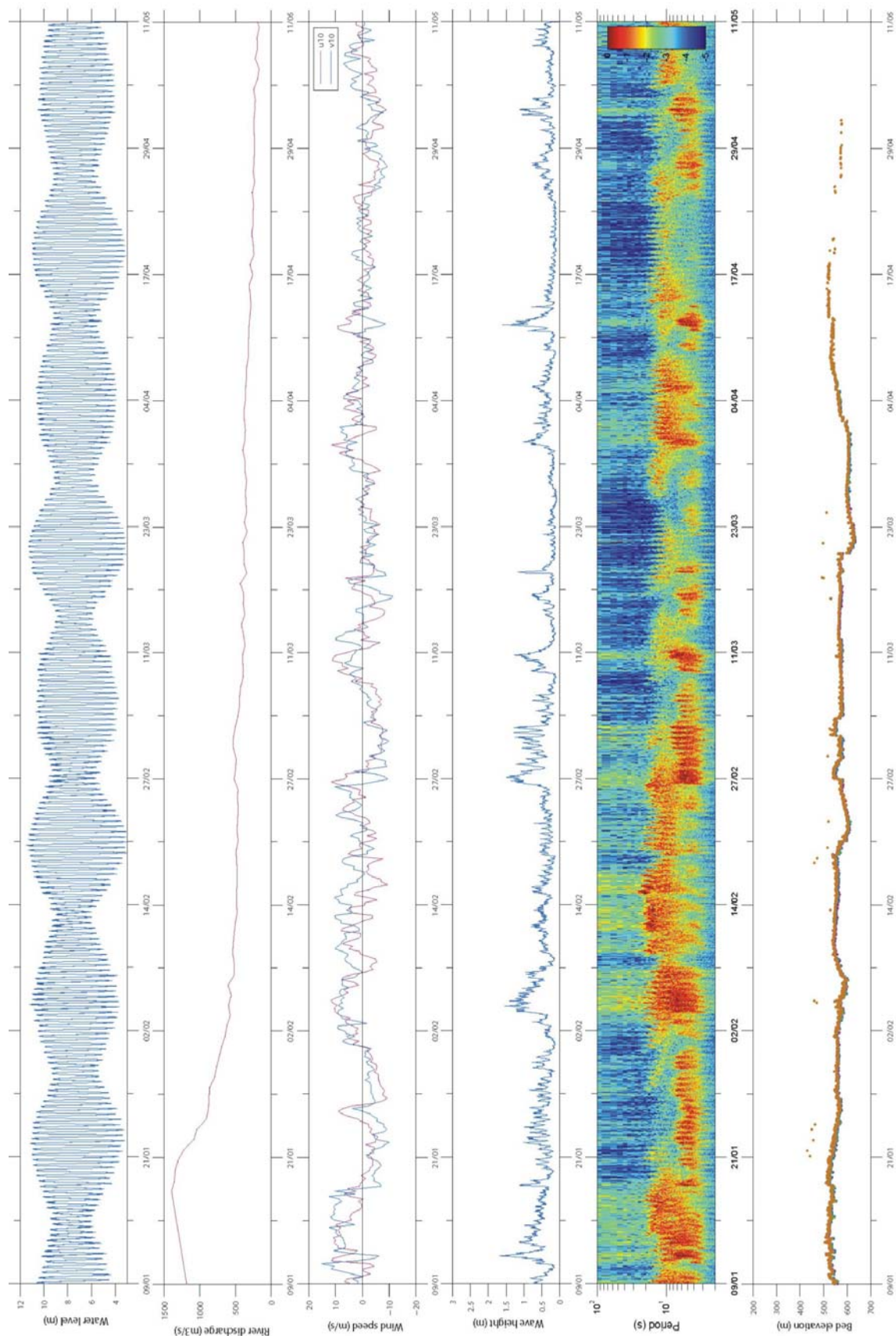


Figure B-18 : Enregistrement ALTUS à la station Ratelets - Période du 09 Janvier au 11 Mai 2011) – Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

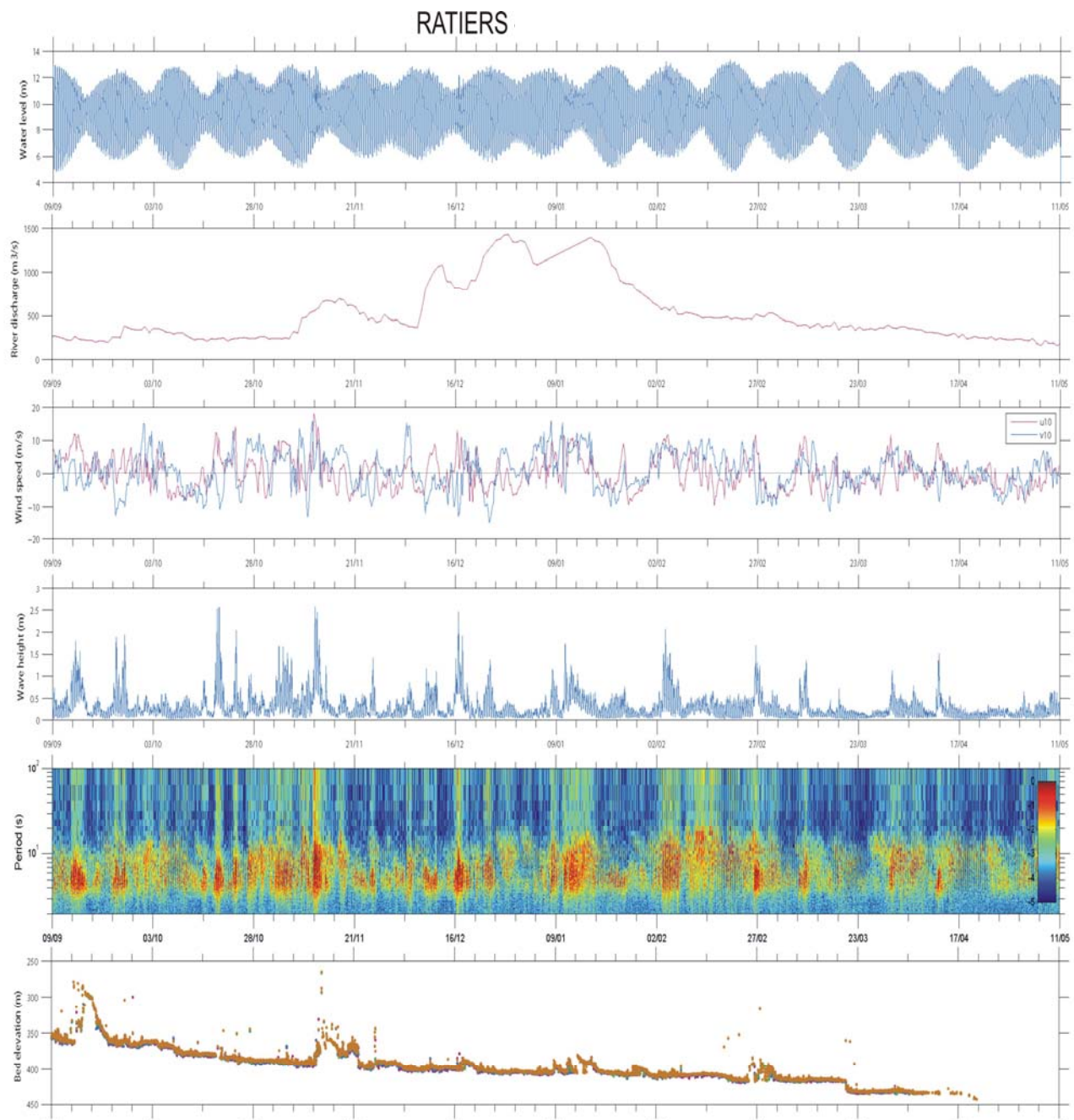


Figure B-19 : Totalité de l'enregistrement ALTUS à la station Ratier (09 Septembre 2010 – 11 Mai 2011) – Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

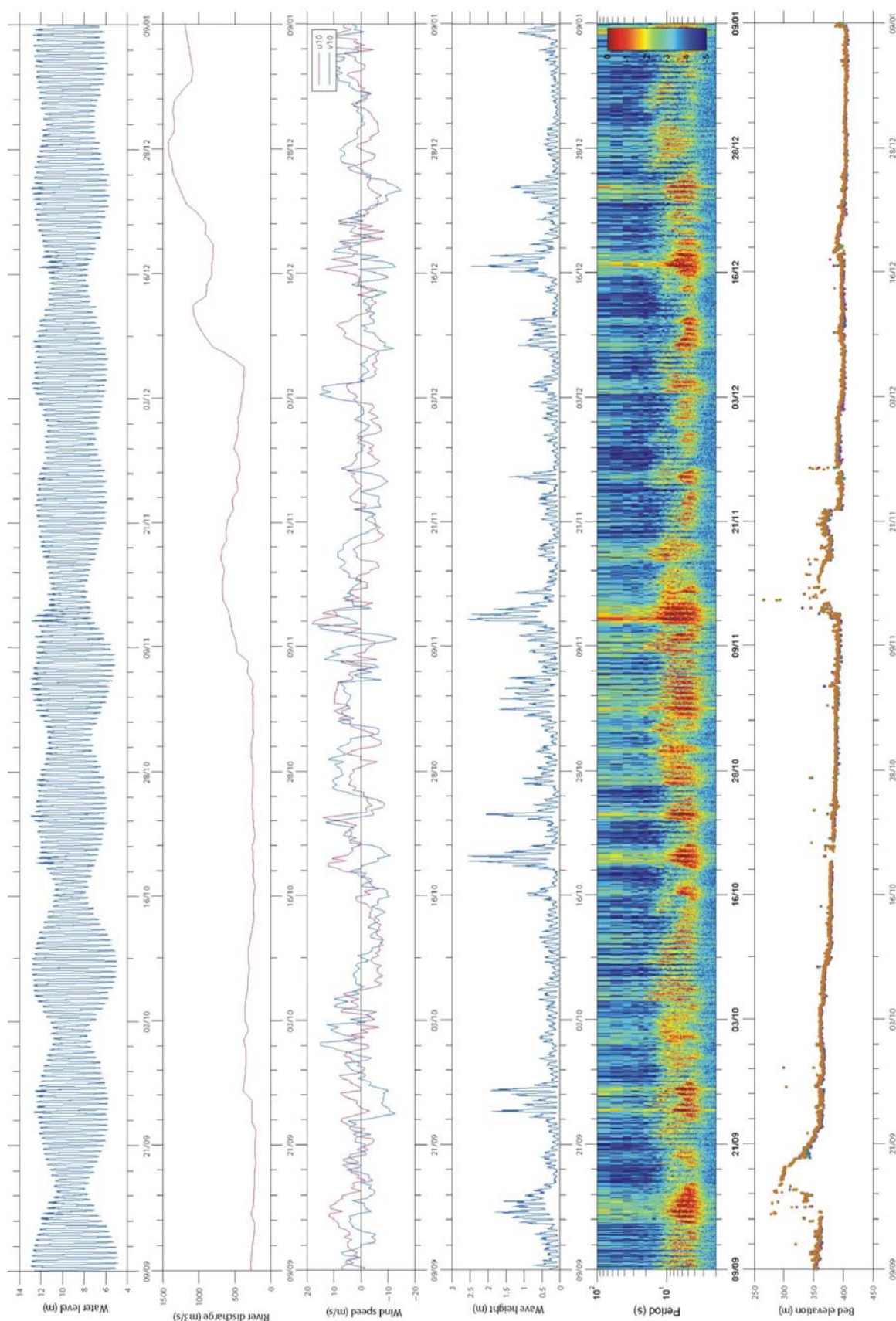


Figure B-20 : Enregistrement ALTUS à la station Ratier – Période du 09 Septembre 2010 au 09 Janvier 2011 - Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

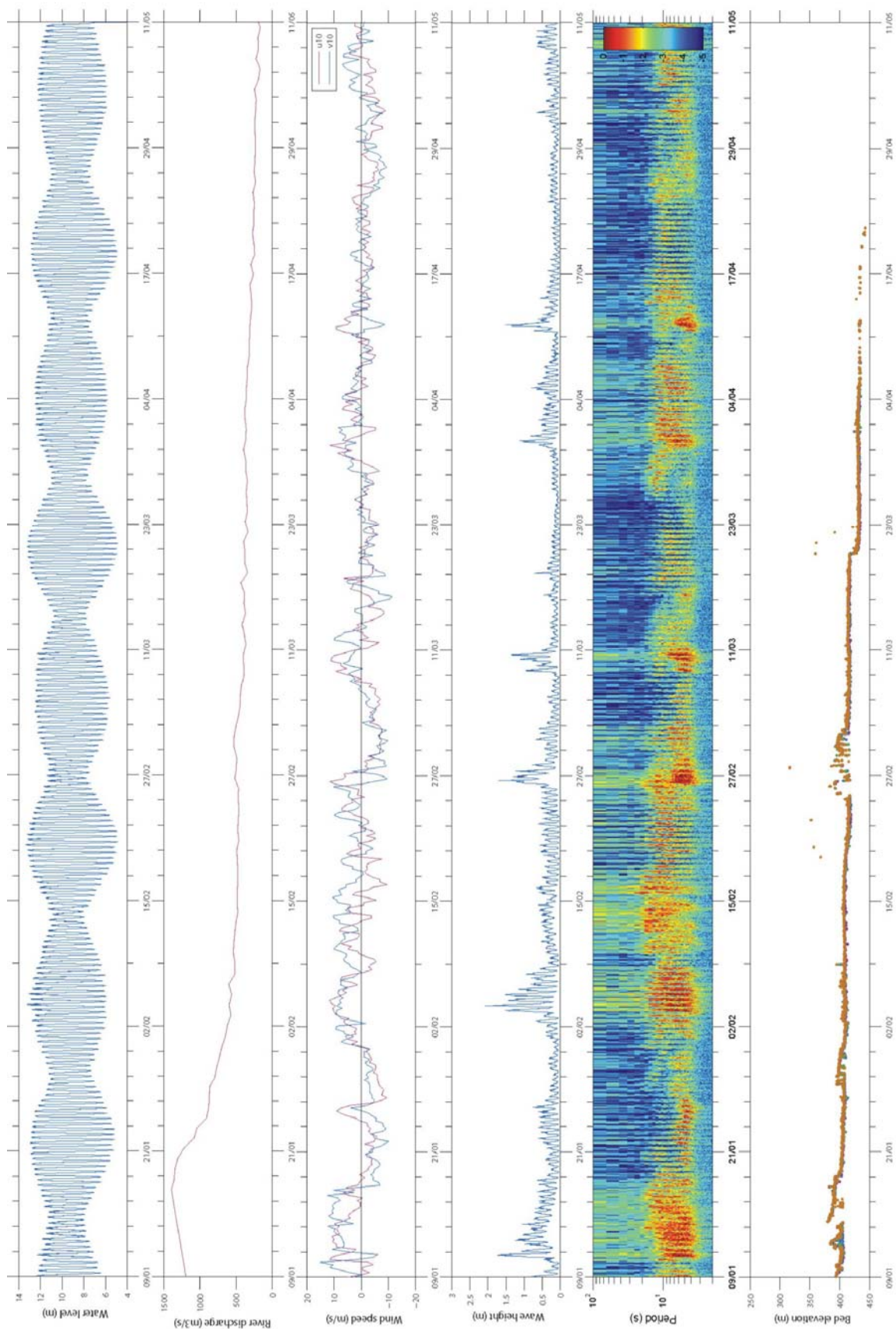


Figure B-21 : Enregistrement ALTUS à la station Ratier – Période du 09 Janvier au 11 Mai 2011 - Les valeurs altimétriques (graphe du bas) sont données en mm

Afin d'expliciter plus aisément les divers événements océano-météo impliquant des variations altimétriques, des loupes identifiées à partir des enregistrements aux 2 stations *Ratelets* et *Ratier* (repères A à G des figures B-22 et B-23) sont discutées. Ces loupes encadrent les événements sur une période de l'ordre de la quinzaine de jours.

Station "Les Ratelets" - Période 08/09/2010 au 11/05/2011

Variation du niveau de sédiment

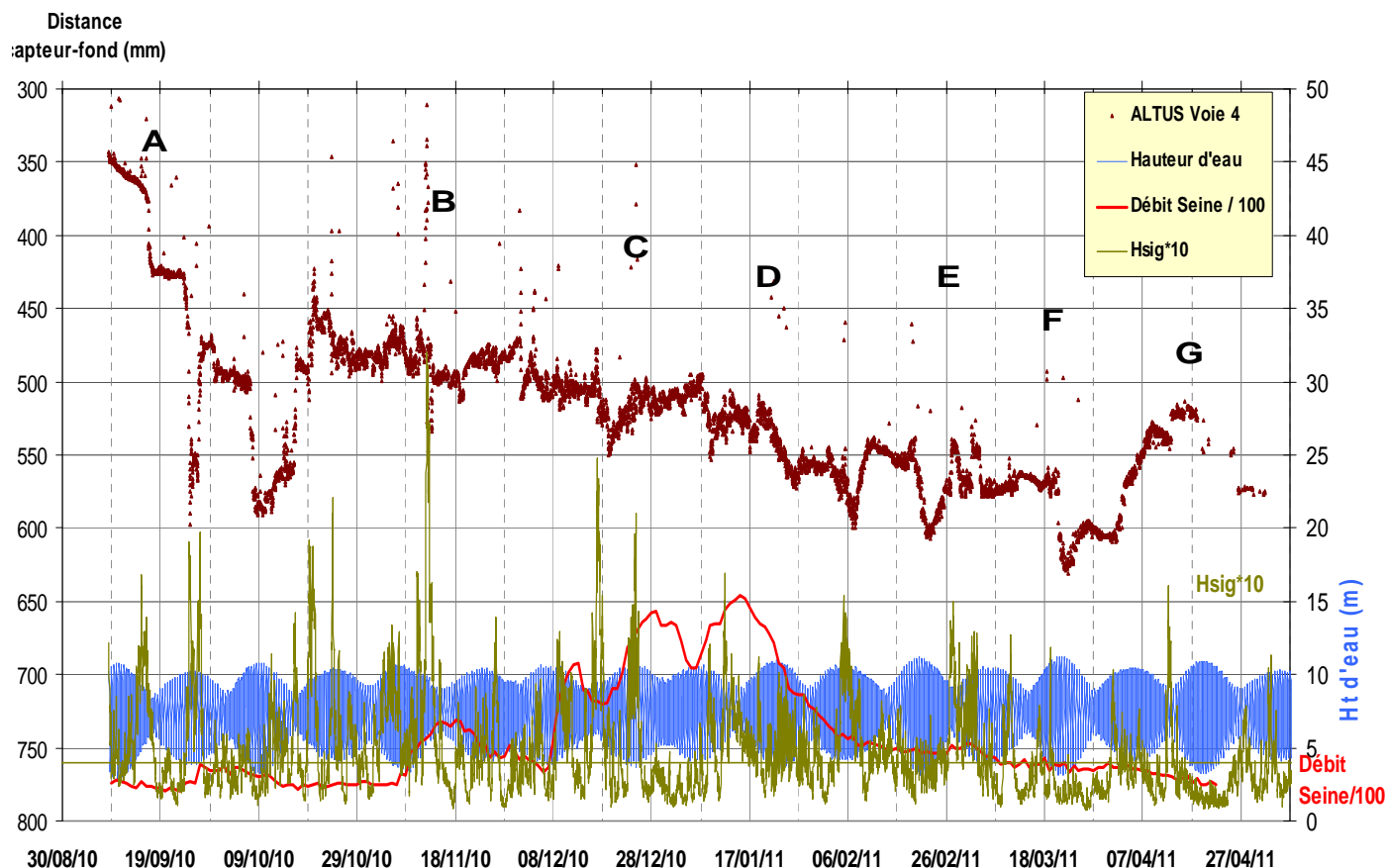


Figure B-22 : Positionnement des loupes et événements [A à G] analysés dans le texte sur le site des **Ratelets** (totalité de la période d'enregistrements)

Station "Ratier" - Période 09/09/2010 au 11/05/2011
Variation du niveau de sédiment

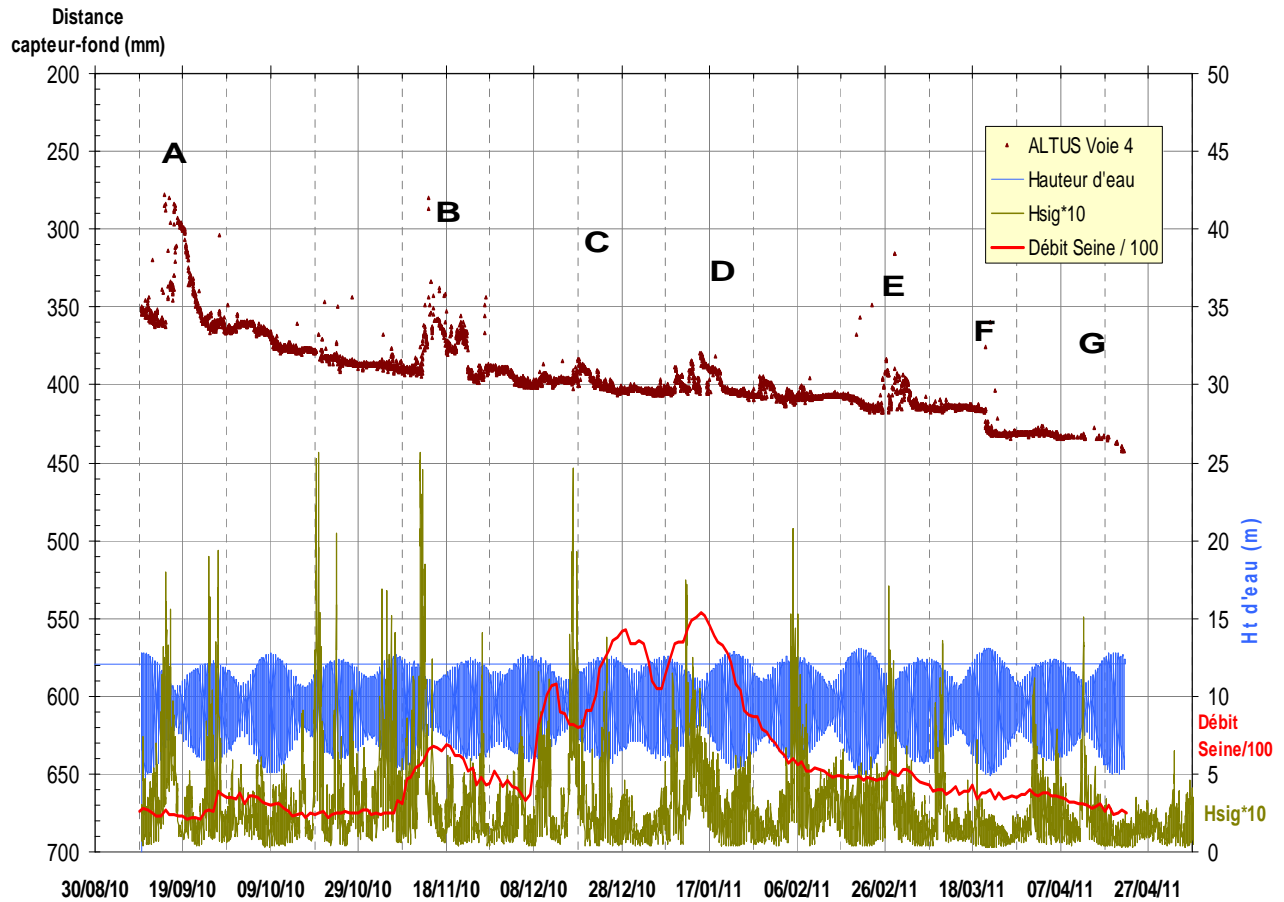


Figure B-23 : Positionnement des loupes et événements [A à G] analysés dans le texte sur le site du **Ratier** (totalité de la période d'enregistrements)

L'analyse globale des enregistrements altimétriques de ces 2 stations *Ratelets* et *Ratier* sur 8 mois (Figures B-16 à B-23 et tableau B-2) fait ressortir des variations pouvant être très marquées notamment aux *Ratelets*. A noter que sur l'ensemble de la période d'enregistrements, on constate une érosion résiduelle relativement régulière atteignant 23 cm aux *Ratelets* et 10 cm au *Ratier*.

Le tableau B-2 synthétise les principales variations altimétriques en fonction des divers forçages :

	Num. événement	Période	Erosion		Dépôt		Coeff.	Débit Seine m³/s	Vagues Hsig (m)	Vent	
			(cm)	durée (j)	(cm)	durée (j)				Direction	Vitesse (m/s)
Ratelets	A	16/09/10	6	1			35	242	0.9 - 1.6	NW	9.6
		24/09/10	15	1			86	264	< 0.4	NW	12.8
		26/09/10			9	1	84	258	< 1.6	NW	11.3
Ratier SE	A	15/09/10			7	3	47	271	0.5 - 1.6	NW	11.6
		19/09/10	7	1			49	229	< 0.2	W	6.6
Ratelets	B	11-12/11/10			15	<1	64-52	545	< 0.6	NW	17.3
		12-13/11/10	15+5	1			52-42	580	0.9 (13/11)	WNW	16.8
Ratier SE	B	12 et 20/11/10			3+2	2 + 2	52 à 36	660	< 0.9 et < 0.5	NNW-W	16.8 (12/11)
		16 et 23/11/10	2+3	3 + 2			39-84	668 - 522	2.4(16-17/11)	W et NW	10.3(17/11)
Ratelets	C	16-19/12/10	5.5	3			44 à 63	800	< 0.9	SW à NW	15.9 (16/12)
		19-24			5	4	63 à 90	800 à 1200	2.5 (24/12)	SSW-NW-NNE	15.3 (24/12)
		23-25/12/10	2 à 4	3	2 à 4	3	90 à 88	1200 à 1300	2.5 (24/12)	NE	15.3 (24/12)
Ratier SE	C	18/12/10			2	<1	53	800	< 1.1	SW	10.5
Ratelets	D	7-18/01/11	5	2 + 9			83 à 72	1100 à 1550	1.2 (17-18/12)	SSW à NNW	18.3 (08-10/01)
		18/01/11			2.5	<1	68	1400	< 1.2	NNW	13.1 (17/01)
		21-26/01/11	4.5	5			101(105) 70	1280 à 880	1.8 (21/01)	ENE à NNW	4 à 11
Ratier SE	D	08-12 et 15/01/11			1.5 à 2	1	78, 46, 35	1300, 1440, 1550	< 0.4	W à SW et SW	18.3 (08/12) 15.4 (11/01)
Ratelets	E	19-21/02/11	5	2.5			111 à 115	450	1.0 (19/02)	NW (19 et 20) SSE (le 21)	10.3 (19/02)
		23-25/02/11			3.5	3	89 à 45	510	< 0.5	SW	10.1 (23/02)
		26/02-04/03	4	1	4 (+3)	1	40 à 83	510	< 0.6 jsq .03/03 < 0.4 (03-04/03)	WNW (26-27) NE (204/03)	12.4 (26/02) 11-12 (01-02/03)
Ratier SE	E	25/02 - 04/03	3	1	3	2.5	45 à 83	510	< 0.6 jsq.03/03 < 0.4 (03-04/03)	SSW (25) NW(26 27) NE (? 04/03)	11-12 (01-02/03) 12 (03/03)
Ratelets	F	20/03/11	4	<1			117	350	< 0.4	SW	< 4.5
		20-22/03/11	2	1.5			117(118)114	350	< 0.4	W (20-21)NE(22)	< 8
		22-27/03/11			2.5	4	114 à 38	350	< 1.4 (25/03) < 0.3 (26-27/03)	NE (22-23) W (25 26) E (27/03)	< 8
		02/04 - 11/05									
Ratier SE	F	20/03/11	1.5	1			117	350	< 0.4	SW	< 4.5
		21/03 - 02/04	0		0		118(37) 79	370	< 1.4 (23-25/03) < 0.3	N(21) E(22-24) W(25-26)E(27-28) SW(29/03-02/04)	<10 (31/03)

Tableau B-2 : Analyse de divers événements relevés dans les enregistrements ALTUS (Stations Ratelets et Ratier) sur la période 08/09/2010 – 11/05/2011. Relations avec les forçages.

L'action des vagues produit des érosions souvent importantes, pouvant atteindre 15 cm en un jour. Ainsi aux *Ratelets*, les événements **A** (loupe **A** en figure B-24) avec l'érosion très marquée débutant le 24/09/10, **B** (loupe **B** en figure B-25.a) avec érosion des 12-13/11/10 d'un dépôt qui avait été constitué rapidement suite à une forte agitation les 2 jours précédents, illustrent ces situations.

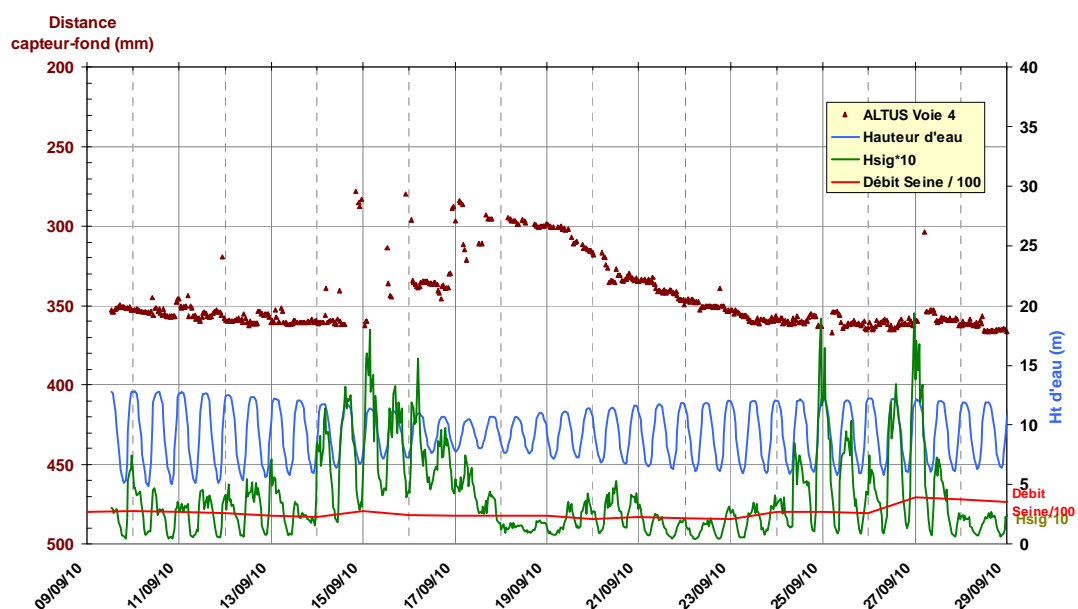
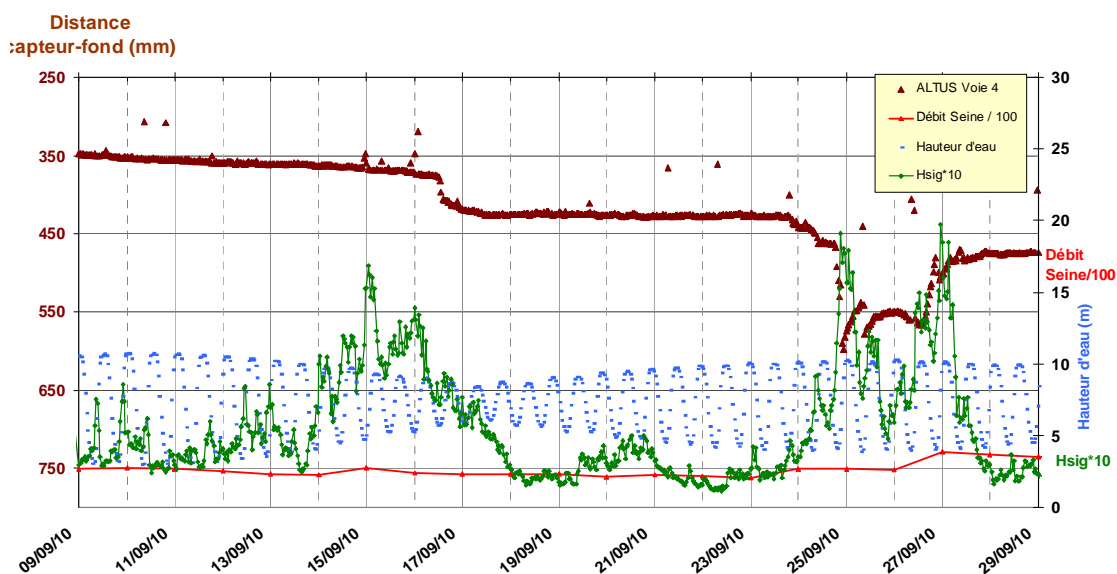
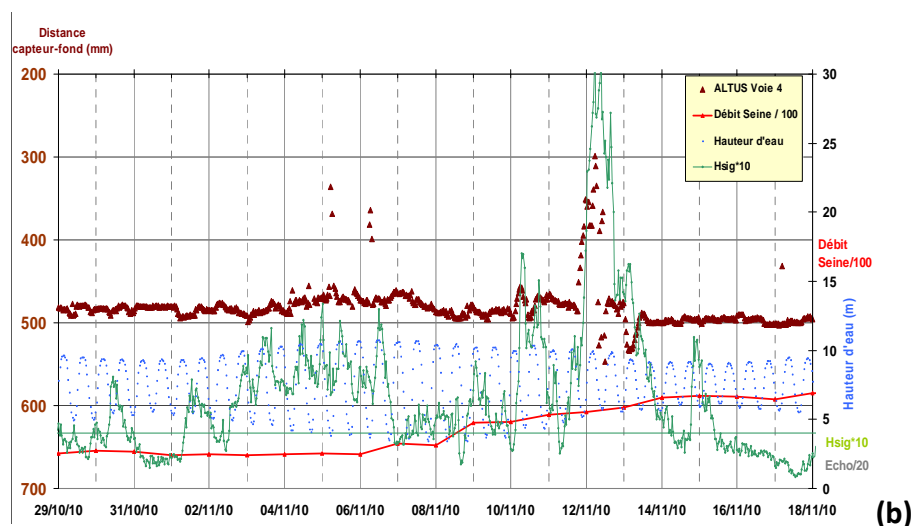
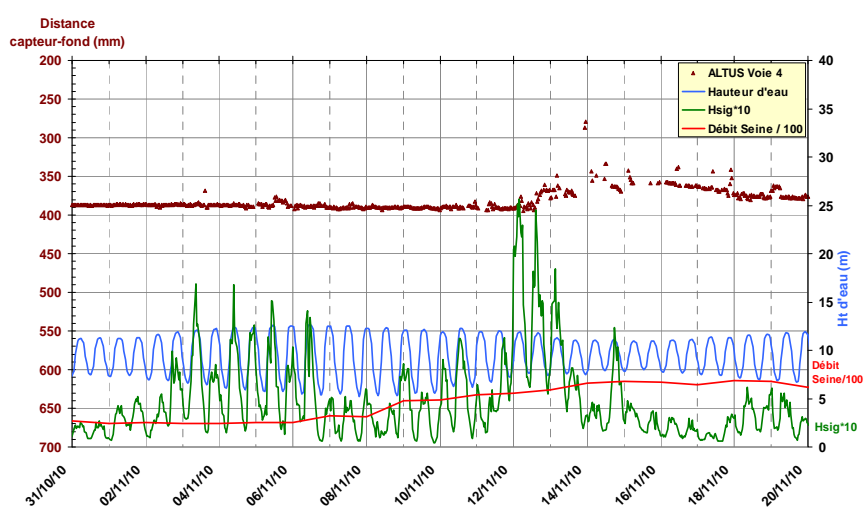


Figure B-24 : **Loupe A** - Enregistrements ALTUS. En haut « Les Ratelets », en bas « Le Ratier » - (voir figure B-22 pour le positionnement de l'événement)- Action des vagues (Hsig : 1.4 -2.0 m). En marron : altimétrie ; en vert : Hsig*10 ; en bleu : hauteur d'eau ; en rouge : débit de la Seine ($Q_{fl}/10^2$)

(a)



(b)



(c)

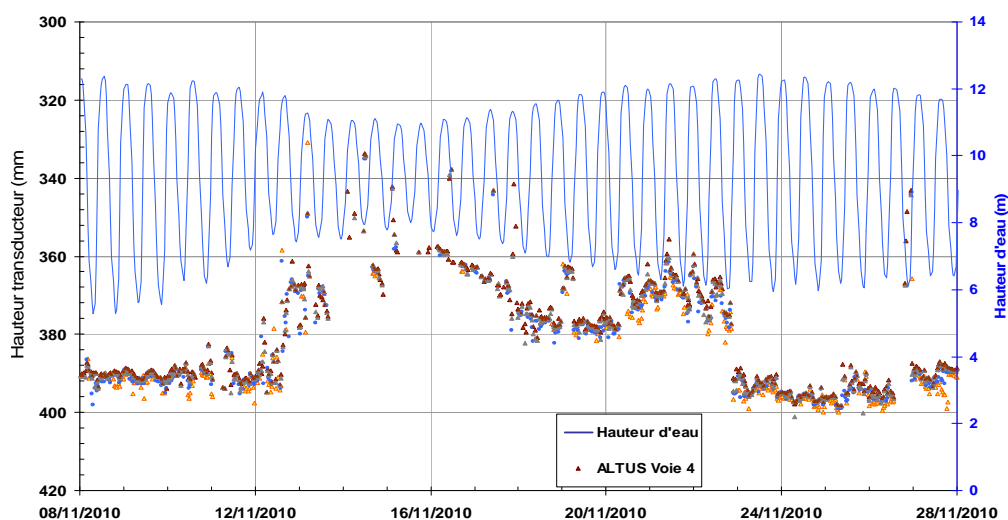


Figure B-25 : **Loupe B** - Enregistrements ALTUS. (a) : « Les Ratelets », (b et c) : « Le Ratier » - Action des vagues de Hsig : 3.2 m le 12/11/2010 - (c) est un agrandissement de (b) pour la période du 08 au 28/11/2010 – Les points orange, bleu et gris correspondent respectivement aux voies 1 à 3 de l'ALTUS signifiant un dépôt type « crème de vase ». Du 13 au 15/11, la turbidité au voisinage du fond est très élevée, entraînant la perte du « signal fond ».

Ce sont principalement les vents de secteurs nord-ouest à ouest qui sont responsables des plus importantes érosions aux *Ratelets*. Cependant, des vents de mêmes secteurs et de vitesses similaires engendrant des vagues de Hsig de 1.70 m peuvent avoir un effet érosif plus limité ; ainsi en A (figures B-16, B-17 et B-22), lors de la période d'agitation du 14 au 17/09/10 l'érosion n'est que de 6 cm. Ils peuvent également générer des dépôts temporaires comme le 26/09/10 après transit près du fond de sables fins et dépôt de 9 cm.

L'implication de ces mêmes types de vents au *Ratier SE* peut avoir une réponse sédimentaire soit négligeable en terme d'érosion, comme pour l'agitation du 24 au 27/09/10 (loupe A/bas de la figure B-24) ou provoquer un dépôt de « crème de vase » de 7 cm, du 15 au 18/09/10 (même figure). Ce dépôt va ensuite se consolider (tassement) en l'absence d'agitation et disparaître par l'action des marées de Vives-Eaux consécutives.

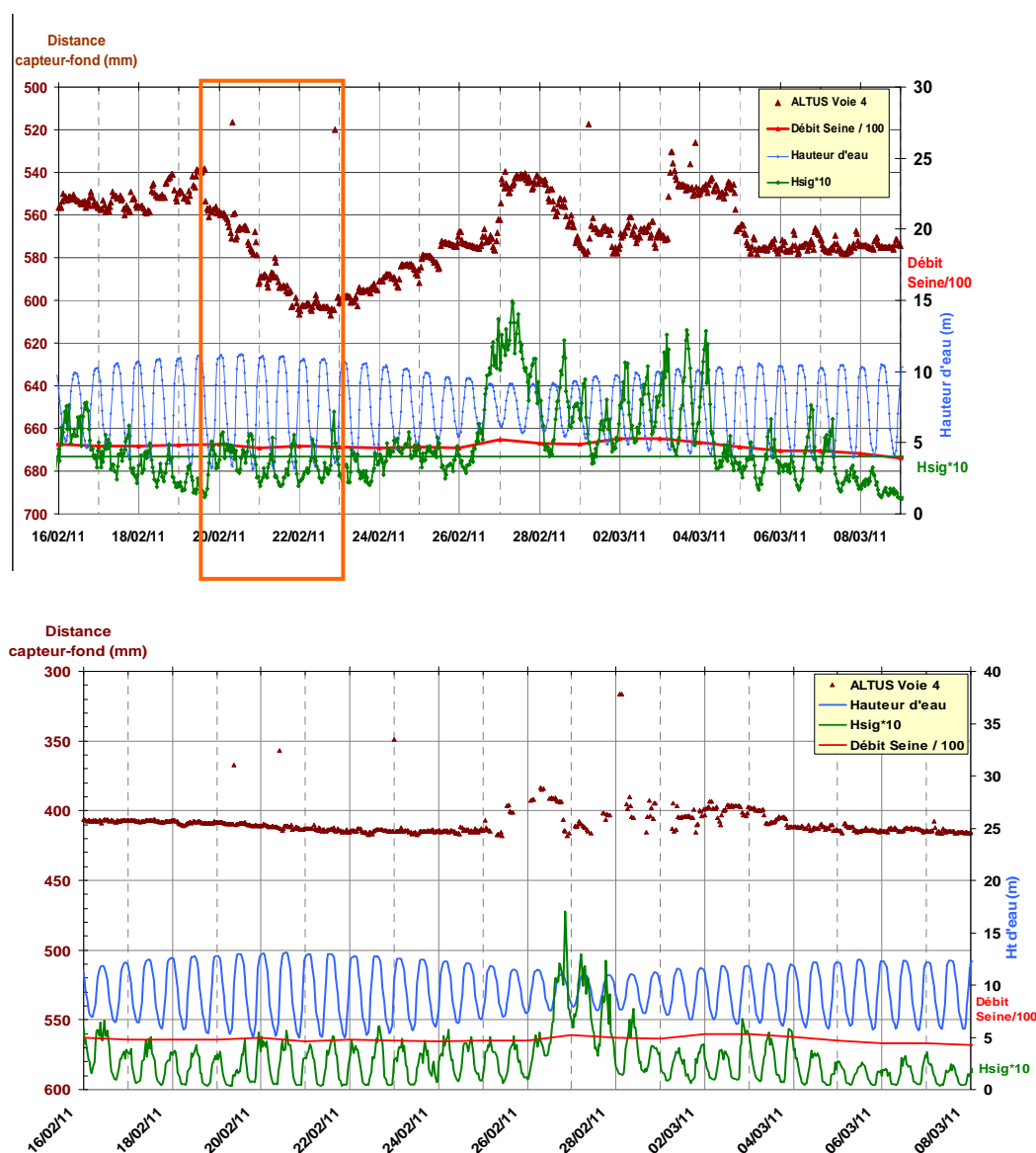


Figure B-26 : **Loupe E** - Enregistrements ALTUS. En haut « Les Ratelets », en bas « Le Ratier » - (voir figure B-22 pour le positionnement de l'événement) - Action de la marée : Coeff. : 115 le 21/02/2011. Avec érosion de 5 cm aux Ratelets, sans effet au Ratier. A noter l'action des vagues (Hsig = 1.5 m) aux Ratelets apportant un dépôt temporaire de sédiments principalement sableux et l'érosion concomitante au Ratier les 27/02 et 03/03/2011.

Il en est de même pour les deux événements **C** et **D** (figure B-22), avec des érosions de 5 cm (du 16 au 19/12/10 et du 07 au 18/01/11) aux *Ratelets* et un dépôt de « crème de vase » au *Ratier* de 2 cm aux deux mêmes périodes. Lors de l'événement **D**, la Seine est à son pic de crue maximum par rapport à toute la période des enregistrements ALTUS de 2008 à 2011, soit $1550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il n'a pas été constaté, au niveau des variations altimétriques des 2 stations ALTUS, d'incidence particulière liée à cette crue, même en considérant les quelques semaines qui ont suivi.

Aux *Ratelets*, (figure B-26, loupe **E**) les vents de secteur WNW ($12.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ont également provoqué 2 dépôts temporaires entre le 26/02/11 et le 04/03/11 d'un sédiment principalement sableux (voie 4 de l'ALTUS avec réflecteur sans discontinuité et pourcentage d'écho maximum non perturbé) d'une épaisseur de 3 cm. A la même période, au *Ratier*, il est constaté un dépôt type « crème de vase » (voie 4 de l'ALTUS montrant des discontinuités avec perte totale de l'écho maximum) de 3 cm pouvant être le résultat d'une redistribution en Fosse Sud du matériel fin par les vagues.

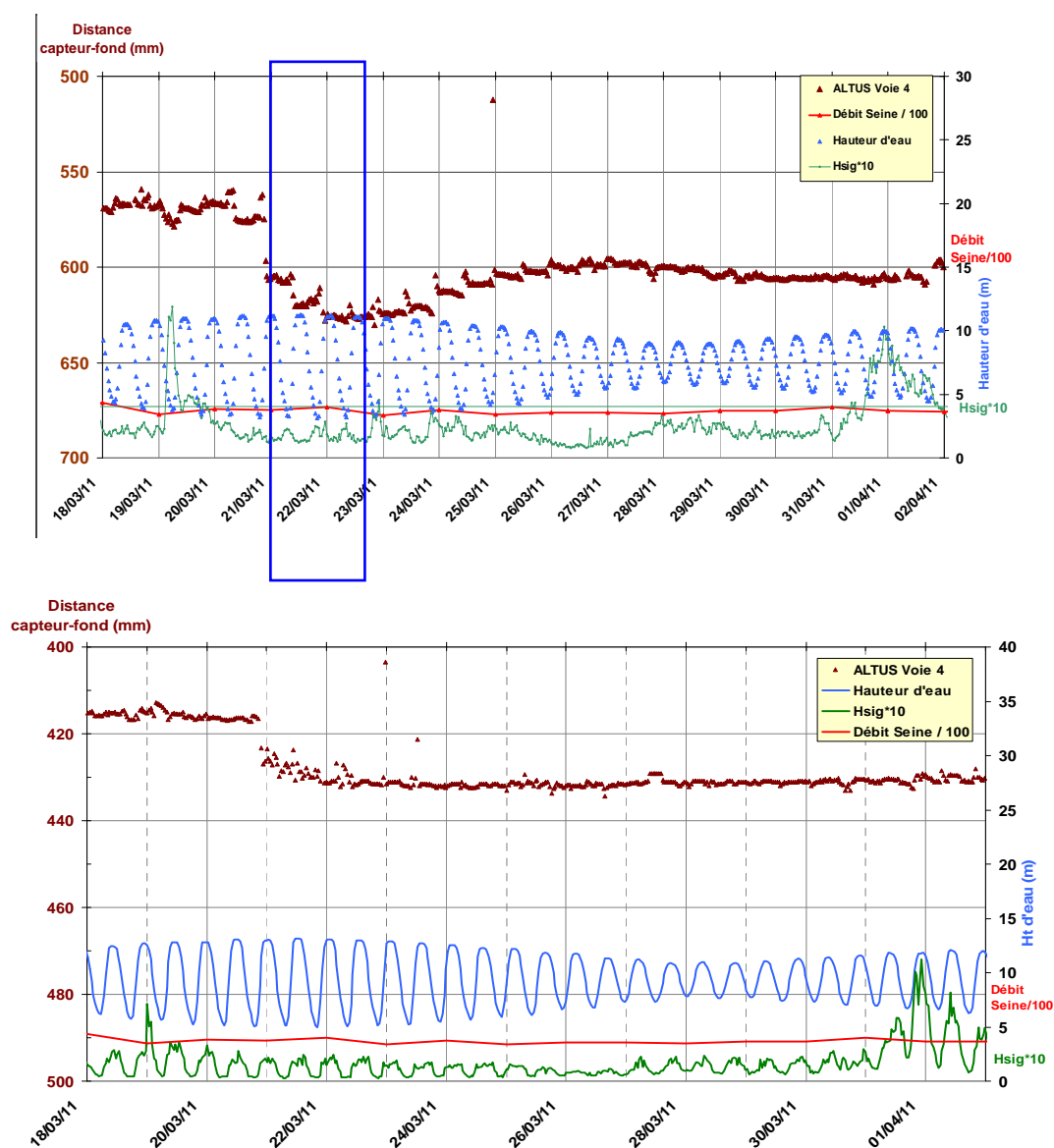


Figure B-27 : **Loupe F** - Enregistrements ALTUS. En haut « Les Ratelets », en bas « Le Ratier » - (voir figure B-22 pour le positionnement de l'événement). Action de la marée - Coefficient de marée max. : 118 le 21/03/2011). Erosion de 6 cm aux Ratelets et 1.5 cm au Ratier.

L'action des très fortes marées de Vives-Eaux sur la redistribution des sédiments est également bien mise en évidence dans ce jeu de données. Toujours sur la loupe **E** de la figure B-26, lors des coefficients de 111 à 115 (voir encadré orange) et en présence de vagues très modérées, une érosion de 5 cm est visible sur l'enregistrement altimétrique aux *Ratelets*. Aucune incidence de cette action n'est enregistrée au *Ratier* (bas de la même figure B-26).

Un autre exemple de l'action de la marée peut être donné par la séquence des 20 et 21/03/11 (loupe **F** de la figure B-27) aux *Ratelets*. Pour des coefficients 117-118, par des vents de SW inférieurs à 4.5 m.s⁻¹ et une très faible agitation ($H_{sig} < 0.40$ m), une érosion de 4 cm est provoquée, semble-t-il par les courants de flot (encadré bleu). Une érosion de 1.5 cm est également constatée au *Ratier*.

Enfin, il est à noter que les données en fin d'enregistrements altimétriques aux *Ratelets* et *Ratier* (événement **G** sur les figures B-22 et B-23), du 02/04/2011 au 11/05/2011, ne sont pas valables pour cause de fouling (fixation de balanes en plusieurs couches sur les 2 transducteurs).

Conclusions sur l'ensemble des variations altimétriques observées aux 4 stations : Ratelets, Triangle des épaves, Fosse Nord et Ratier, de 2008 à 2011 :

Parmi les 4 sites instrumentés dans cette zone d'embouchure de la Seine, le site plus externe des *Ratelets*, considéré comme représentatif d'un large secteur, constitue le site le plus dynamique du point de vue des variations altimétriques. Les vents de secteurs sud-ouest à nord-ouest sont responsables des plus importantes variations altimétriques du niveau de sédiment. L'action des vagues peut entraîner des érosions d'une trentaine de centimètres sur ce site des *Ratelets*. Cette action érosive est renforcée lors d'épisodes successifs de tempêtes avec vagues de 2 à 3 m ; une liquéfaction du sédiment lors des premiers épisodes facilitant une érosion en masse des couches superficielles lors des tempêtes suivantes. Il est souvent constaté qu'après une phase érosive, suit un rechargement progressif, plus lent, de quelques jours à une dizaine de jours.

Lors d'épisodes d'agitations marqués par des vagues de hauteur significative de 2 - 3 m, il est fréquent de noter des plaquages temporaires de quelques centimètres de sédiments principalement sableux. Ces dépôts, particulièrement bien identifiés dans les enregistrements semblent provenir de transits « en masse », près du fond, d'une couverture sédimentaire déstabilisée par l'action des vagues.

Globalement ce site s'est présenté comme étant « en équilibre » sur la 1^{ère} période de 5 mois (Oct. 2008 à fin Fév. 2009) ; cependant, sur la 2^{ème} période de 7 mois (Sept. 2011 à Avril 2011), une érosion résiduelle de 23 cm est quantifiée.

Le site du *Triangle des épaves* montre des variations altimétriques du niveau de sédiment beaucoup plus faibles. Toutefois les problèmes encourus à la station de mesures ne permettent pas une analyse fiable sur la totalité des enregistrements.

A l'embouchure de l'estuaire, il a ainsi été montré le rôle dominant des vagues pour les mouvements sédimentaires. Toutefois, les enregistrements altimétriques ont mis en évidence un rôle non négligeable, de la marée pour éroder la couverture sédimentaire ; ceci dans le cas des très fortes marées de Vives-Eaux, comme il a été relevé. Cependant la marée ne constitue pas le forçage le plus important en terme de matériel érodé.

En *Fosse Nord*, le site instrumenté a permis de quantifier un engraissement résiduel de 16 cm sur 9 mois ; phénomène accentué lors des périodes marquées sans agitation (par exemple : mi-décembre 2008 à mi-janvier 2009). Pour ce site, les enregistrements de pression ont permis également une mise en évidence de l'amortissement des vagues de 50% par rapport aux stations externes.

Le site du ***Ratier Sud Est*** enregistre une érosion résiduelle de 10 cm sur les 7 mois de mesures. Les variations du niveau de sédiment, suite à des épisodes de vagues, sont beaucoup plus atténuées que pour la station des *Ratelets*. Cependant des épisodes érosifs sont présents sur ce secteur par vents d'ouest comme par vents de sud-est. Ce site présente une couverture sédimentaire originale. En effet, il est caractérisé par un faciès de vases (grises) très compactes recouvertes par des dépôts principalement vaseux facilement remobilisables. Il a été montré que lors de certaines périodes érosives aux Ratelets par tempêtes d'ouest, un dépôt parfois prononcé (2 à 5 cm) d'un matériel fin pouvait avoir lieu au *Ratier*.

Enfin, il n'a pas été relevé de variations notables du niveau de sédiment lors des périodes de débits élevés de la Seine (même à la suite des débits de $1300 \text{ à } 1550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ durant la 1^{ère} quinzaine de Janvier 2011).

V. Analyse des résultats de la campagne d'érodimétrie d'avril 2010, rôle de la faune benthique

31 tests ont été étudiés sur les 22 carottages réalisés et à différents niveaux. Les tests de surface ont été systématiques, et pour certaines carottes des tests érodimétriques ont été faits à 4 et/ou à 8 cm sous la surface du sédiment. Les comptages de macrofaune benthique ont été réalisés pour 17 d'entre eux, après tamisage (maille de 1 mm).

Le tableau B-3 présente l'ensemble des résultats bruts :

- N° station et correspondance dans les autres campagnes de prélèvements Colmatage
- Teneur en eau, bulk density et concentration sèche (dry density)
- Faciès sédimentaire, fractions d'argile, de silts et de vase (issues d'une analyse microgranulométrique)
- Concentration relative de vase, calculée comme la masse de vase rapportée au volume de sédiment non occupé par les sables
- Teneur en matière organique (% en masse)
- Contrainte critique de remaniement du sédiment, issu de la mesure érodimétrique
- Abondances d'organismes benthiques.

La concentration relative de vase est considérée comme le paramètre pertinent représentant l'état de « consolidation » d'un sédiment mixte sable/vase, considérant que le sable n'intervient pas dans la matrice cohésive du sédiment (Le Hir et al., 2011) ; cette concentration relative C_{relva} est déduite de la concentration sèche C et de la fraction de vase ($frVa$) par l'expression :

$$C_{relva} = C \cdot frVa / (1 - (1 - frVa)C/\rho_s)$$

Où ρ_s est la masse volumique des grains, supposée identique pour les sables et la vase.

Les abondances des différentes espèces benthiques sont exprimées en nombre par surface testée à l'érodimètre. Cette dernière est un disque de 9 cm de diamètre, soit une surface de 0.00636 m². Ces quantités sont donc à multiplier par 157 pour obtenir des densités par m², ou encore par 63 pour obtenir un nombre d'individus par 0.4 m², comme cela a été rapporté pour les campagnes Benthos. Cette opération révèle aussi l'incertitude élevée de ces comptages, les surfaces échantillonnées étant réduites (correspondant à celles soumises à érodimétrie). Le tamisage ayant été réalisé sur le sédiment restant dans l'érodimètre, la numération correspond au contenu des 2 cm superficiels, avec l'éventualité que certain(s) des « petits » organismes ait été emporté au cours du test d'érodimétrie.

																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

Tableau B-3 : caractéristiques des échantillons testés par érodimétrie (campagne COLMATAGE 2010)

La figure B-28 ci-dessous montre que la plupart des échantillons testés étaient des vases sableux, même si pour certains d'entre eux il s'agissait de sables plus ou moins envasés. L'échantillonnage correspond à la gamme de faciès ciblée, considérant que pour des sables purs ou des graviers, les conditions de remaniement sont assez bien connues et indépendantes des organismes présents.

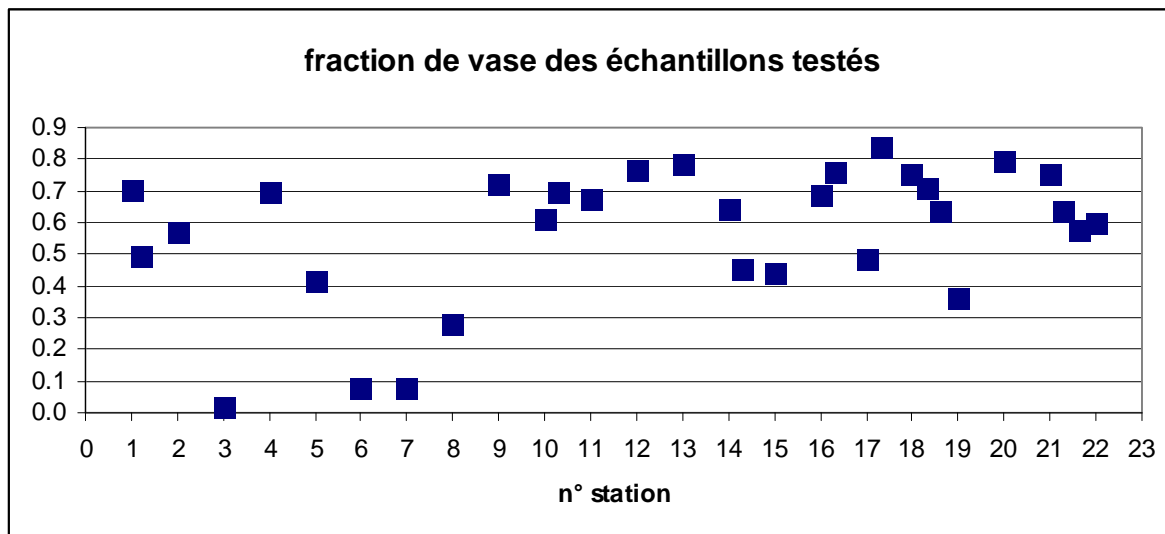


Figure B-28 : Fraction de vase des échantillons testés.

Le rapport silt/argile a aussi été considéré pour les échantillons de la campagne COLMATAGE, et remplacé par rapport aux échantillons ayant fait l'objet de tests analogues (Cann, 2010) : on observe que ce rapport est d'environ 3.5 (fig. B-29), ce qui situe les échantillons COLMATAGE 2010 dans la moyenne de nos observations (autrement dit, le rapport argile/vase est d'environ 22 %, et relativement homogène dans l'embouchure de la Seine.

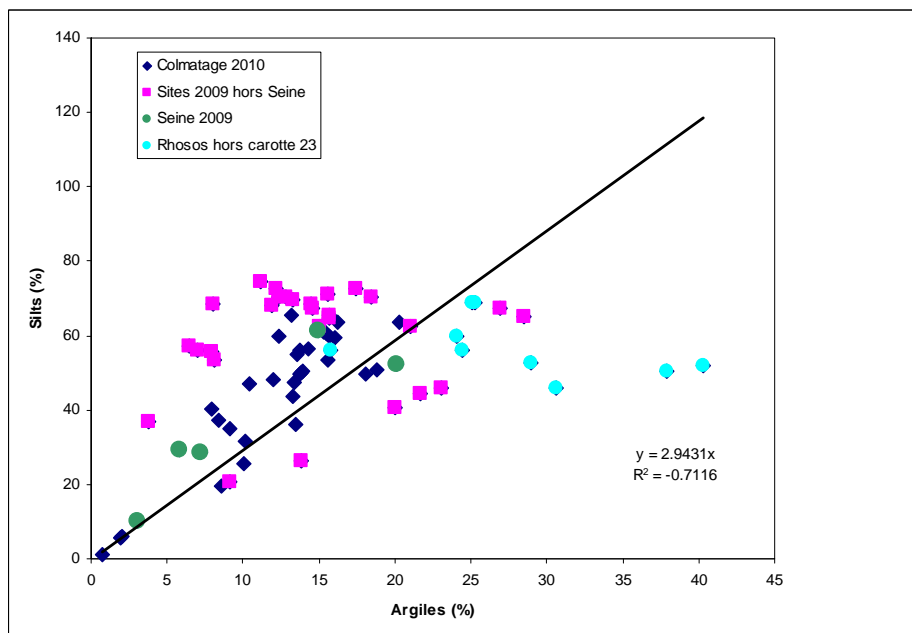


Figure B-29 : Rapports silts/argiles pour un certain nombre d'échantillons de vases et vases sableux dans les eaux côtières de France métropolitaine.

Les concentrations sèches de nos échantillons (fig. B-30) sont assez élevées, compte tenu de la présence de sables, lorsqu'on les compare à la gamme de concentrations obtenues :

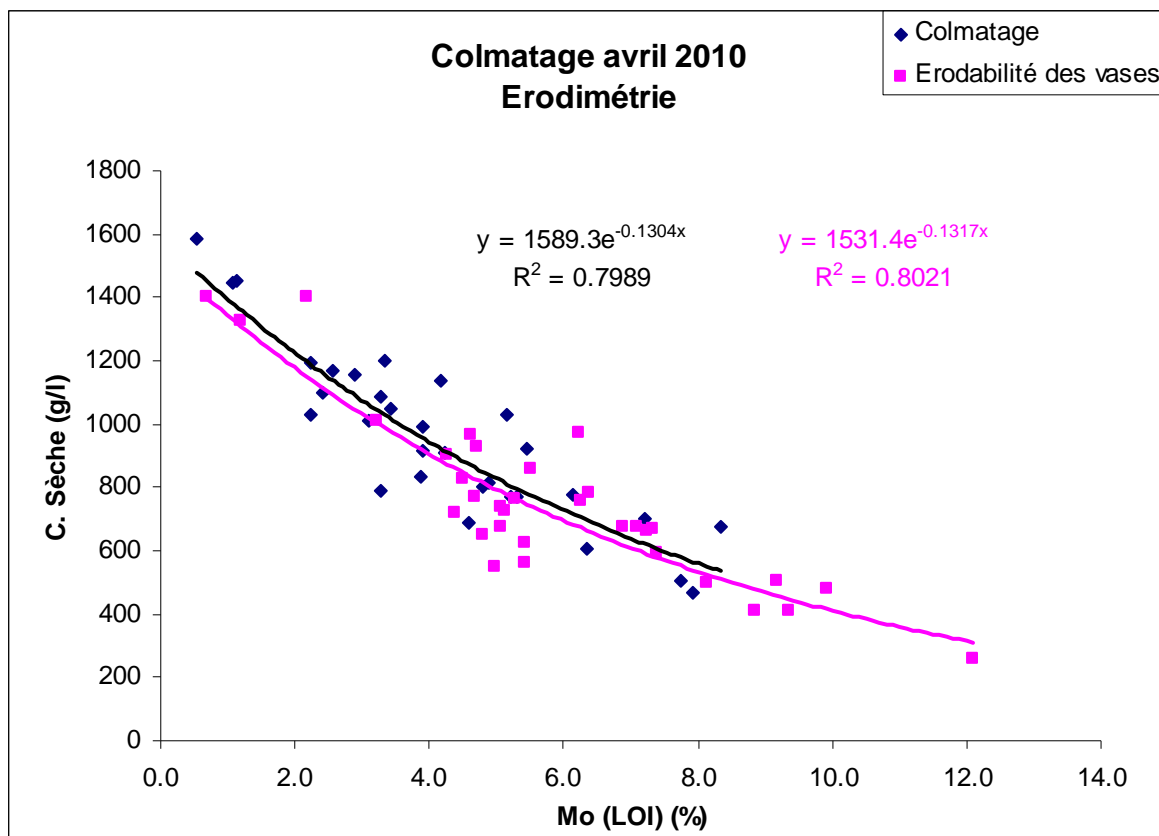


Figure B-30 : Relation entre concentration sèche (g/l) et teneur en matière organique (par perte au feu).

Les teneurs en matière organique (MO) sont assez dispersées, ce qui est normal puisque la fraction sableuse est a priori moins organique. Cependant la figure B-31 montre que pour des valeurs élevées de la fraction de vase, la teneur en matière organique est très variable, entre 3 et 8 %. En raison d'une probable dépendance de l'érodabilité des sédiments en fonction de leur teneur en matière organique (Cann, 2010), il serait intéressant de poursuivre la caractérisation (et la cartographie) de la teneur en matière organique des fractions vaseuses en baie de Seine orientale.

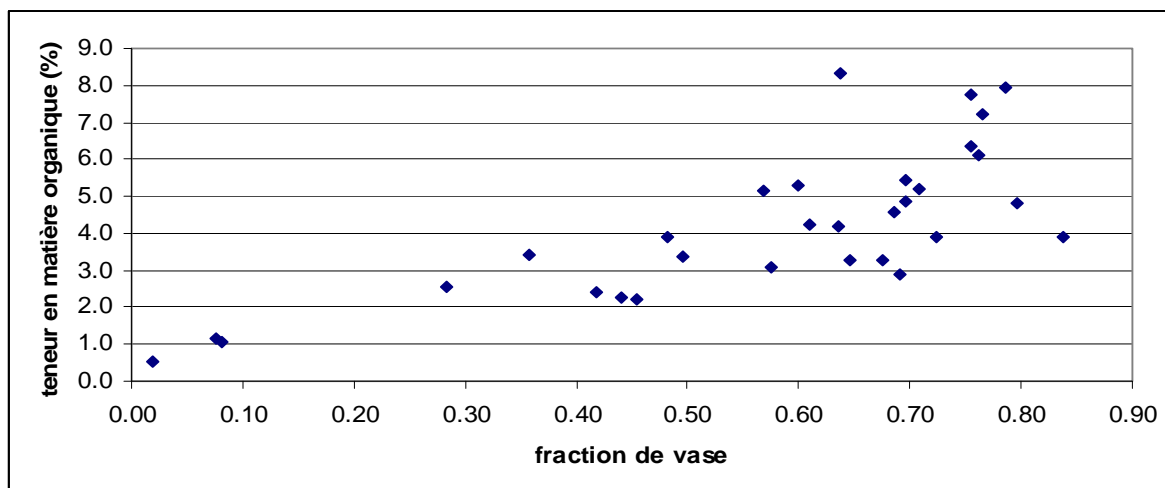


Figure B-31 : Teneur en matière organique (par perte au feu) en fonction de la fraction de vase, pour les échantillons de la campagne d'érodimétrie COLMATAGE 2010.

Il est classique de relier l'érodabilité des vases en fonction de la concentration sèche (e.g. Migniot, 1968). La figure B-32 montre que cette relation est peu respectée pour les sédiments de la campagne COLMATAGE, même en écartant les échantillons sableux.

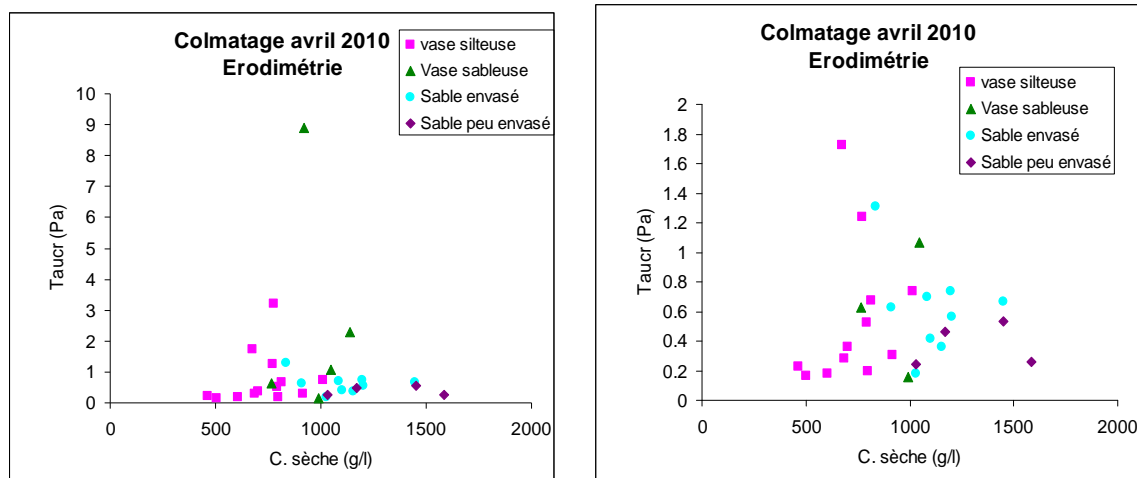


Figure B-32 : Campagne COLMATAGE 2010 en baie de Seine orientale. Représentation de la contrainte critique d'érosion en fonction de la concentration sèche (à droite : zoom de la figure de gauche).

Par contre, l'érodabilité des sédiments semble corrélée à la teneur en matière organique (Fig. B-33). Reprenant le raisonnement suivi par Cann (2010) sur la double dépendance de l'érodabilité en fonction de la concentration sèche (élevée à la puissance 6, comme suggéré par Migniot, 1968 et 1989) et de la teneur en matière organique, une formulation de la contrainte critique en fonction de ces 2 paramètres peut être proposée :

$$\tau_{cr} = 0.03 \cdot C_{relva}^6 \cdot MO^{2.635}$$

Il est remarquable, et étonnant, de constater que la relation semble raisonnablement correcte, tant pour les échantillons vaseux que ceux à dominante sableuse.

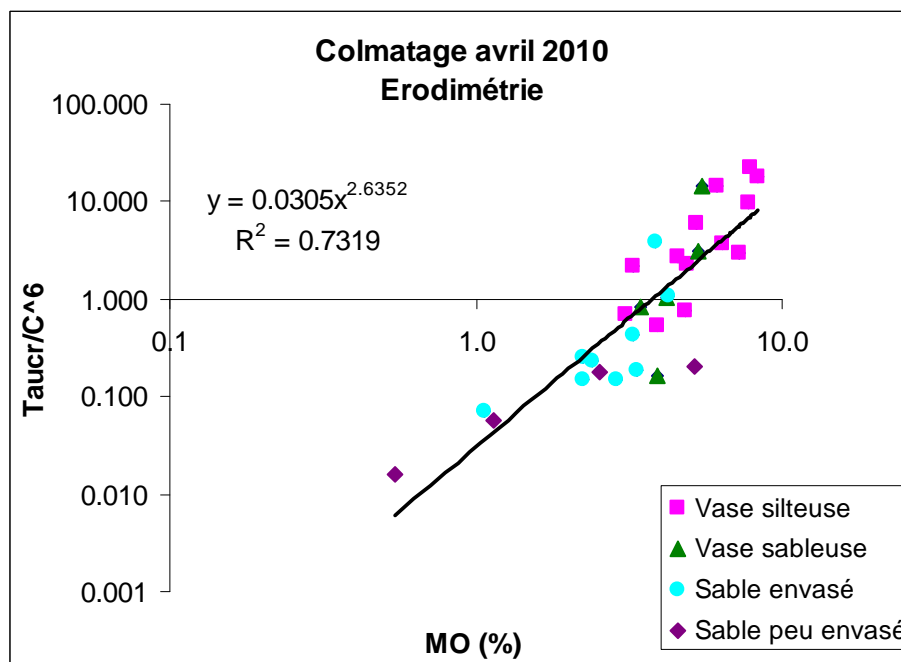


Figure B-33 : Relation entre la contrainte d'érosion critique rapportée à la puissance 6 de la concentration et la teneur en matière organique.

Les résultats obtenus en baie de Seine orientale ont été resitués par rapport à ceux obtenus en d'autres sites de la façade métropolitaine (Fig. B-34). Les mesures devant la Seine prolongent de façon satisfaisante vers les valeurs faibles les résultats obtenus auparavant sur ces autres sites. Il semblerait donc que la résistance au cisaillement plutôt faible des vases de Seine serait due à leur faible teneur en matière organique.

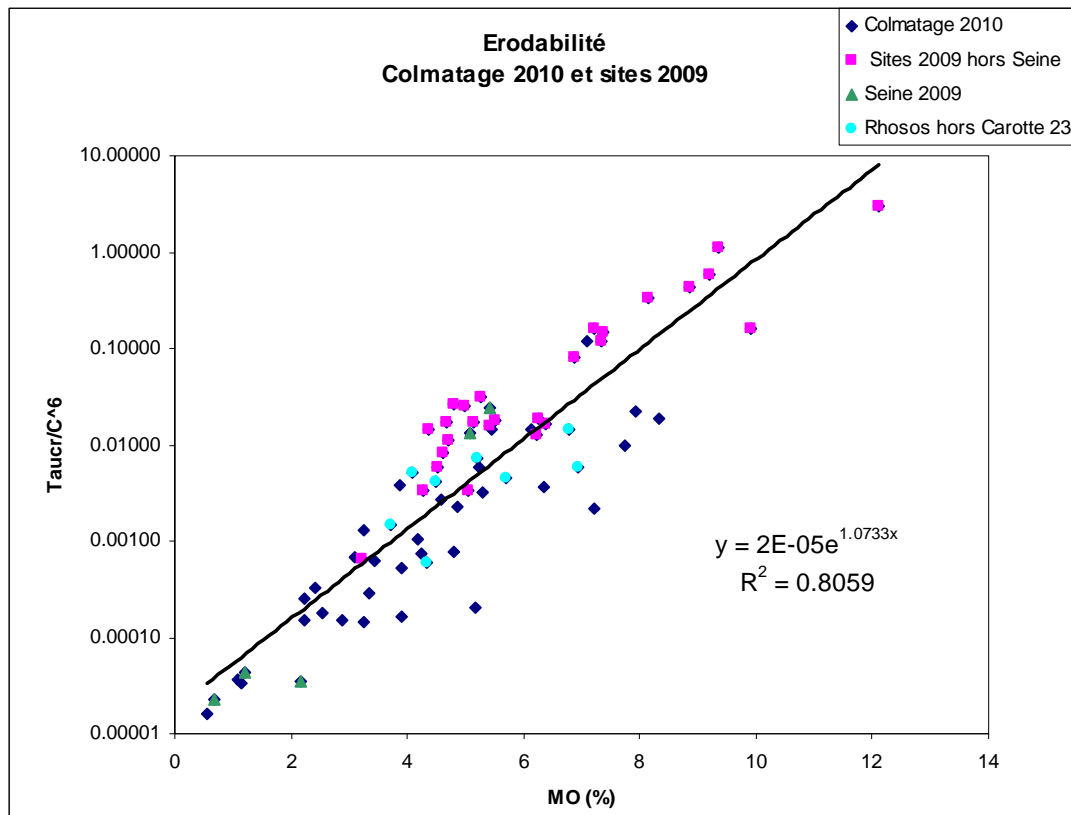


Figure B-34 : Relation entre la contrainte d'érosion critique, rapportée à la puissance 6, de la concentration et de la teneur en matière organique, pour un ensemble d'échantillons des eaux côtières de France métropolitaine.

Enfin, pour tenter de mieux représenter la faible part des fractions sableuses dans la caractérisation de l'érodabilité des vases, une relation faisant intervenir la concentration relative de vase plutôt que la concentration sèche totale a été recherchée. Elle peut s'écrire :

$$\tau_{cr} = a \cdot C_{relva}^6 \cdot \exp(0.57 \text{ MO/frVA})$$

avec :
frVA : fraction de vase,
Crelva : concentration relative de vase
a : une constante de régression, évaluée à $1.85 \cdot 10^{-19}$

C'est ce que représente la figure B-35. Le résultat peut paraître séduisant, mais il faut en relativiser la portée, car le coefficient de régression assez élevé résulte de la dynamique d'échelle de l'expression τ_{cr} / C_{relva}^6

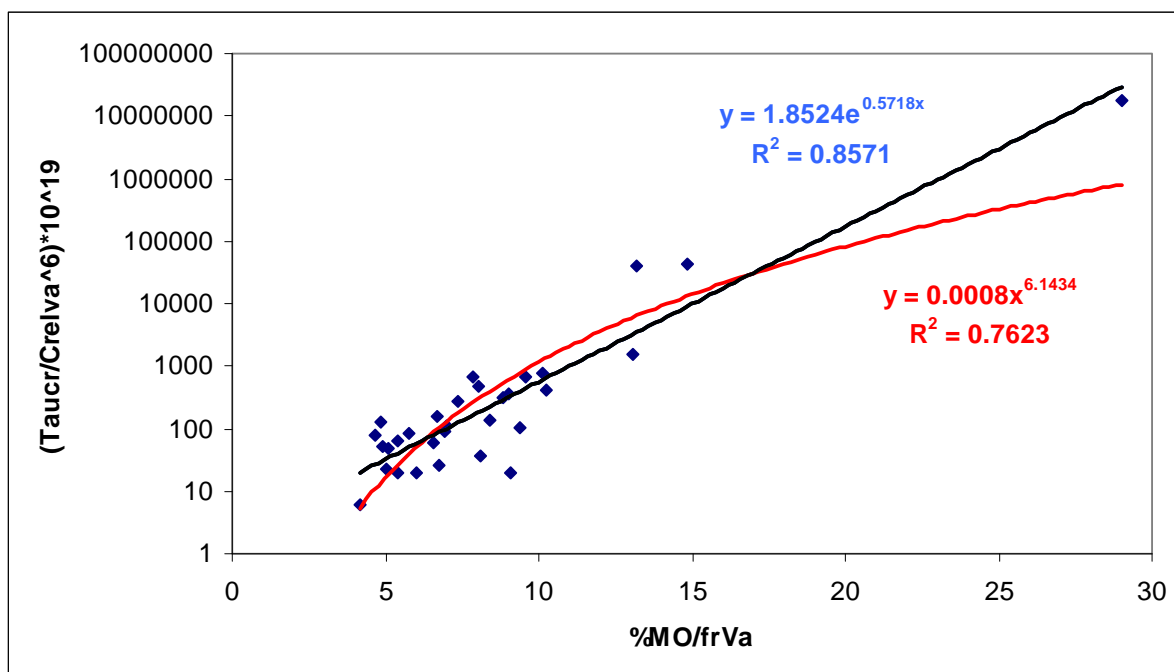


Figure B-35 : Relation entre la contrainte d'érosion critique rapportée à la puissance 6 de la concentration relative de vase et la teneur en matière organique rapportée à la fraction vaseuse, pour les échantillons de sédiments de l'embouchure de la Seine testés dans le cadre de la campagne COLMATAGE 2010.

Contribution des organismes benthiques à l'érodabilité des sédiments de l'embouchure de la Seine.

Les espèces dénombrées dans les échantillons testés à l'érodimètre sont reportées dans le tableau B-3, et présentées en figure B-36 et B-37. Les ordres de grandeur sont entre 5 et 30 individus par échantillon, soit 32 à 1900 ind./0.4 m², pour des strates de sédiment superficiel de 2 cm d'épaisseur. Ces résultats semblent correspondre à des abondances un peu inférieures à celles indiquées dans le chapitre « benthos ». Leur répartition géographique en fonction des stations est donnée par la figure B-36. On relève un maximum de densité sur une « couronne » périphérique des bancs d'embouchure.

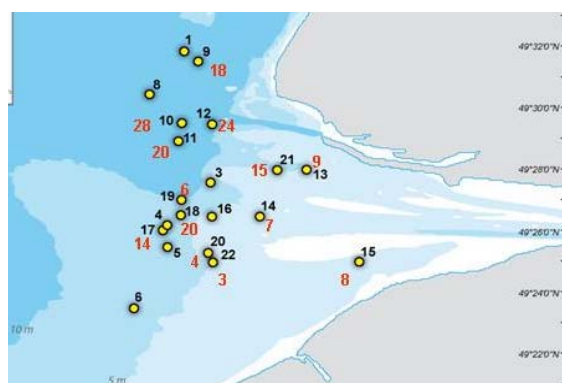


Figure B-36 : Report des comptages de benthos (abondance totale) effectués sur les échantillons de surface sur les stations de carottages.

Les abondances de chaque espèce sont présentées sur la figure B-37, en ordonnant les échantillons par teneur en vase croissante de la gauche vers la droite. On n'observe pas de corrélation entre abondance

totale et teneur en vase. Cela ne semble pas non plus le cas pour les abondances par espèces : ce constat sans doute étonnant s'explique peut-être par une variation modérée de la fraction vaseuse dans les échantillons concernés (pour des raisons pratiques, les stations plus sableuses n'ont pas fait l'objet d'un comptage d'organismes).

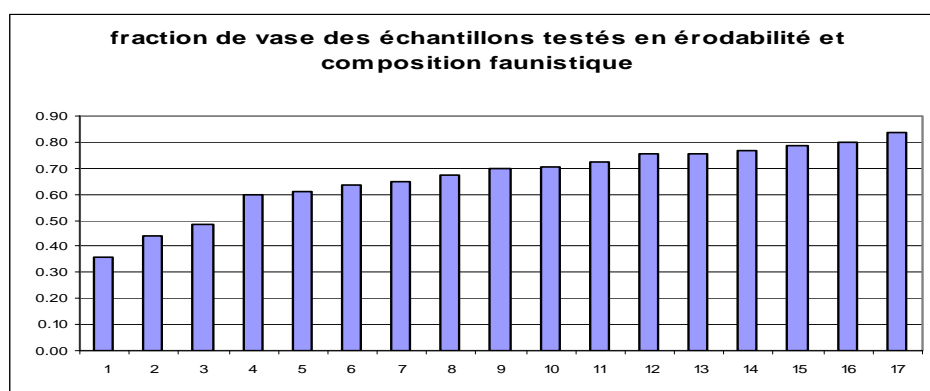
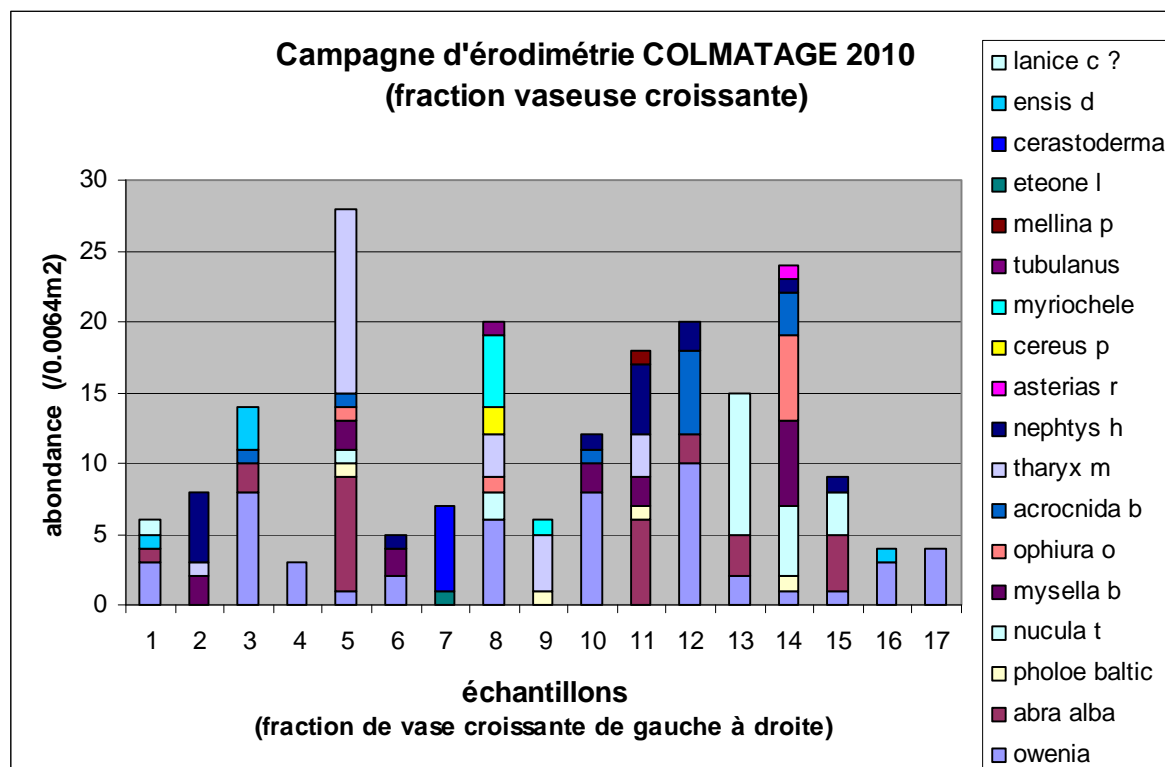


Figure B-36 : Abondance des divers organismes benthiques mis en évidence dans les échantillons de la campagne COLMATAGE soumis aux tests d'érodabilité en canal. *En bas : teneurs en vase des échantillons correspondants (attention ! : ce ne sont pas les N^{os} de stations)*

La figure B-37 montre l'absence de corrélation évidente entre la présence d'organismes benthiques et la contrainte critique d'érosion. Cette observation faite sur les abondances totales est encore plus vraie si l'on considère l'espèce ingénieur *owenia fusiformis*.

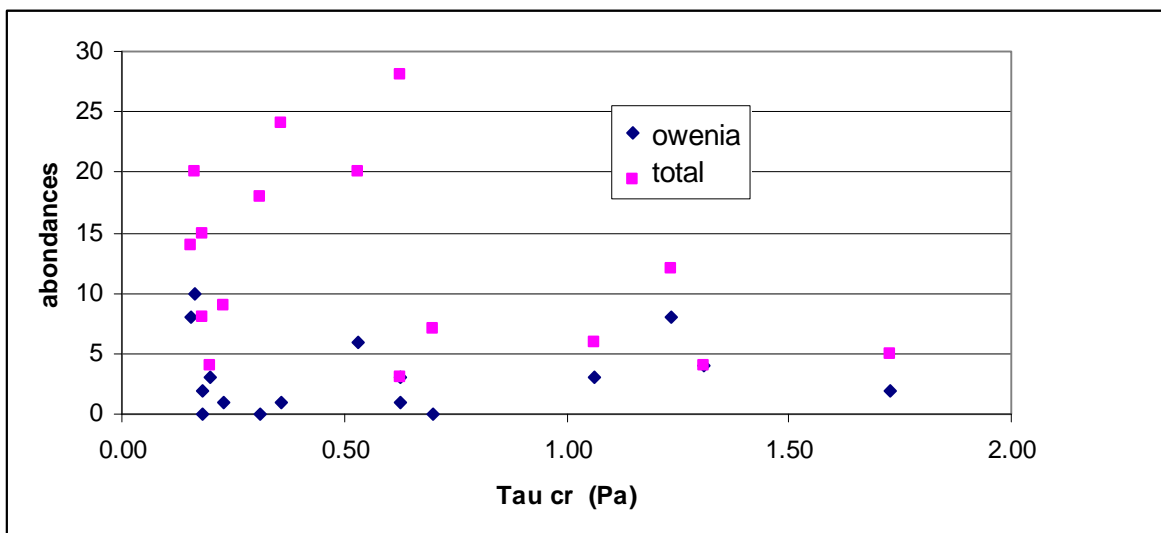


Figure B-37 : Correspondances entre abondance totale ou relative à l'espèce *owenia fusiformis* et la contrainte critique d'érosion.

Toutes les recherches de relations entre comportement physique et comptage de benthos ont été vaines, sur la base des échantillons analysés (soit seulement 17 au total). Ainsi la figure B-38 présente les abondances totales ou celles relatives à l'espèce *owenia fusiformis* positionnées sur le diagramme de la figure B-35 montrant une relation entre le ratio τ_{cr} / C_{relva}^6 et la teneur en matière organique rapportée à la fraction de vase. L'examen des comptages d'organismes n'apporte pas d'éclairage sur l'écart à une apparente corrélation entre ces deux paramètres.

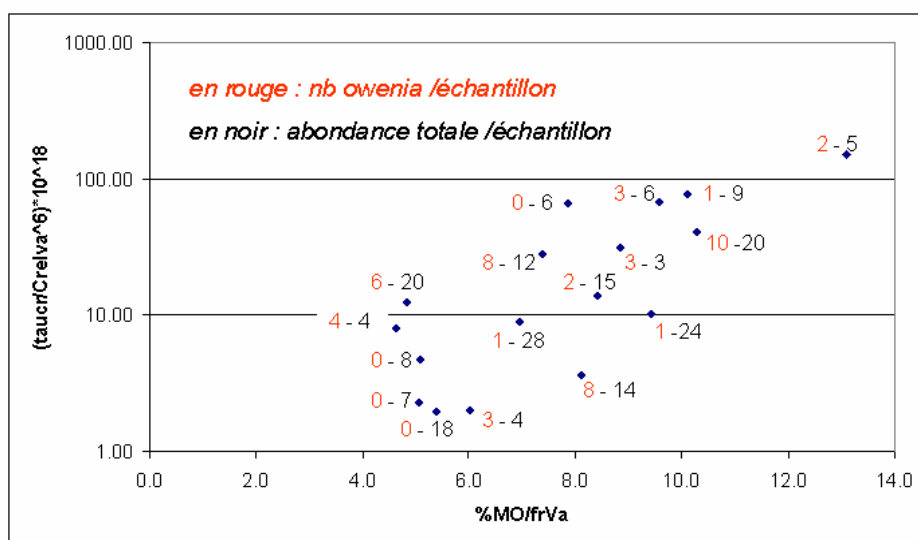


Figure B-38 : Abondances totales et comptages d'*owenia fusiformis* rapportés sur le diagramme de la figure B-35.

Il est sans doute prématuré de conclure par l'absence d'effet des organismes sur l'érodabilité des sédiments. Le nombre d'échantillons reste trop faible pour valider ce constat. Cependant la grande hétérogénéité des habitats de l'embouchure de la Seine, et leur variabilité annuelle ou saisonnière, voire événementielle, n'incite guère à préconiser de réitérer l'exercice en ciblant l'ensemble des faciès sablo-vaseux ; Il se trouve que les contraintes critiques qui résultent des tests érodométriques ne varient pas dans une gamme très large, et restent modérées devant les contraintes exercées par les courants de marée de vive eau, et surtout bien inférieures aux contraintes exercées par les vagues de tempête. Ces

sédiments sablo-vaseux sont donc fréquemment remaniés, comme l'attestent les mesures d'érosion/dépôt par Altus, et la campagne d'érodimétrie de COLMATAGE, la première opérationnelle en baie de Seine orientale, vient confirmer ces observations.

Par contre, il nous paraîtrait judicieux de procéder à une campagne spécifique sur les vases très consolidées reliques affleurant dans la partie sud de l'embouchure, qui sont susceptibles d'être remaniées et déstructurées par des organismes bioturbateurs. Ce type de vase ne peut être érodé par un courant de marée, et son remaniement ne peut résulter que d'un processus de liquéfaction par les vagues (Silva Jacinto et Le Hir, 2001) ou d'un processus de bioturbation.

Bibliographie

Bassoullet P., Verney R., Kervella Y., Jestin H., et G. Voineson. (2010)

Utilisation d'un altimètre (ALTUS) destiné à la quantification des dépôt/érosion en domaine littoral pour l'étude des corrélations avec les caractéristiques de vagues et les interfaces de dépôt.

La Houille Blanche. Vol. N° 5, pp. 81-86

Bassoullet P., Le Hir P., Gouleau D. and Robert S. (2000)

Sediment transport over an intertidal mudflat : field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oléron" (France).

Continental Shelf Research, Vol. 20, (12/13), pp. 1635-1653

Cann P. (2010)

Recherche d'une caractérisation de l'érodabilité des vases pures en fonction de leurs spécificités rhéologiques et des critères sédimentologiques. Mémoire de Master, Sciences de la Mer et du Littoral, IUEM, Sept. 2009, 50 p + Annexes.

Jestin H., Bassoullet P., Le Hir P., L'Yavanc J., Degres Y. (1998)

Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments.

Oceans'98, Nice (France). Conference Proceedings, Vol. 1/3, pp. 189-194

Le Hir P., Bassoullet P., Cann P. (2005)

Adaptation du modèle de tassement/érodabilité et expérimentations en laboratoire pour sa validation. Programme Scientifique Seine-Aval 3, Rapport d'activité 2005, Ifremer DYNECO/Physed, 45 p.

Le Hir P., Monbet Y., Orvain F. (2007)

Sediment erodability in sediment transport modelling : can we account for biota effects ?

Continental Shelf Research, Vol. 27, pp. 1116-1142

Le Hir P., Cayocca F., Waeles B. (2011)

Dynamics of sand and mud mixtures : a multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, Vol. 31, S135-S149

Migniot C. (1968)

Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche*. Vol. N° 7, pp. 591-650

Migniot C. (1989)

Tassement et rhéologie des vases, 1^{ère} partie. *La Houille Blanche*, Vol.1, 1989, pp. 11-29

Silva Jacinto R. et **Le Hir P.** (2001)

Response of stratified muddy beds to water waves. In Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes, McAnally & Mehta (eds), Elsevier, proc. in Marine Science No 3, 95-108

Waeles B., (2005).

Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. Thèse. Université de Caen, 225 p.

Valorisation des données

- Communications à colloques internationaux

Laboratory investigation of sediment bed features with an acoustic echosounder (ALTUS).

Verney R., Voinesson G., Jestin H., Bassoullet Ph. and P. Le Hir.

INTERCOH'09, Rio de Janeiro, Brasil, 3-8 May 2009

Rheological and sedimentological characterization of cohesive sediments erodability.

Cann Ph., Silva Jacinto R., Le Hir P. and Ph. Bassoullet.

18th ISC 2010, Mendoza, Argentina, Sept.26 – Oct. 1st 2010

Caractérisation de l'érodabilité de sédiments cohésifs en fonction de paramètres rhéologiques et sédimentologiques.

Cann Ph., Silva Jacinto R., Le Hir P., Bassoullet Ph.

13^{ème} Congrès Association des Sédimentologues Français, Dijon, Nov. 2011

- Communications/Posters aux Séminaires Seine-Aval IV

Mesures de vagues et d'érosions/dépôts dans l'estuaire de la Seine : 9 mois de mesures en continu avec les systèmes ALTUS dans le cadre du projet Seine-Aval IV « COLMATAGE ».

Bassoullet Ph., Le Hir P., Jestin H., Verney R. *Poster*, Mont-St-Aignan, 8-10 Sept. 2009

Mesures de vagues et d'érosions/dépôts dans l'embouchure de la Seine, en vue de caractériser la variabilité physique des habitats dans le cadre du projet Seine-Aval IV « COLMATAGE »

Le Hir P., Bassoullet Ph., Jestin H., Répécaud M., Verney R. *Communication*, Mont-St-Aignan, 8-10 Sept. 2009