

PROJET CPIER PHRESQUES PHASE1

Volet Renforcement du réseau – Station Embouchure SCENES

Coordinateur : Romaric VERNEY

Contributeurs : Alan BOCHER, Matthias JACQUET, David LE BERRE,
Fabrice LECORNU, Julien LEGRAND, Bertrand MOREAU, Michel REPECAUD,
Jean Pierre LAFONTAINE, David LE PIVER, Michel PELEAU, Hervé
LINTANF, Aurélien TANCRAI, Franck JACQUELINE

1	CONTEXTE	3
2	LA STATION SCENES	3
2.1	LA BOUEE DE SURFACE	3
2.1.1	LE CAPTEUR FLNTU : TURBIDITE ET FLUORESCENCE	5
2.1.2	LE CAPTEUR CTD HYDROCAT SEABIRD COASTAL	5
2.1.3	LE CAPTEUR FLUOROPROBE BBE	5
2.1.4	LA STATION METEO MAXIMET 500	5
2.1.5	LE COSTOF2	5
2.2	LA STATION DE FOND	5
2.2.1	LE COURANTOMETRE AWAC 1MHz NORTEK	6
2.2.2	LE CAPTEUR OPTIQUE WETLABS FNLTU	6
2.2.3	LE CAPTEUR CTD HYDROCAT SEABIRD COASTAL	7
2.2.4	LE MODEM ACOUSTIQUE EVOLOGICS	7
2.3	TEST D'ENDURANCE SUR LE SITE IFREMER ST ANNE	7
3	DEPLOIEMENT DE LA STATION SCENES A L'EMBOUCHURE DE L'ESTUAIRE DE SEINE	7
3.1	DETAILS DU MOUILLAGE	7
3.2	LE DEPLOIEMENT DE LA STATION	12
3.3	OCTOBRE 2017 – JUIN 2018 : BILAN OPERATIONNEL DE 8 MOIS DE DEPLOIEMENT	13
3.3.1	BILAN GENERAL DE LA STATION	13
3.3.2	BILAN DES CAPTEURS	15
3.3.2.1	Sondes de surface	15
3.3.2.2	Sondes de fond	18
4	SYNTHESE DES OBSERVATIONS DE LA BOUEE SCENES ENTRE OCTOBRE 2017 ET JUIN 2018	24
4.1	CALIBRATION DES CAPTEURS OPTIQUES DE TURBIDITE	24
4.2	VARIABILITE DES FORÇAGES HYDRODYNAMIQUES	26
4.2.1	COURANT BAROTROPE, DE SURFACE ET DE FOND, EN L'ABSENCE DE VENT	26
4.2.1.1	Courants barotropes	26
4.2.1.2	Courant de surface et de fond	28
4.2.2	EVENEMENTS METEOROLOGIQUES	30
4.2.3	MODIFICATION DES COURANTS BAROTROPES ET DE SURFACE PAR LE VENT	30
4.2.3.1	Situation du 24 décembre 2017 au 10 janvier 2018 : les tempêtes Bruno, Carmen et Eleanor	35
4.2.4	ETATS DE MER	37
4.3	EVOLUTION DE LA SALINITE DE SURFACE	38
4.3.1	DYNAMIQUE TIDALE	38
4.3.2	DYNAMIQUE SAISONNIERE	40
4.4	DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE VUE PAR SCENES	41
4.4.1	VUE GENERALE DE LA DYNAMIQUE A L'EMBOUCHURE	41
4.4.2	DYNAMIQUE DE SURFACE : PANACHE ET DYNAMIQUE TIDALE	43
4.4.3	DYNAMIQUE DE FOND : IMPACT DES TEMPETES	46
4.5	PROCESSUS BIOGEOCHIMIQUES A L'INTERFACE ESTUAIRE/BAIE	50
5	CONCLUSIONS	53
6	ANNEXES	54

1 Contexte

Le projet PHRESQUES Phase 1 (2016-2018) financé par le Contrat de Plan Interrégional Etat-Régions (CPIER) Vallée de Seine et piloté par le GIP SEINE AVAL a pour objectif de doter l'Axe Seine d'un réseau d'observation de la qualité de l'eau du bassin parisien à la baie de Seine, en s'appuyant et consolidant les réseaux existants : CARBOSEINE (Seine amont), SYNAPSES (estuaire de Seine), COAST-HF (Estuaire/Baie de Seine).

En 2015, une première bouée scientifique instrumentée a été déployée à proximité de la Carosse (bouée D4). Dans le cadre du projet PHRESQUES, cette station, renommée SCENES (Station Côtière pour l'observation de l'ENvironnement en Estuaire de Seine) a été modifiée et ré-instrumentée, de façon à pérenniser une mesure à l'embouchure, et ainsi garder une cohérence d'observation dans le continuum Seine / Estuaire / Baie.

2 La station SCENES

La station SCENES (Station Côtière pour l'observation de l'Environnement en Estuaire de Seine) est une bouée scientifique propriété de l'Ifremer et équipée de capteurs observant différents paramètres de l'environnement estuarien (salinité, température, turbidité, fluorescence, courant, vagues). Elle est constituée de deux éléments distincts : une bouée de surface et une station de fond.

2.1 La bouée de surface

Pour information, la bouée SCENES et son mouillage sont une copie de la bouée SMILE déjà déployée en Baie de Seine au large de Luc sur Mer. Cette bouée est développée en partenariat avec la société GEPS Techno, qui innove en proposant une fourniture d'énergie mixte, par panneaux solaires et récupération de l'énergie de la houle (<https://www.geps-techno.com>).

Le flotteur de surface est une ancienne bouée MAREL déployée en estuaire de Seine dans les années 2000. Pour rappel, ses dimensions hors tout sont 3.6m de diamètre et 6.6m de haut, pour une masse de 5 tonnes environ à vide (sans eau dans le flotteur pour le système houlomoteur) (Figure 1). Le flotteur en lui même a une dimension de 3.6m de diamètre et 3.2m de haut, sur lequel se fixe une superstructure constituée d'un portique de 2.2m de hauteur accueillant outre les équipements scientifiques et les éléments de signalisation réglementaires : croix de Saint André, réflecteur radar et feu de signalisation (rythme SADO 5 éclats toutes les 20s). Se rapporter au document relatif à la demande de prolongation de l'AOT de Septembre 2017 (ODE/DYNECO/DHYSED/17-003/RV) pour toute information sur le mouillage de la bouée et disponible en annexe.

La bouée accueille différents équipements (Figure 2) : i) des capteurs (FLNTU Wetlabs, CTD HYDROCAT, Fluoroprobe BBE) installés via des perches support dans des puits traversant la bouée et positionnés à 104cm et 110cm sous la ligne de flottaison et 17 à 7cm hors du tube (110cm-7cm pour le Wetlabs, 104cm-17cm pour l'HYDROCAT), ii) une station météorologique, iii) un concentrateur/pilote de données COSTOF2 sur la superstructure, iv) un ensemble modem/antenne 4G et v) un modem acoustique Evologics fixé sur le lest de la bouée assurant la communication surface/fond. L'intégration mécanique de l'ensemble de ces éléments a été particulièrement étudiée afin de faciliter la maintenance tant des capteurs (à partir de la bouée) que du modem acoustique (manipulation par plongeurs). Ces éléments sont détaillés ci dessous.

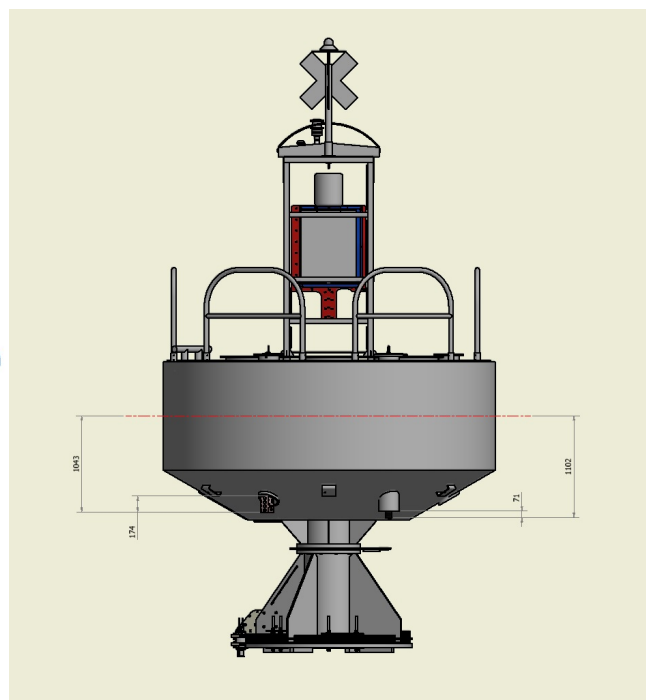
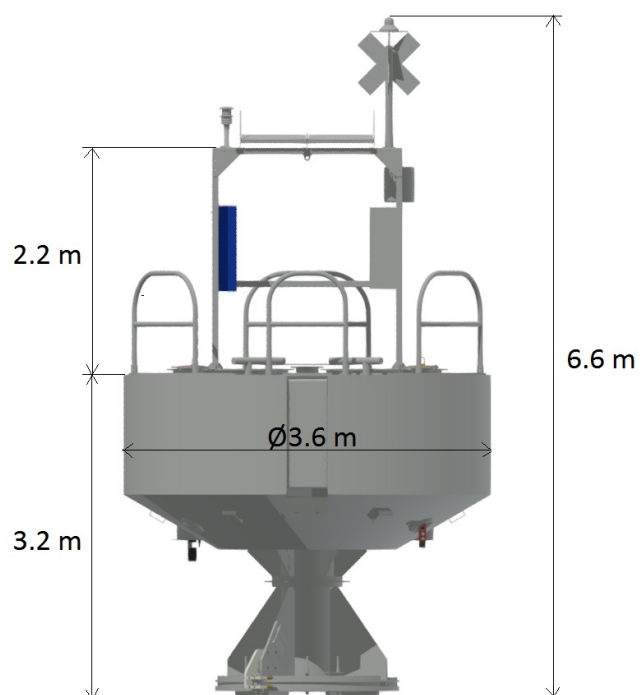


Figure 1 : Présentation de la bouée SCENES – dimensions principales

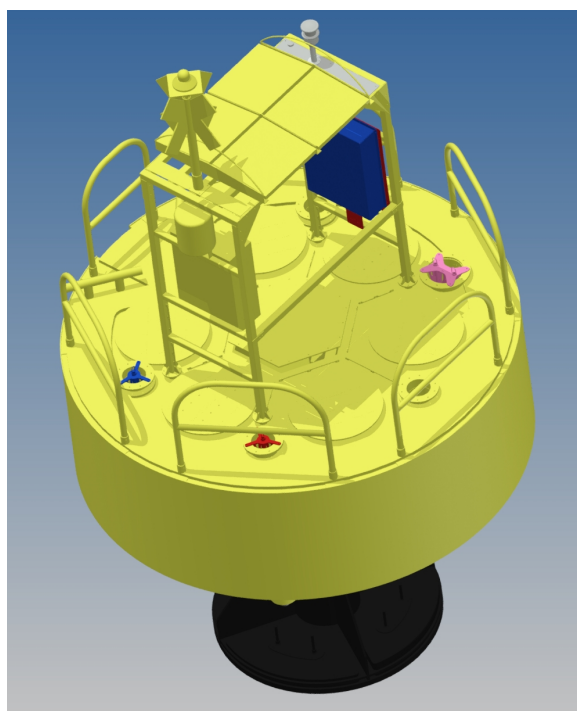
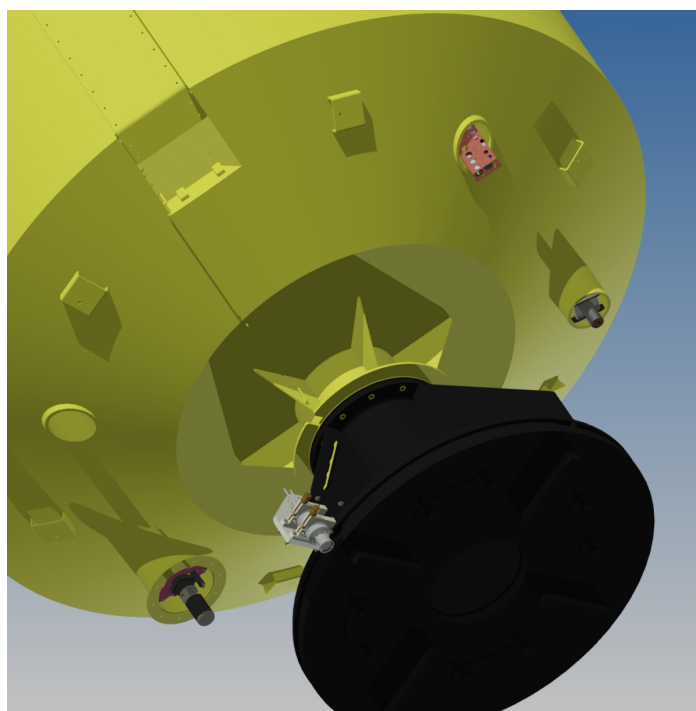


Figure 2 : Vue du positionnement des capteurs et du modem acoustique de dessous (Gauche) et de la surface (droite). La vue de surface permet de visualiser les puits dédiés aux capteurs : BBE (ROSE), FLNTU Wetlabs (rouge) et CTD Hydrocat (bleu). Elle montre également l'armoire (caisson bleu) accueillant le COSTOF2 et le modem 4G. Une station météo MAXIMET est également visible sur le niveau supérieur du portique au dessus de l'armoire scientifique.

2.1.1 Le capteur FLNTU : turbidité et fluorescence

Le FLNTU Wetlabs est un capteur optique à rétrodiffusion, mesurant à la fois la turbidité (700nm) et la fluorescence. Il est opérationnel sur une plage de turbidité de 0 à 200NTU, et de 0 à 75µg/l de Chla. Ce capteur est équipé d'une face cuivrée et d'un balai mécanique également cuivré pour limiter les bio-salissures. Le capteur est fixé sur une perche permettant son déploiement dans le puits dédié (Figure 2). Un test a également été réalisé en ajoutant sur la partie basse du capteur du scotch cuivré pour limiter la colonisation biologique de l'instrument.

Le démarrage de l'acquisition est piloté par le COSTOF2 via son alimentation en énergie, quelques dizaines de secondes toutes les 15min. Le capteur est programmé pour effectuer 10 mesures à 1Hz toutes les 10min. Cette programmation permet à l'instrument de faire un cycle complet et donc d'inclure la rotation du balai avant coupure de l'énergie.

2.1.2 Le capteur CTD HYDROCAT Seabird Coastal

Les sondes HYDROCAT mesurent la profondeur, la température, la conductivité et la salinité. Deux types de sondes HYDROCAT sont disponibles dans le parc, avec ou sans oxygène dissous. Dans la mesure du possible, il est recommandé de positionner une sonde avec capteur O₂ en surface. La sonde est pilotée par le COSTOF2, qui envoie la commande d'acquisition de la mesure, toutes les 15min. La sonde est équipée d'un système anti salissures passif.

2.1.3 Le capteur fluoroprobe BBE

La sonde BBE mesure la fluorescence multispectrale, permettant une quantification de la concentration en Chla totale et la différenciation de 4 classes pigmentaires. Cette sonde a fait l'objet d'une étude approfondie dans le cadre du volet innovation du projet PHRESQUES Phase 1. La sonde est équipée d'un balai mécanique ZebraTech, permettant de limiter les bio-salissures et ainsi optimiser la qualité de la mesure sur le long terme. La sonde et son balai sont pilotés par le COSTOF2. La mesure est effectuée toutes les 15min et le balai effectue un aller/retour sur 180° 1 min avant chaque mesure.

2.1.4 La station météo MAXIMET 500

La station météo MAXIMET 500 enregistre la température et l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent. Elle est également équipée d'un module GPS qui permet de suivre en temps réel la position de la bouée. La mesure est pilotée par le COSTOF2, avec une mesure toutes les 15min.

2.1.5 Le COSTOF2

Le COSTOF2 est un module électronique développé par Ifremer et permettant de piloter les capteurs, de concentrer, dater et stocker la donnée et de transmettre en quasi temps réel tout ou partie des données sur un serveur localisé à l'Ifremer et sur le centre de données CORIOLIS. Le COSTOF2 est alimenté par les batteries de la bouée, chargées par énergie solaire et un système houlomoteur. Le COSTOF2 permet également une maintenance facilitée en accédant à l'ensemble du système par WIFI et 4G, ne nécessitant donc pas obligatoirement une intervention physique sur la bouée. Le COSTOF2 agrège ainsi les données des capteurs de surface et de fond. La transmission des données jusqu'au serveur terrestre se fait via un modem/routeur 4G associé à une antenne WIFI/4G.

2.2 La station de fond

La station de fond accueille des équipements scientifiques et dialogue avec la bouée de surface par modem acoustique. Cette station de fond prend la forme d'une pyramide rectangulaire 4 pans inclinés de 45°, limitant le risque d'accroche par chalutage éventuel (Figure 3). L'emprise au sol est de 1.62mx1.92m, et de 42cm de hauteur, pour un poids de 370 kg dans l'air. Cette station est stabilisée au fond par 6 pieds de 9cm de hauteur, et une chaîne de 12mm relie la station avec le lest de la bouée principale. Un panier instrumenté vient se loger dans la partie centrale de la station, fixé par deux fermoirs en POM. Le panier accueille un courantomètre, un turbidimètre, une CTD et un modem acoustique. Ses dimensions sont

43cmx43cmx103cm, pour un poids incluant les instruments de 49Kg (batteries Evologics d'origine) ou de 43Kg (nouvelle batterie Evologics).

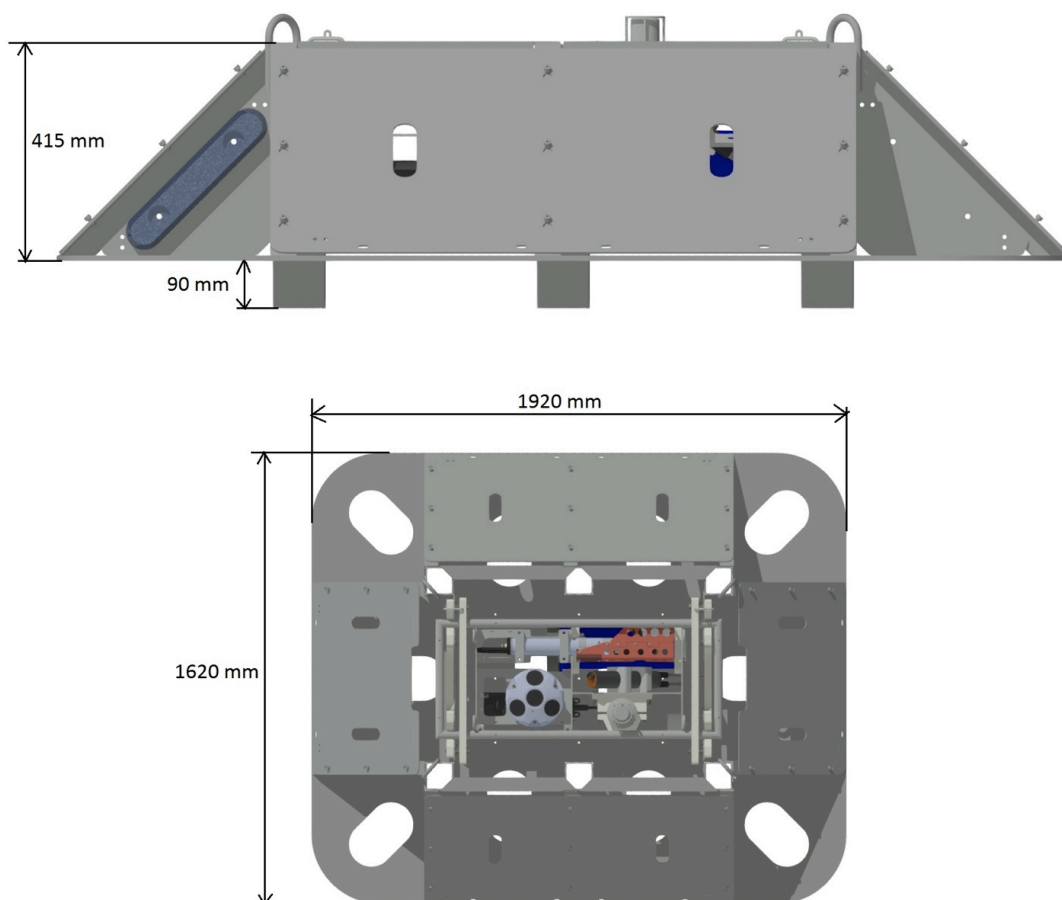


Figure 3 : Schéma et dimensionnement de la station de fond

2.2.1 Le courantomètre AWAC 1MHz NORTEK

Le courantomètre est un AWAC 1MHz développé par NORTEK. Il permet la mesure de la pression, de la température de fond, des trois composantes de la vitesse et l'intensité acoustique rétrodiffusée sur l'ensemble de la colonne d'eau, ainsi que du spectre de houle. Le profil vertical est discrétisé en 50 cellules de 0.5 m, correspondant à une moyenne de 55 mesures à 1Hz, toutes les 30 min. Les vagues sont mesurées toutes les heures, sur la base de 1024 mesures à 1Hz. Un logiciel embarqué (prolog) réalise le traitement en direct des données (en particulier les vagues, car seuls les paramètres synthétiques (hauteurs, périodes...) sont retournés), qui sont renvoyées directement au modem via deux trames NMEA. L'AWAC possède son propre container d'énergie (deux packs de batteries alcalines de 540 Wh chacune), qui permet sur la base de cette configuration une autonomie minimale de 120j. L'AWAC pilote également un turbidimètre Wetlabs FLNTU, l'acquisition étant associée à la mesure des profils de courant (toutes les 30min). Les données sont stockées comme deux capteurs analogiques.

2.2.2 Le capteur optique WETLABS FLNTU

Le capteur FLNTU est identique en caractéristiques à celui de surface. Exceptionnellement il peut être remplacé par un capteur NTU Wetlabs, dans ce cas seule la mesure de turbidité est enregistrée. Le capteur est configuré pour réaliser 5 mesures à 1Hz toutes les heures. Le séquençement du burst est volontairement long pour permettre un pilotage complet de la mesure par l'AWAC. Le séquençement réel est en effet commandé par l'AWAC, sur la base de la fréquence des profils de courant (i.e. dans notre configuration toutes les 30min).

2.2.3 Le capteur CTD HYDROCAT Seabird Coastal

Le capteur CTD HYDROCAT est identique à celui de surface. Comme rappelé ci dessus, la sonde équipée du capteur O₂ doit être positionnée préférentiellement en surface. La programmation de la sonde est d'une mesure toutes les 15 min. La sonde travaille en autonome (plus de 200 j avec cette configuration), et doit donc être démarrée avant mise à l'eau.

2.2.4 Le modem acoustique EVOLOGICS

Deux modems acoustiques Evologics S2C18-34, l'un dans la station de fond, l'autre positionné sur le lest de la bouée de surface, assurent la communication et le transfert des données surface/fond. Les fonctionnalités des deux modems diffèrent et il est important de ne pas les inverser : le modem SN1834/19#148/8 est équipé d'un mode réveil et doit être positionné au fond. Le modem SN1834/19#147/8 est lui positionné sur le lest de la bouée de surface. Ce dernier est continuellement alimenté via le COSTOF2, tandis que le modem de fond se réveille à chaque envoi de trame de la CTD ou de l'AWAC. La vitesse de transmission entre surface et fond est estimée à 480 bits/s, avec un message de 3900 octets en moyenne. La durée de transmission des messages varie autour de 70 secondes. Le modem de fond possède son propre container d'énergie.

Le modem de fond concentre les données de l'AWAC et de la CTD, et transmet automatiquement les trames NMEA en provenance des différents capteurs dès réception.

2.3 Test d'endurance sur le site Ifremer St Anne

La station SCENES a été déployée entre juillet et septembre 2017 dans la zone de mouillage de l'Ifremer à l'entrée de la rade de Brest, afin de valider tant les éléments mécaniques (bouée, perches amovibles supports de capteurs, station de fond) et la production d'énergie que le volet électronique et la mise en œuvre des capteurs.

Sur le plan mécanique, les tests ont permis de confirmer le design adopté pour la bouée. Le changement des perches support des capteurs s'effectue rapidement, permettant de limiter la durée des interventions, critiques en zones plus exposées. La connexion/déconnexion à chaud des capteurs est également validée. La manipulation du panier de fond en condition réelle par les équipes de plongeurs est également aisée.

Les tests ont également permis de noter un manque de stabilité horizontale de la bouée, une qualité réduite de la transmission des données (50%) et un défaut critique de la sonde BBE, pour laquelle une voie d'eau après corrosion caverneuse est observée. Une action de correction doit être réalisée par notre partenaire GEPS Techno sur le flotteur avant la mise en œuvre à l'embouchure de l'estuaire de Seine. De même, le changement de l'antenne 4G a permis d'améliorer significativement le taux de transfert des données (80%). Un taux de 100% n'est pas atteint du fait de la géographie locale, très encaissée et assez éloignée des relais téléphoniques. Concernant la BBE, un échange avec le constructeur a abouti à i) la prise en compte de la réparation de la sonde via la garantie et ii) au changement du corps de sonde, d'inox vers le titane, plus résistant (mise à disposition de ces nouvelles sondes : second semestre 2018).

3 Déploiement de la station SCENES à l'embouchure de l'estuaire de Seine

3.1 Détails du mouillage

Pour rappel, les dimensions hors tout de la bouée sont 3.6m de diamètre et 6.6m de haut (Figure 1). Le flotteur en lui même a une dimension de 3.6m de diamètre et 3.2m de haut, sur lequel se fixe une superstructure constituée d'un portique de 2.2m de hauteur accueillant outre les équipements scientifiques les éléments de signalisation réglementaires : croix de Saint André, réflecteur radar et feu de signalisation (rythme SADO 5 éclats toutes les 20s).

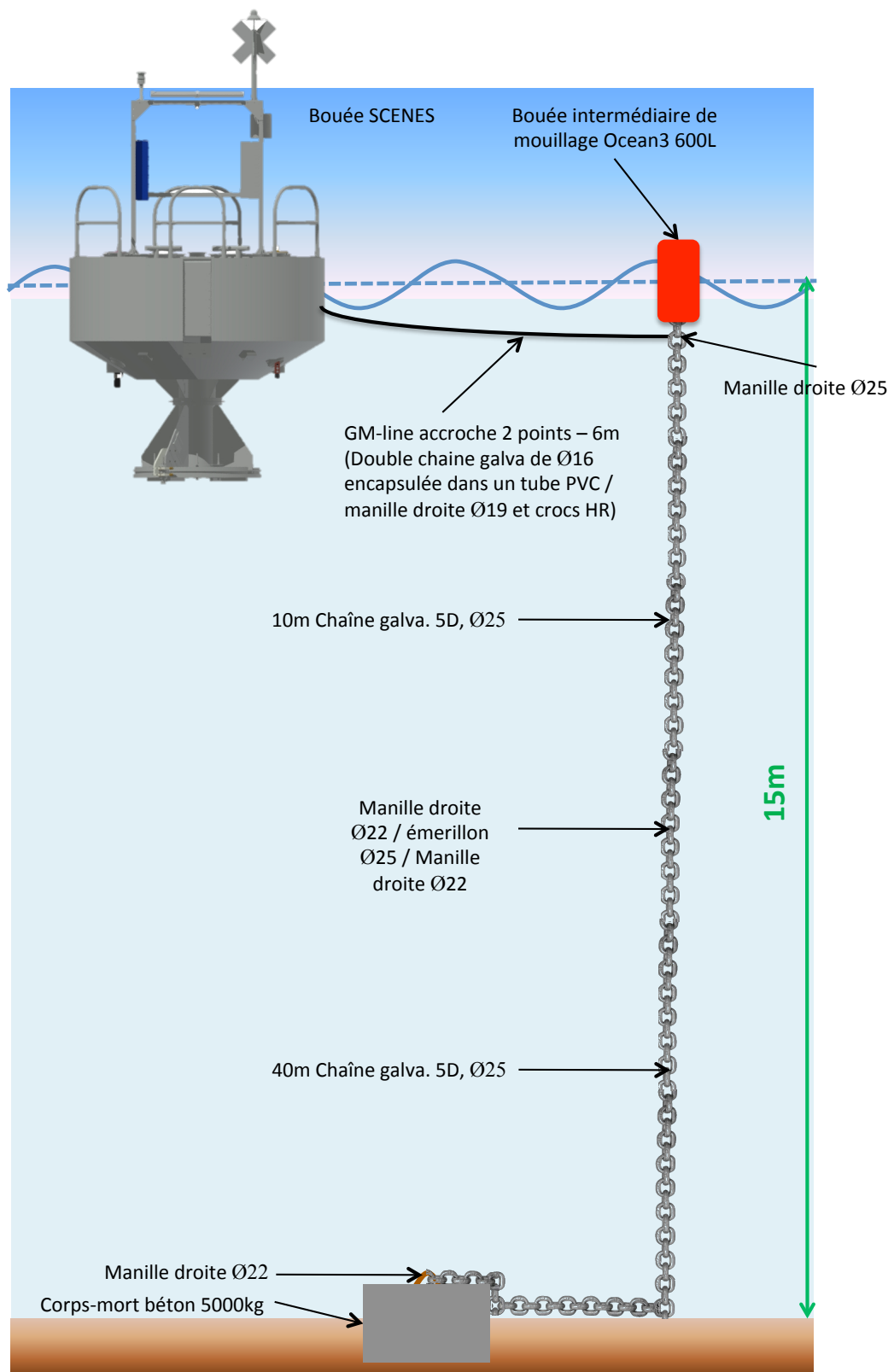


Figure 4 : Description du mouillage de la bouée SCENES

Cette bouée de surface est reliée à une bouée de mouillage intermédiaire OCEAN3 de 600L par une laisse d'accroche (GM Line) en chaîne 16 5D gainée PVC, assurant une fixation en deux points (crocs HR) de la bouée scientifique (Figure 4). Cette bouée intermédiaire assure le mouillage, à travers une ligne en chaîne galvanisée DN25 5D de 50m de long, reliée à un lest béton de 5000kg.

Le plan de mouillage de la bouée SCENES est identique à celui de la bouée actuellement présente sur le site de la Carosse : la bouée principale est associée à deux bouées de signalisation GBR1250 (Croix de St André et feu de signalisation Sealite SL-70 16Ah à éclats jaune FI en 4s – taux de travail de 0.25 - lest de 600kg) de façon à former un triangle de signalisation de la station de fond (Figure 5 et Figure 6). Le triangle formé par les bouées de surface est de 100m de côté, la station de fond étant située à l'intérieur du triangle, sa localisation décalée du centre du triangle vers le sommet constitué de la bouée scientifique (distance lest/station d'approximativement 30m).

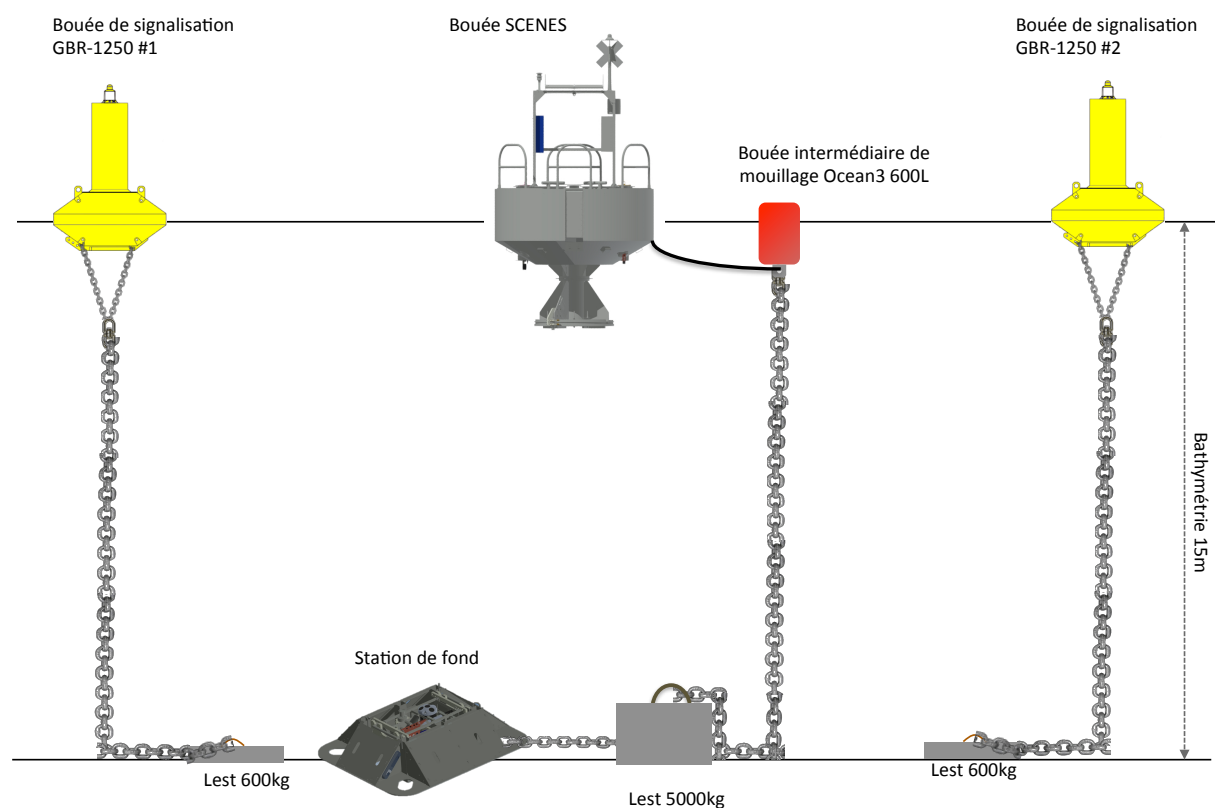


Figure 5 : Schéma général du mouillage de la station SCENES (bouée, station de fond et bouées de marquage) - vue en coupe

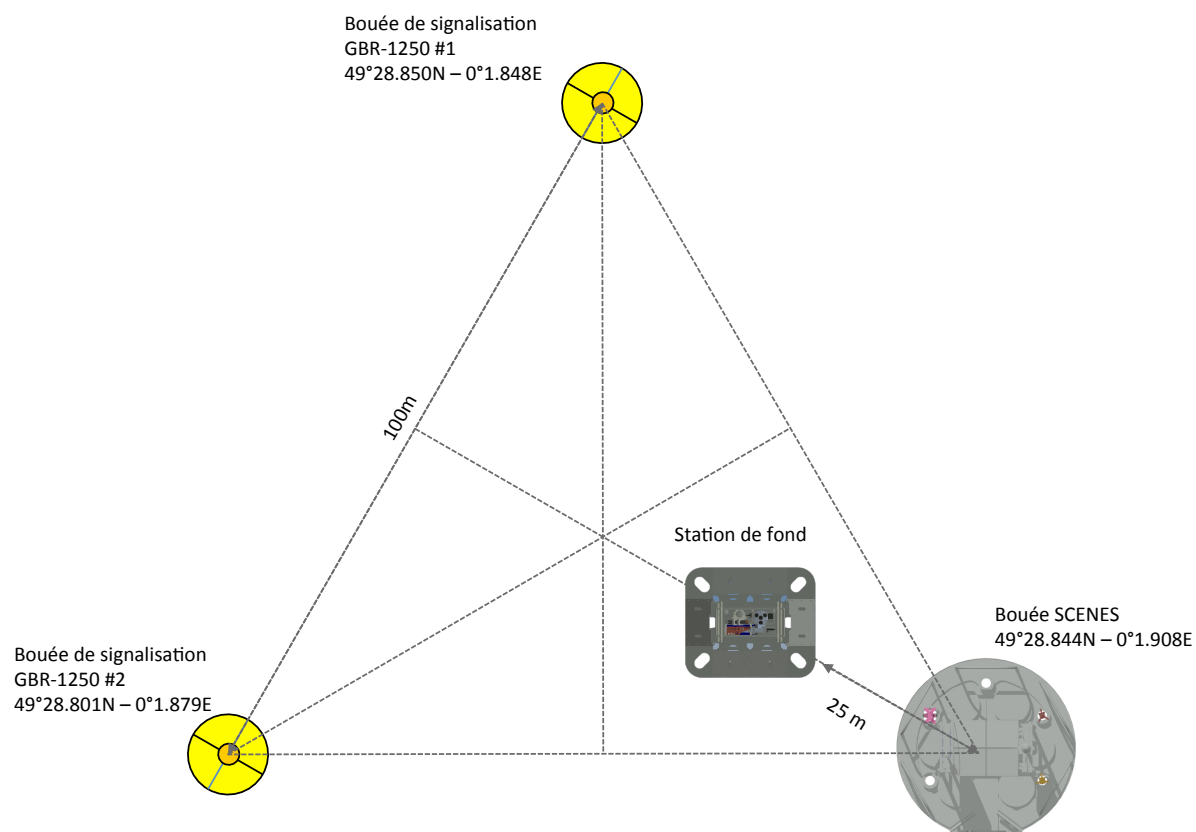


Figure 6 : Schéma général du mouillage de la station SCENES – vu de dessus

La bouée SCENES remplace la bouée actuellement mouillée sur le site de la Carosse (Figure 7). Le triangle réalisé par le nouveau mouillage s'inscrit pleinement dans le triangle de mouillage actuel de la bouée (Figure 8). Le tableau suivant renseigne les positions des différents éléments de mouillage.

Ces éléments ont permis de constituer le document de demande d'autorisation d'occupation du territoire, à destination de la DTTM et du GPMH. Cette demande a été validée par les autorités compétentes en début d'année 2018, et faisait suite à la demande initiale de déploiement du mouillage D4-Carosse.

Positionnement mouillage SCENES		
GBR1	49° 28.850 N	0° 1.848 E
GBR2	49° 28.801 N	0° 1.879 E
SCENES	49° 28.844 N	0° 1.932 E
Station de fond	49° 28.836 N	0° 1.908 E

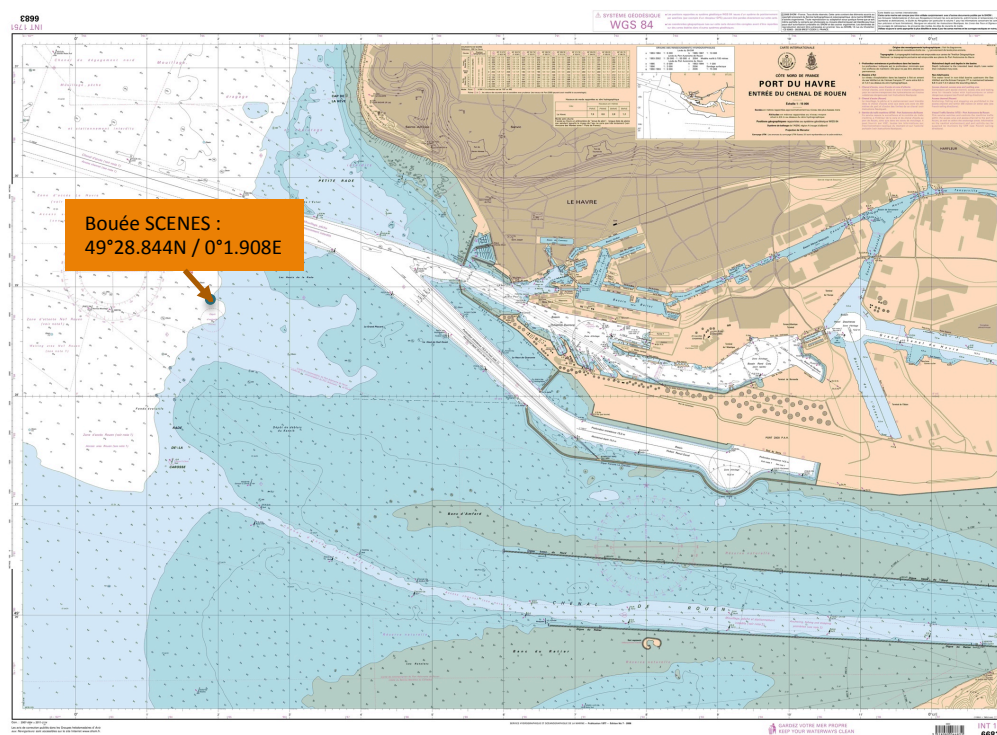


Figure 7 : Localisation de la station SCENES à l'embouchure de l'estuaire de Seine

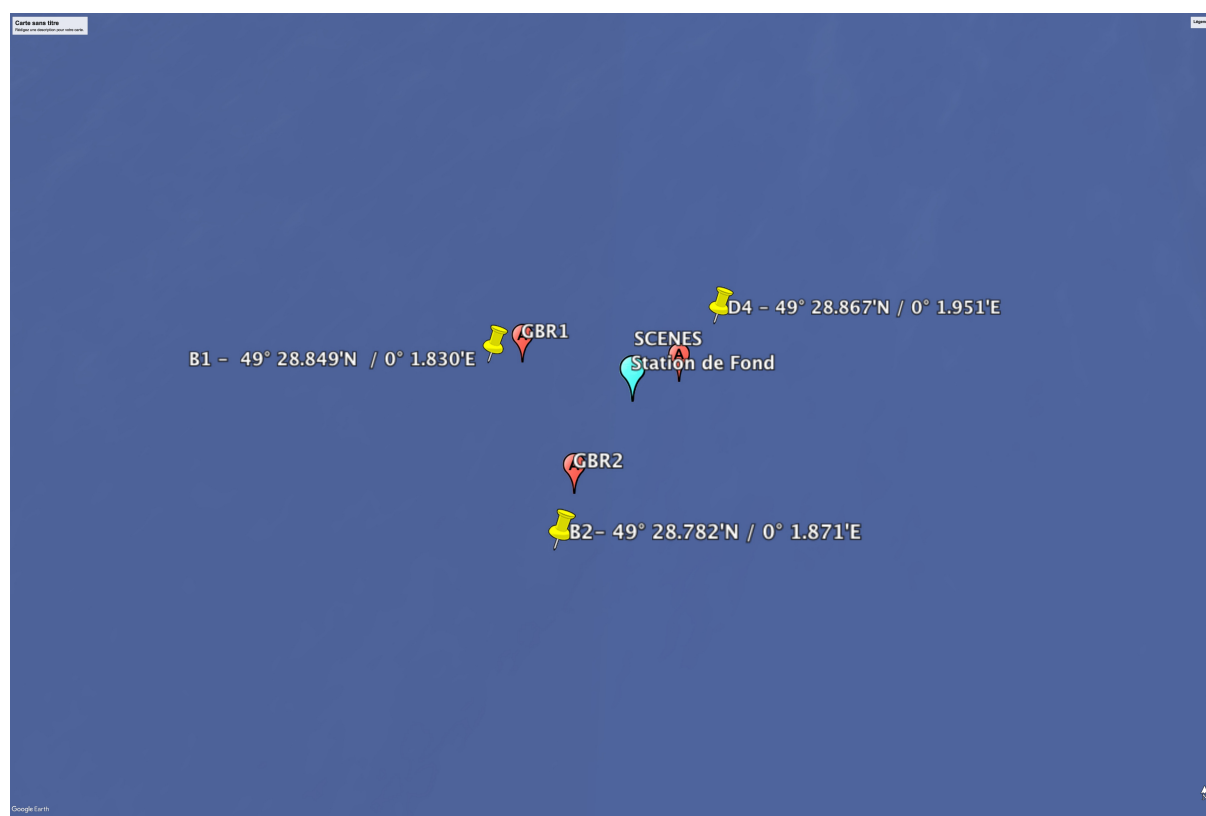


Figure 8 : Localisation du mouillage SCENES par rapport à l'ancien mouillage D4-Carosse (2015-2017)

3.2 Le déploiement de la station

La station SCENES a été déployée le 10 octobre 2017 conjointement par le Baliseur Chef de Caux des Phares et Balises du Havre, le NO Côtes de la Manche, la société GEPS Techno et l'Ifremer. L'Ifremer et l'équipage du NO Côtes de la Manche ont mis en place les deux bouées de marquage GBR-1250. Le baliseur, sous le contrôle de la société GEPS Techno et de l'Ifremer, a mis en place la bouée principale et son lest. Les plongeurs de l'Ifremer sont ensuite intervenus pour positionner la station de fond et son panier instrumenté, le 11 octobre 2018 (Figure 9 et Figure 10).



Figure 9 : Photo de la bouée SCENES déployée en octobre 2017.



Figure 10 : Photo de la bouée SCENES déployée en octobre 2017

3.3 Octobre 2017 – Juin 2018 : bilan opérationnel de 8 mois de déploiement

3.3.1 *Bilan général de la station*

Dans cette section, un bilan général de la station est dressé, tant d'un point de vue de l'énergie, de la qualité de transmission des données que de la mécanique du flotteur et de son mouillage.

Un critère opérationnel important concerne le taux de transmission des données. Depuis le mois d'octobre, ce taux de transmission varie de 50% à 95%. En octobre 2017, le taux de transmission est de 70%, impacté par une série de réglages dans la gestion des données. Les mauvais chiffres de novembre et janvier s'expliquent par un défaut de fourniture d'énergie en provenance de la bouée. En effet, entre novembre et février l'ensoleillement est limité et rasant, ne permettant pas aux panneaux solaires de travailler en fonctionnement optimal, avec pour conséquence un rendement limité. Le module houlomoteur était sensé prendre le relais en hiver, toutefois son rendement s'est rapidement révélé insuffisant dans sa configuration actuelle. La société GEPS Techno a donc pris en charge le remplacement régulier des batteries entre décembre 2017 et février 2018, permettant une fourniture optimale de l'énergie.

Suite aux nombreuses tempêtes de l'hiver 2017-2018, le mouillage de la bouée SCENES a subi des dommages : la bouée Ocean3, intermédiaire entre le lest et la ligne de mouillage et la bouée principale, a perdu sa flottabilité. Ce dommage a eu pour conséquence une reprise des efforts du mouillage directement sur la bouée, une fragilisation du système d'accroche et un endommagement du support du modem acoustique. Suite à ces incidents et aux besoins d'assurer une fourniture d'énergie suffisante en hiver, une action de maintenance est prévue en septembre 2018. A cet effet, le Baliseur Chef de Caux relèvera le mouillage actuel, qui sera remplacé par un nouvel ensemble lest+chaîne, et remorquera à terre la bouée. Des travaux de maintenance auront lieu, afin de réparer les dégâts occasionnés, changer les systèmes d'accroche, ajuster la stabilité de la bouée, doubler la surface de panneau solaire et améliorer le système de production d'énergie par système houlomoteur. Ces travaux sont prévus de durer quelques semaines à partir de début septembre, météo permettant.

La transmission surface/fond des données n'a pas été possible sur les deux dernières rotations du fait d'interférences logicielles entre le modem acoustiques EVOLOGICS et le courantomètre AWAC. Ce point a été solutionné en mai 2018, et la liaison sera effective après la maintenance de la bouée.

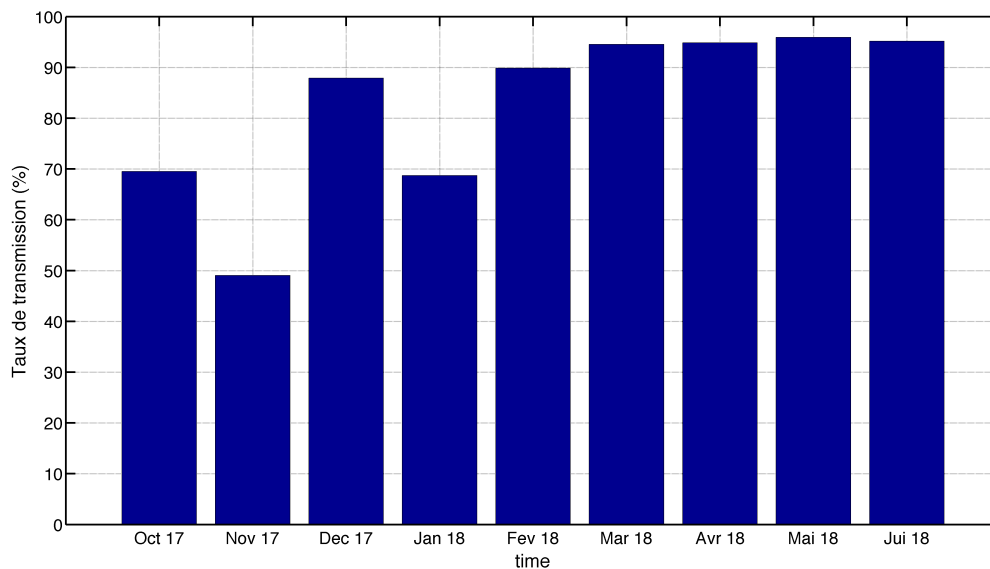


Figure 11 : Taux de transmission à terre des données de la bouée SCENES entre Octobre 2017 et Juin 2018

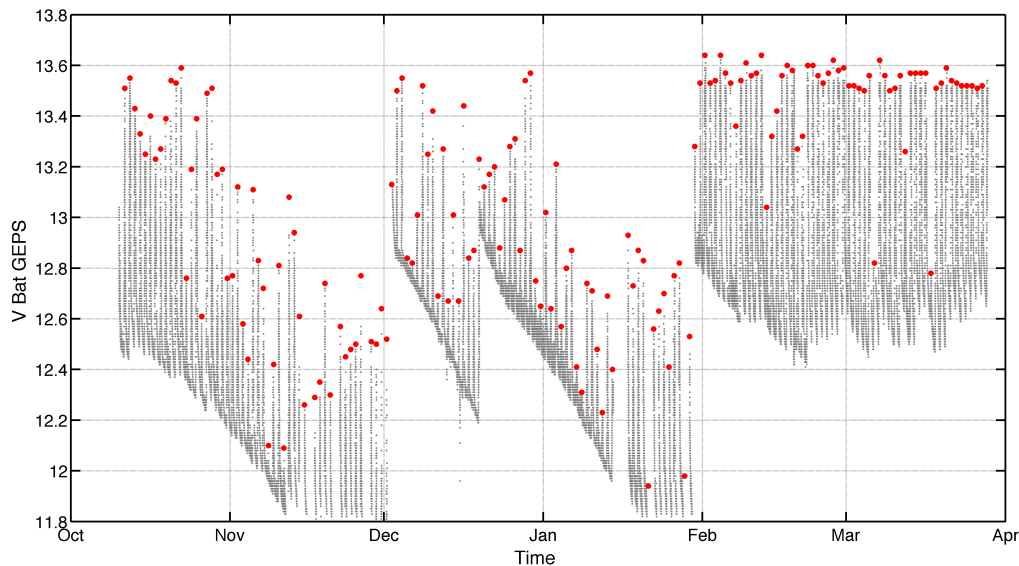


Figure 12 : Voltage délivré par les batteries de la bouée SCENES entre Octobre 2017 et Avril 2018.

3.3.2 Bilan des capteurs

Dans un premier temps, le bilan des données de surface est réalisé. La bouée a été mouillée le 10 octobre 2017. Une première rotation des sondes de surface a été réalisée le 17 février 2018, lors du premier Leg de la campagne PHRESQUES 2018 à partir du NO Côtes de la Manche. La seconde rotation était prévue fin avril/début mai. Toutefois cette dernière a réellement été réalisée le 2 juillet 2018 (Tableau 1).

Trois campagnes de mesures ont été réalisées à partir du NO Côtes de la Manche en 2018, afin de qualifier les données in situ et de calibrer les turbidimètres optiques. Lors de ces campagnes, des profils CTD et turbidité sont réalisés toutes les 15' (puis toutes les 30' à partir du leg 2), et des prélèvements surface/fond sont collectés toutes les heures. Des mesures ADCP sont également réalisées sur 12h.

FOND				
Date Début	Date Fin	AWAC	WETLabs	HYDROCAT-SMP
12/10/17	30/03/18	WAV 7263	FLNTUSB S/N: 1852	S/N: 30137
30/03/18		WAV 7419	FLNTUSB S/N: 4804	S/N: 30245
SURFACE				
Date Début	Date Fin	WETLabs	HYDROCAT-SMP	
10/10/17	17/02/18	FLNTUSB S/N: 4555	S/N: 30145	
17/02/18	02/07/18	FLNTUSB S/N: 1652	S/N: 30144	
02/07/18		FLNTUSB S/N: 4555	S/N: 30145	

Tableau 1 : Calendrier de rotation des sondes de la bouée SCENES entre octobre 2017 et juillet 2018

Après chaque retour de rotation, un protocole de maintenance est appliqué. Pour les turbidimètres Wetlabs, une vérification de l'étalonnage est effectuée par comparaison avec une solution de formazine et confrontée à une mesure de turbidimètre de laboratoire Hach (voir exemple de fiche de vérification en annexe). Pour les sondes HYDROCAT, une vérification de la qualité de la mesure est actuellement effectuée en plusieurs étapes sur un échantillon d'eau de mer : i) avant nettoyage (i.e. état de retour de la sonde), ii) après cycle de pompage, iii) après nettoyage (triton + vinaigre).

3.3.2.1 Sondes de surface

En sortie de la première rotation, en fin d'hiver, les sondes de surface étaient très peu impactées par les salissures. Début juillet, après un fort épisode de bloom courant juin et des conditions très favorables au développement biologique, les sondes relevées se trouvent être fortement colonisées par des algues et concrétions biologiques (Figure 13). Toutefois, les organes les plus sensibles des capteurs ne sont pas touchés, protégés par les éléments cuivrés (RMSE salinité à 0.7PSU). Aucune dérive des capteurs n'a été notée, cependant un examen détaillé de la mesure de turbidité et de fluorescence a montré par séquence la perturbation de la mesure optique par les filaments algaux à partir du 10 juin 2018 (Figure 14). Ces perturbations ne sont plus observées après rotation des sondes.

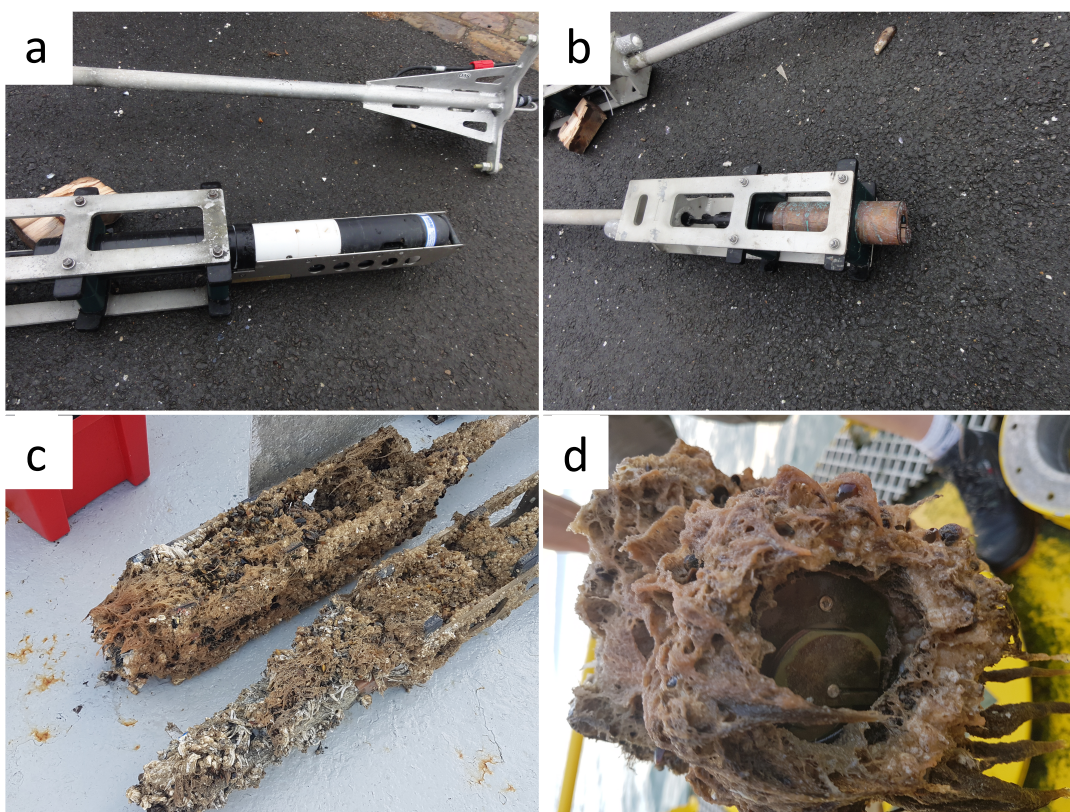


Figure 13 : Sondes HYDROCAT et Wetlabs FLNTU avant mise en œuvre (respectivement a et b) et après relèvement le 2 juillet 2018 (c et d).

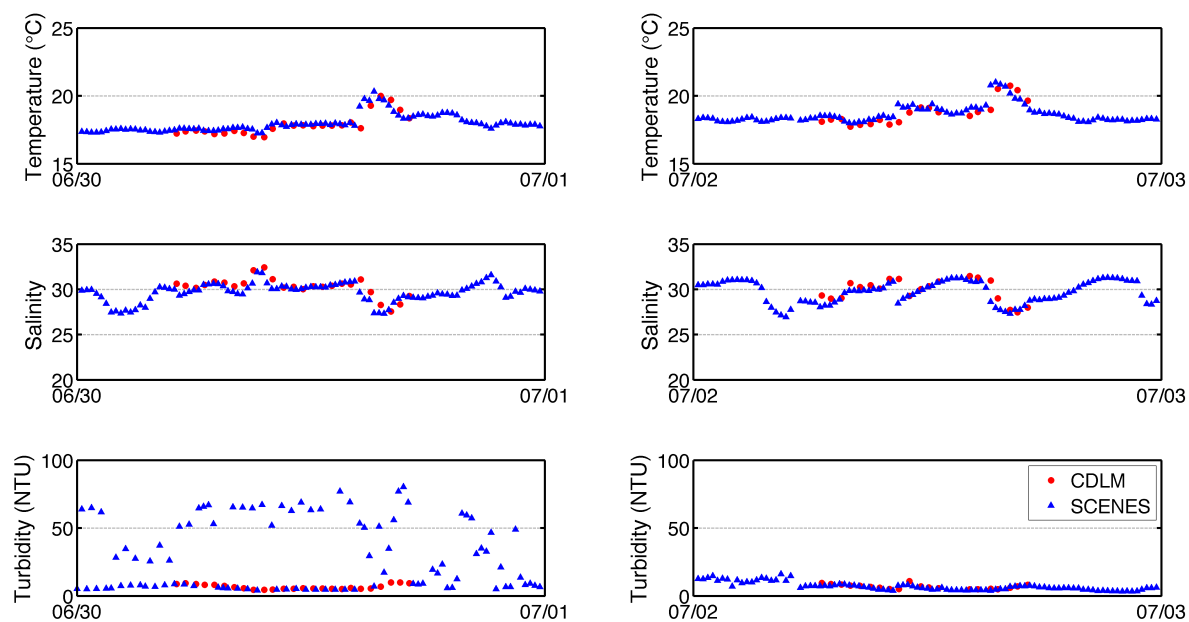


Figure 14 : Comparaison des données SCENES de surface (Température, salinité, turbidité) et des mesures de surface issues des profils CTD réalisés lors des campagnes de calibration. Exemple du leg3. A gauche : avant rotation des capteurs, en présence de biosalissures, à droite après rotation, capteurs propres.

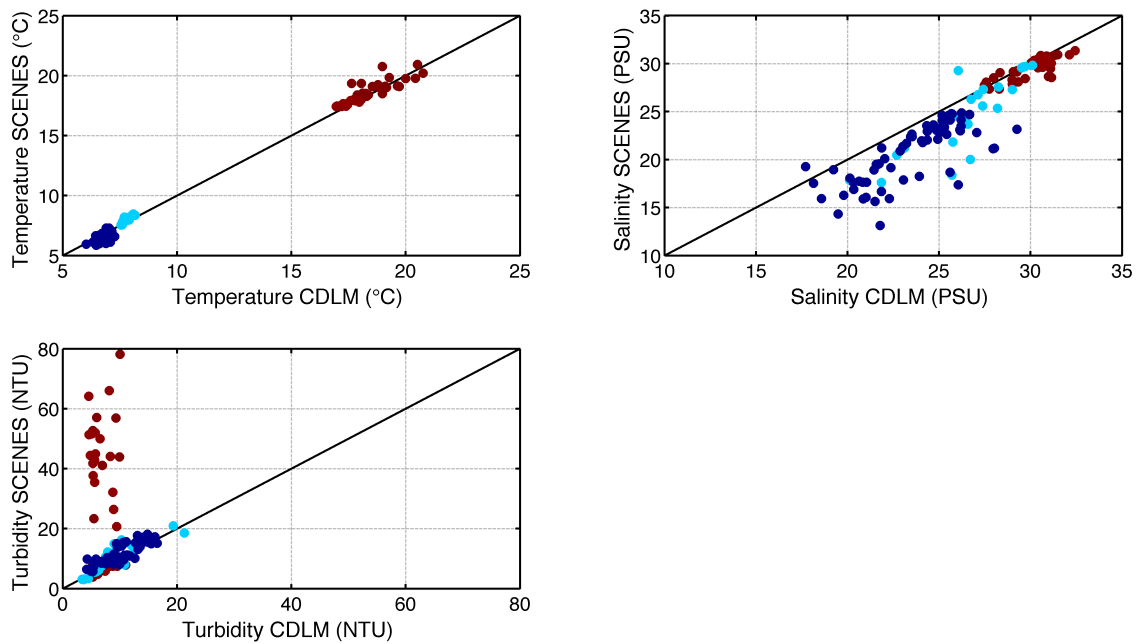


Figure 15 : Synthèse des comparaisons mesures SCENES et CTD réalisées à partir du NO Côtes de la Manche en février 2018 (bleu foncé), avril 2018 (bleu clair) et juillet 2018 (rouge)

Une évaluation de la qualité de la mesure SCENES a été réalisée en comparant les mesures moyennées entre 0.5m et 1m sous la surface lors des profils CTD obtenus lors des 5 cycles de marée de calibration et les données SCENES mesurées autour de 0.6m sous la surface (Figure 15 et Tableau 2). Les mesures de températures présentent de faibles différences, inférieures à 0.5°C en moyenne, représentant une RMSE normalisée de 5%. Les mesures de salinité se caractérisent par incertitudes autour de 3PSU en hiver (fort débit, gradient de salinité spatio-temporel important) (NRMSE de 10%), et inférieures à 1PSU en été (NRMSE inférieure à 5%, et ce malgré l'encrassement extérieur du capteur).

Les mesures de turbidité présentent des RMSE de l'ordre de 1 à 3NTU selon les cycles de marée, soit des incertitudes normalisées variant de 15% à 30%. Ces différences (ainsi que les incertitudes plus fortes sur la salinité en hiver) peuvent s'expliquer par la présence de forts gradients en surface associés au déplacement du panache d'eau douce turbide en provenance de l'estuaire. En effet, les mesures ne sont pas réalisées simultanément ni co-localisées. Lors du passage du front, la bouée ou le bateau peuvent se trouver de part et d'autre de la zone de gradient et donc induire une plus grande variabilité dans les comparaisons directes des données. L'examen des comparaisons témoigne toutefois de la très bonne qualité de la mesure réalisée par la bouée SCENES sur l'ensemble du déploiement.

Les données de turbidité impactées par les bio-salissures ont été ici exclues de l'analyse statistique (cf Figure 14). Si ces dernières avaient été prises en compte, la RMSE sur ce cycle de marée passe de 1NTU à 39NTU, soit plus de 150% d'incertitude. Une rotation plus courte des sondes est prévue pour s'affranchir au maximum de l'encrassement des capteurs. Toutefois, un critère qualité des mesures pourra être mis en œuvre à l'avenir, en évaluant la stabilité d'une séquence de 5 mesures successives enregistrées à 1Hz. Une forte variabilité de ces mesures à haute fréquence, croissante dans le temps pourra alors témoigner d'un encrassement du capteur et donc dégrader la confiance dans la qualité de la mesure.

SCENES - SURFACE						
Campagnes CDLM	Temperature		Salinité		Turbidité	
	RMSE (°C)	NRMSE (%)	RMSE (PSU)	NRMSE (%)	RMSE (NTU)	NRMSE (%)
16/02/18	0.3	5.0	3.6	15.0	2.8	30.0
17/02/18	0.2	2.5	2.4	10.0	1.5	15.0
01/04/18	0.2	2.9	2.8	10.5	2.5	27.7
30/06/18	0.4	2.5	0.7	2.4	1.0	14.0
02/07/18	0.6	3.2	0.9	3.1	1.2	18.0
Global	0.3	3.4	2.5	9.5	2.0	23.7

Tableau 2 : Comparaison statistique des données de surface de la bouée SCENES et des profils CTD réalisés lors des campagnes PHRESQUES 2018



Figure 16 : Dynamique du panache de surface et passage de front eau claire de la baie/eau turbide de l'estuaire

3.3.2.2 Sondes de fond

La station de fond a été déployée le 11 octobre 2018. Une première relève du panier de fond était prévue fin décembre/début janvier. Du fait des conditions d'état de mer défavorables (rapide succession de tempêtes sur cette période), la rotation n'a pu être réalisée que le 6 avril 2018. Cependant, malgré une mise en œuvre dépassant 6 mois, l'ensemble AWAC/Wetlabs FLNTU/HYDROCAT fonctionnait encore parfaitement. Aucun trou dans les données n'est donc à constater. La prochaine rotation du panier est prévue en septembre 2018, concomitamment aux travaux de modification de la bouée de surface.

Selon une démarche similaire à l'évaluation de la qualité des données de surface, une comparaison des données mesurées lors des campagnes PHRESQUES 2018 (Leg 1 uniquement) et des données SCENES a été réalisée (Figure 17, Figure 19 et Tableau 3). Les données de fond correspondent aux données enregistrées par la CTD et moyennées sur les 0.5m au dessus du fond. Les données de température enregistrées au fond par SCENES présentent, comme pour la surface, des différences faibles avec les mesures CTD, dans le cas présent inférieures à 0.1°C. Les données de turbidité SCENES et CTD présentent des dynamiques similaires, en particulier le 17/02, avec des incertitudes de l'ordre de 30% à 40%. Comme pour la surface, la distance de plusieurs centaines de mètres entre le Côtes de la Manche et la station de fond peut expliquer en partie ces différences.

Il est important de noter également que durant l'hiver 2017-2018, le capteur optique a régulièrement atteint sa limite de saturation autour de 190NTU (Figure 18), et en particulier entre décembre 2017 et janvier 2018, lors des principales tempêtes. Pour l'hiver 2018-2019, un turbidimètre 0-1000NTU pourra être déployé, permettant de limiter la saturation du capteur.

Ces fortes turbidités au fond ne sont pas sans conséquences pour les mesures de salinité. La comparaison entre les données CTD et les mesures SCENES montre un écart de près de 7PSU entre les deux sources de données (Figure 17). L'examen des séries temporelles de salinité de surface et fond, conjointement aux mesures de turbidité (Figure 18), montre que dès mi décembre, la salinité de fond diminue anormalement, jusqu'à être régulièrement inférieure à la salinité de surface. Cette anomalie est causée par l'envasement de la cellule de conductivité, du fait des fortes turbidités et du positionnement de la sonde. En effet, de retour au laboratoire les contrôles métrologiques ont montré que après remise en eau, le capteur de salinité mesurait une salinité de 2.6PSU pour une salinité de référence de 33PSU. Après circulation active de près de 30min, le sédiment piégé était expulsé et la salinité mesurée était de l'ordre de 26PSU. Un nettoyage complet a permis de revenir à des valeurs stables de l'ordre de 33.7PSU (salinité de référence du dernier test : 34.6).

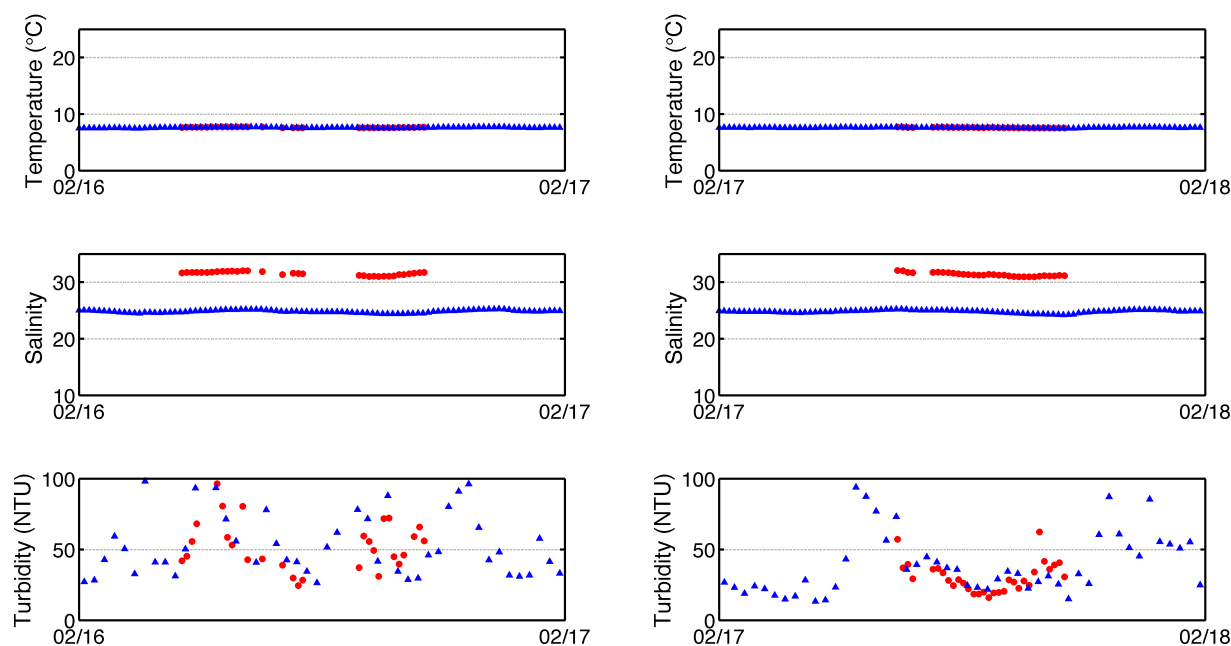


Figure 17 : Comparaison des données SCENES de fond (Température, salinité, turbidité) et des mesures de fond issues des profils CTD réalisés lors des campagnes de calibration. Exemple du leg1 : gauche cycle de marée du 16/02, droite cycle de marée du 17/02.

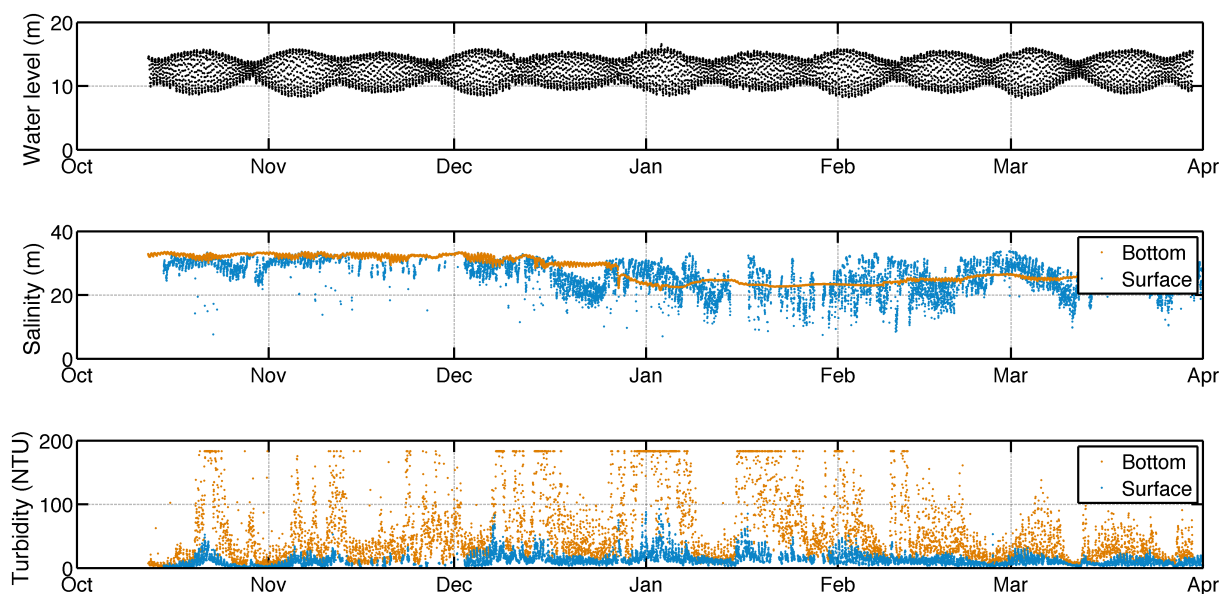


Figure 18 : Comparaison des données surface (bleu) /fond (orange) mesurées par la bouée SCENES entre octobre 2017 et avril 2018. Haut : niveau d'eau (m) ; milieu : salinité ; bas : turbidité.

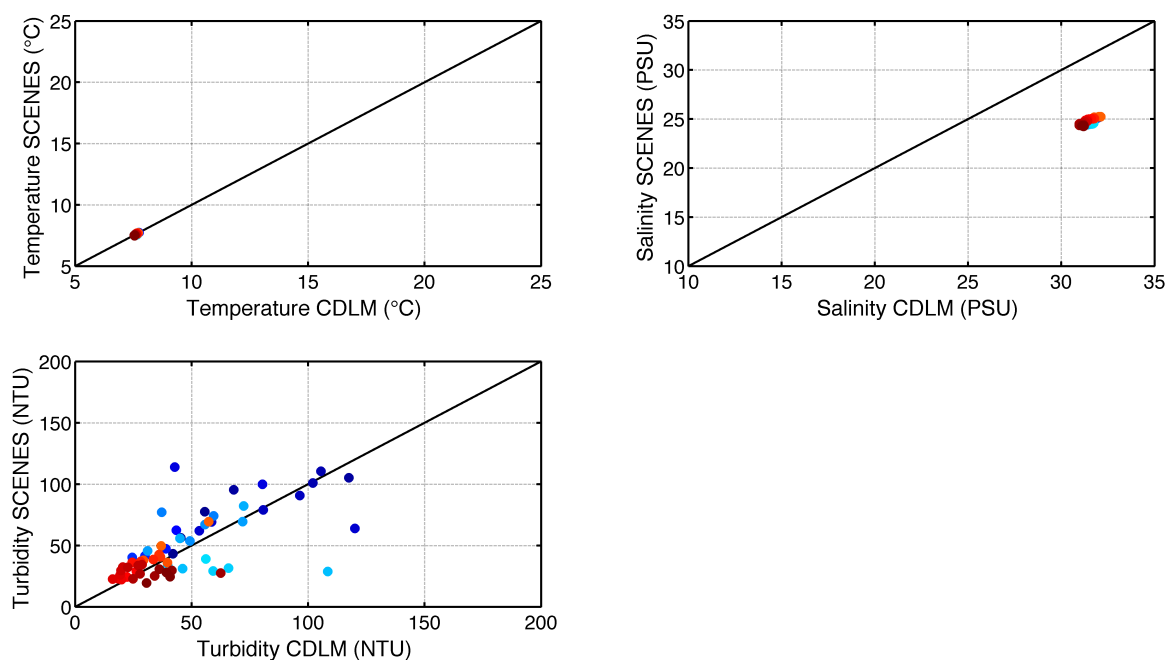


Figure 19 : Synthèse des comparaisons mesures SCENES et CTD réalisées à partir du NO Côtes de la Manche en février 2018 - données de fond

SCENES - FOND						
Campagnes CDLM	Temperature		Salinité		Turbidité	
	RMSE (°C)	NRMSE (%)	RMSE (PSU)	NRMSE (%)	RMSE (NTU)	NRMSE (%)
16/02/18	0.03	0.4	6.7	21.0	26.1	42.0
17/02/18	0.02	0.3	6.6	21.0	10.2	33.0
01/04/18	-	-	-	-	-	-
30/06/18	-	-	-	-	-	-
02/07/18	-	-	-	-	-	-
Global	0.03	0.3	6.7	21.0	19.9	56.0

Tableau 3 : Comparaison statistique des données de fond de la bouée SCENES et des profils CTD réalisés lors des campagnes PHRESQUES 2018

Le dernier élément de la station de fond concerne le courantomètre AWAC. Un premier critère de qualité concerne la stabilité du rapport entre les signaux acoustiques à altitude identique. En effet, les biofouling ne se développent pas uniformément sur les transducteurs acoustiques, et une colonisation biologique intense se traduirait par une diminution du signal acoustique sur l'un des trois faisceaux. Pour la période hivernale, le signal est propre et stable autour de 1, ce qui traduit l'absence de biofouling (Figure 20).

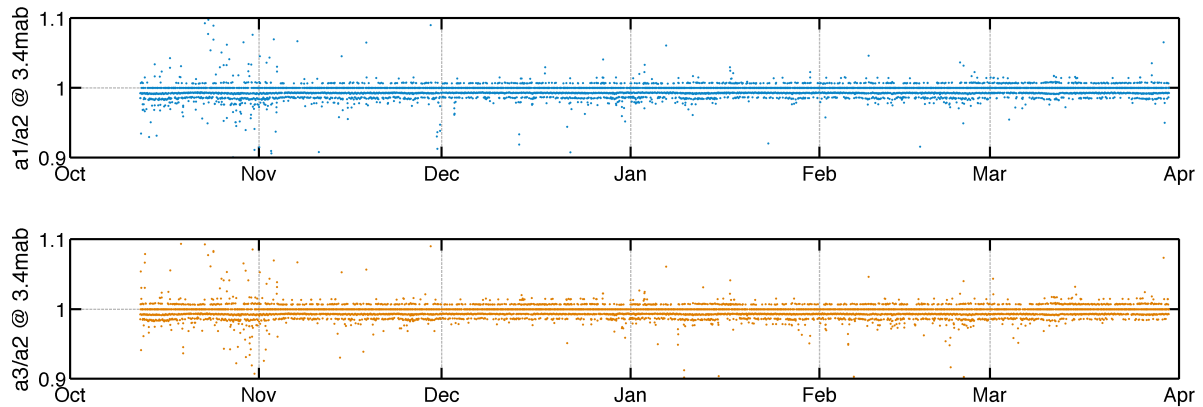


Figure 20 : Rapport des intensités acoustiques rétrodiffusées enregistrées à 3.4m au dessus du fond lors du déploiement de l'AWAC de SCENES, entre octobre 2017 et avril 2018. Haut : $a1/a2$; Bas : $a3/a2$.

L'examen par plongeur du mouillage SCENES au printemps 2018 a montré que le lest de la bouée SCENES avait minima effectué une rotation, se retrouvant sur la tranche. La chaîne assurant la liaison entre la station de fond et le lest est alors retrouvée très tendue. Les capteurs d'attitude de l'AWAC permettent de visualiser si cet événement a eu un impact sur la position de la station de fond, pour quelles raisons, et si des conséquences sont mesurables pour l'AWAC (Figure 21). Les capteurs d'attitude montrent que la station a effectué trois rotations horizontales le 27/12, le 03/01 et plus faiblement le 17/01, correspondant à une rotation totale de près de 40°. Ces rotations se sont produites lors d'épisodes de houles ($T > 8s$) intenses ($H_s > 3m$, jusqu'à 5m fin décembre).

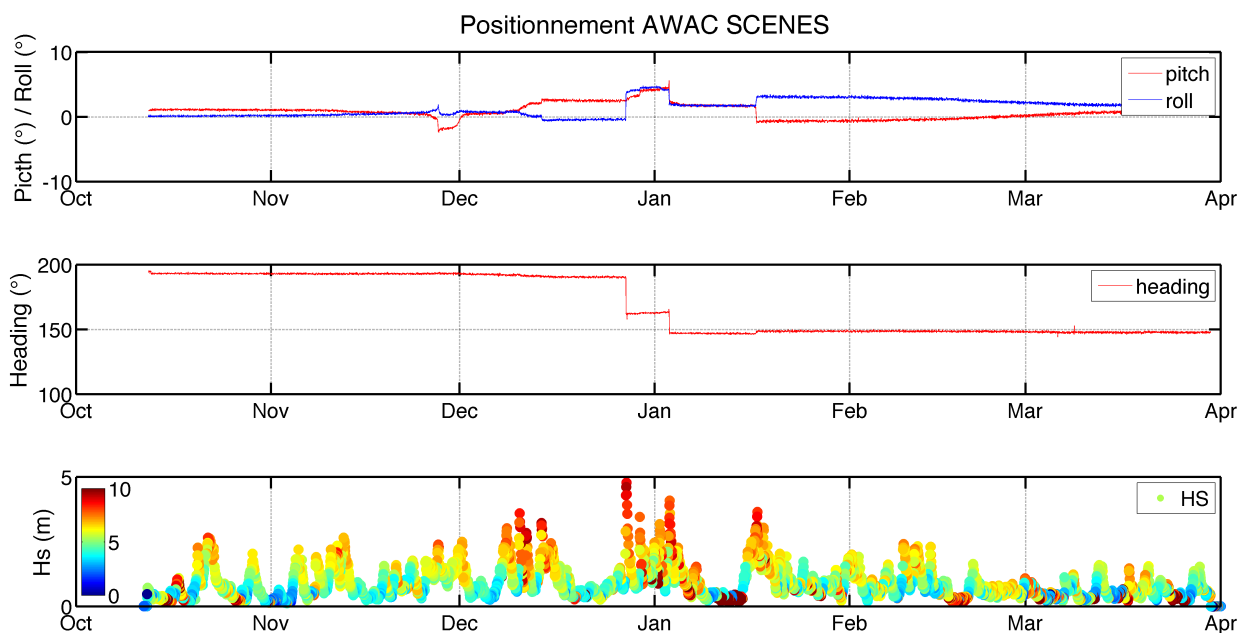


Figure 21 : Positionnement dans l'espace de l'AWAC entre octobre 2017 et avril 2018. Haut : pitch (°/verticale) et roll (°/verticale); Milieu : heading (°/Nord) ; Bas : hauteurs significatives de houle (m) (et période (s) en couleur)

Normalement, l'AWAC intègre les modifications du compas pour corriger en temps réel les données projetées dans le référentiel géographique Est/Nord/Vertical. Cependant, un examen détaillé des vitesses montre que les composantes barotropes Est et Nord diffèrent significativement à l'échelle des cycles de marée avant (P1) et après (P2) ces événements (Figure 23 et Figure 24). La correction manuelle du compas de l'AWAC de 26° permet de superposer correctement les deux composantes de la vitesse (Figure 21 et Figure 23). Cette modification du compas est également visible par comparaison entre les mesures

AWAC et les mesures ADCP réalisées à partir du NO Côtes de la Manche lors du Leg1 des campagnes PHRESQUES 2018 (Figure 25). On remarque alors qu'une correction manuelle du compas de 26° permet une comparaison optimale des deux jeux de données. Cependant, plusieurs points posent questions. Tout d'abord, l'AWAC enregistre toutes les 15' son compas et est censé corriger automatiquement toute modification du positionnement de la station, les données étant enregistrées en coordonnées géographiques. De plus, la correction angulaire à appliquer ne correspond pas à l'angle de rotation de la station. Cette modification de la direction des courants apparaît après une succession de tempêtes de fortes intensités, atteignant au maximum de hauteurs significatives de 5m pour une période moyenne de 8s, en faible profondeur (environ 18m à marée haute de VE). On pourrait se demander si ces événements extrêmes n'ont pas remodelé significativement l'environnement autour de la station SCENES, occasionnant une ré-orientation locale des courants. Dans la suite du rapport, le choix, arbitraire, a été de corriger la direction des courants, suivant le diagnostic des comparaisons ADCP entre les données SCENES et Côtes de la Manche.

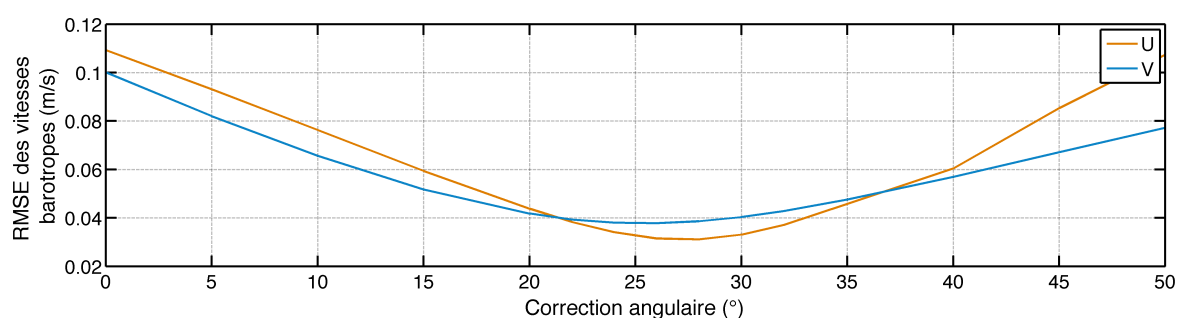


Figure 22 : Analyse de la correction angulaire sur les comparaisons des vitesses barotropes U et V.

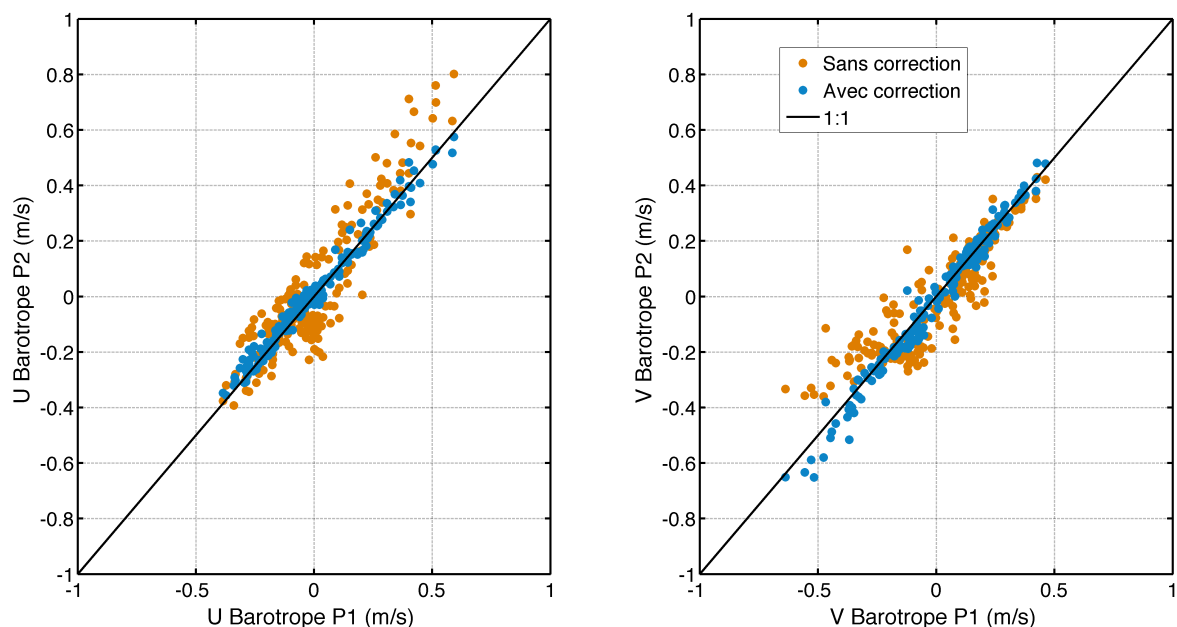


Figure 23 : Comparaison des vitesses barotropes (Est - gauche, Nord - Droite) avant (P1) et après (P2) la rotation de la station causée par les tempêtes successives de l'hiver 2017-2018. Orange : sans correction du compas, bleu avec correction (26°) du compas

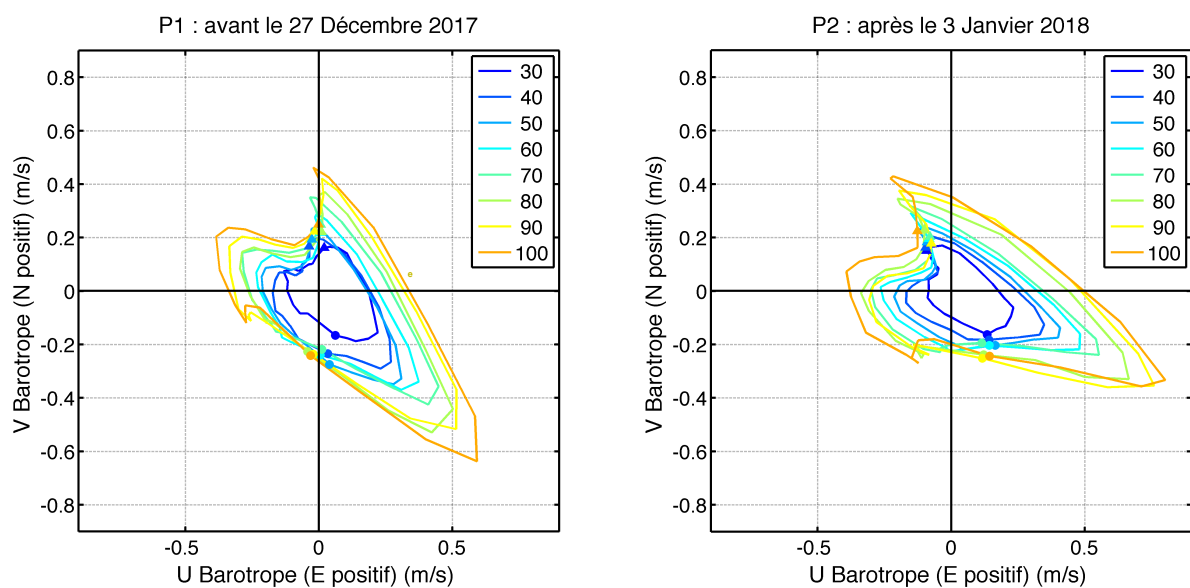


Figure 24 : Comparaison des ellipses de vitesses barotropes avant (P1) et après (P2) les épisodes de tempêtes et la rotation de la station (données brutes, non corrigées)

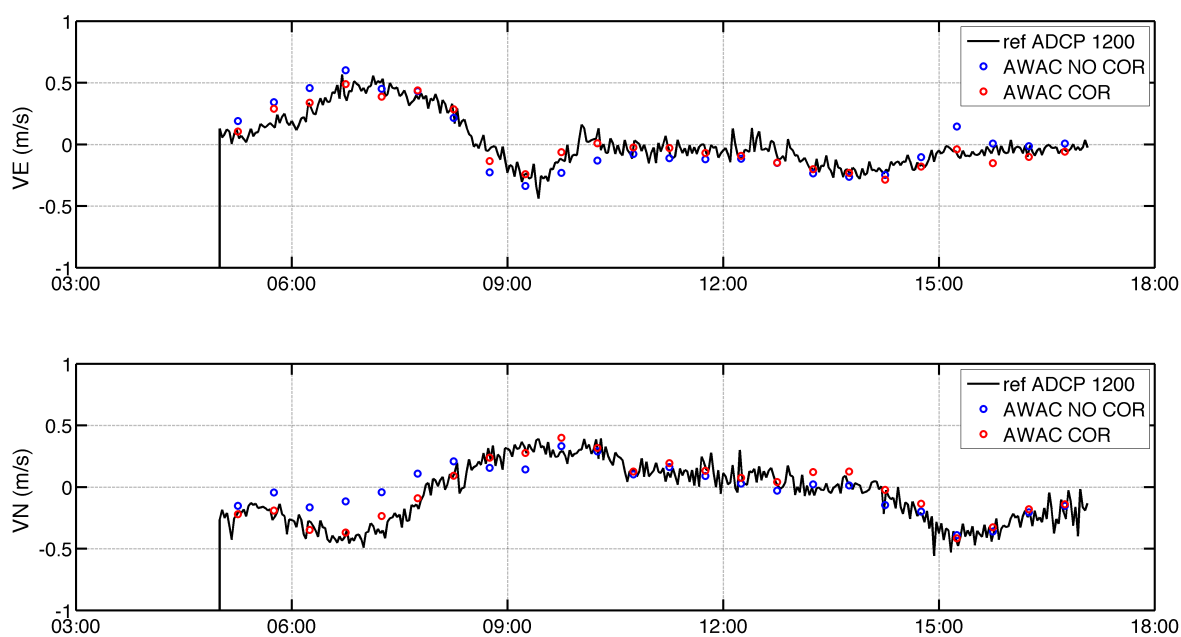


Figure 25 : Comparaison des mesures de courant (Est/Nord) enregistrées par l'ADCP de surface déployé pendant le leg1 (2018/02/16) des campagnes PHRESQUES et les mesures originales et corrigées de l'AWAC.

4 Synthèse des observations de la bouée SCENES entre Octobre 2017 et juin 2018

4.1 Calibration des capteurs optiques de turbidité

Les turbidimètres WETLABS de surface et de fond ont été calibrés à partir des prélèvements de surface et de fond réalisés lors des campagnes PHRESQUES 2018. Les mesures de turbidité des sondes déployées in situ sont alors confrontées aux prélèvements. Pour le capteur SN4555, déployé en surface entre octobre 2018 et février 2018, des données de calibration complémentaires ont été collectées en redéployant le capteur sur la cage Niskin utilisée pour collecter les prélèvements, en fin de Leg1 et pendant le Leg2. Après récupération en juillet 2018 lors du Leg3, le capteur de surface SN1652 était trop encrassé pour pouvoir également être redéployé en direct.

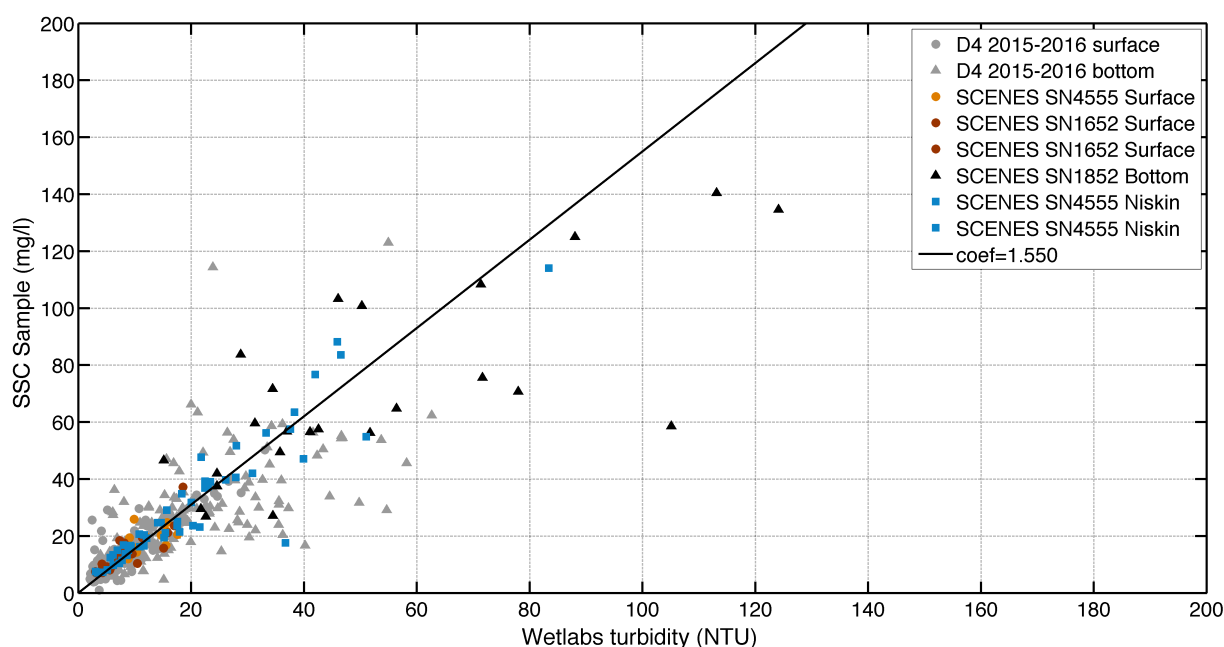


Figure 26 : Données de calibration des capteurs optiques Wetlabs déployés en surface et au fond sur la station SCENES.

L'ensemble des données de calibration sont présentées Figure 26, ainsi que les mesures 2015 et 2016 réalisées lors du déploiement de la bouée D4-Carosse sur le même site à partir de capteurs de même famille. De façon similaire aux données 2015 et 2016, aucune différenciation surface/fond des données n'est significativement observée. La totalité du jeu de donnée est donc mobilisée pour déterminer le coefficient de calibration NTU/mg/l. Deux critères sont retenus pour effectuer la calibration, i.e. obtenir le compromis optimal entre une incertitude normalisée (NRMSE) faible et un résidu normalisé le plus proche de 0. Le jeu de données est alors divisé en 6 classes de concentration en MES (inférieures à 10 mg/l, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 et supérieures à 50mg/l) et pour chacune des classes la NRMSE et le résidu moyen est calculé (Figure 27). En fonction des valeurs du coefficient de calibration, les RMSE normalisées optimales varient pour chaque classe. Toutefois, elles sont relativement proches globalement, comme le confirme la moyenne des NRMSE (Figure 28). Au contraire, l'analyse des résidus moyens par classe montre clairement que des valeurs de coefficient de calibration entre 1.5 et 1.6 présentent le moins de biais systématique, avec un minimum pour un coefficient de 1.55 mg/l/NTU (Figure 26). Cette valeur est retenue pour convertir les données optiques de turbidité de la station SCENES. Ces concentrations massiques sont alors associées à des incertitudes normalisées variant entre 20% et 45% en fonction des classes de concentration, pour une NRMSE moyenne de l'ordre de 30%.

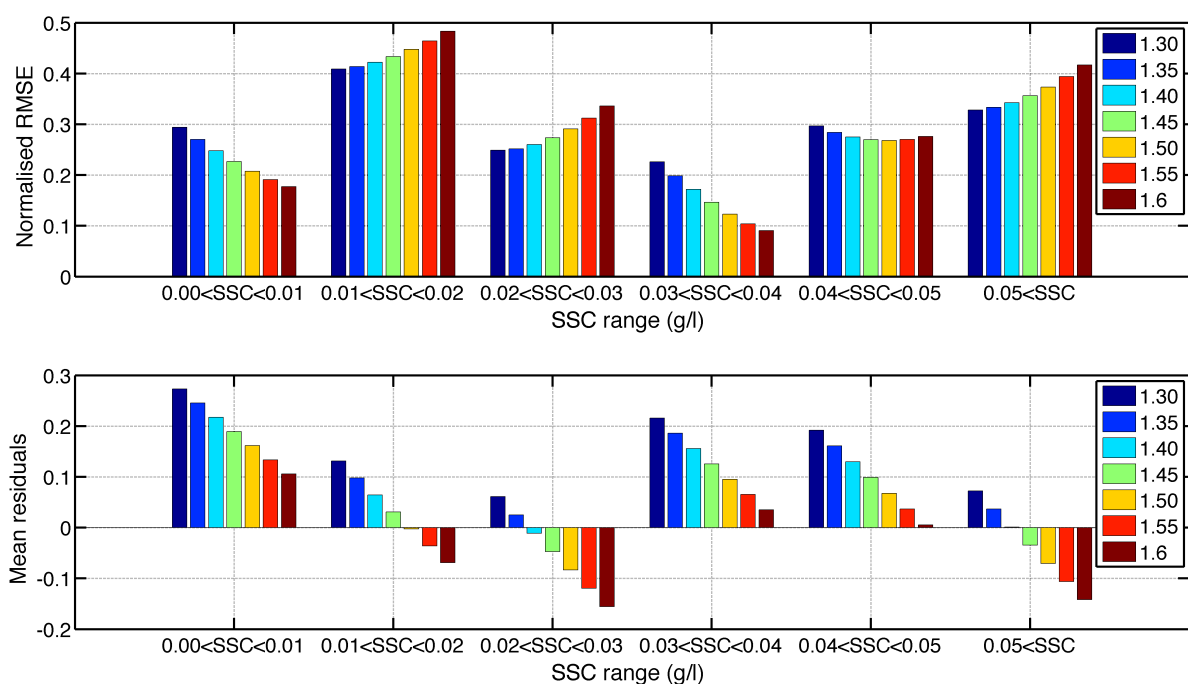


Figure 27 : Statistiques de calibration des capteurs optiques de turbidité par classe de concentrations et pour des coefficients de calibration variant de 1.3 à 1.6 mg/l/NTU : RMSE normalisée et résidus moyens normalisés par classe de concentration

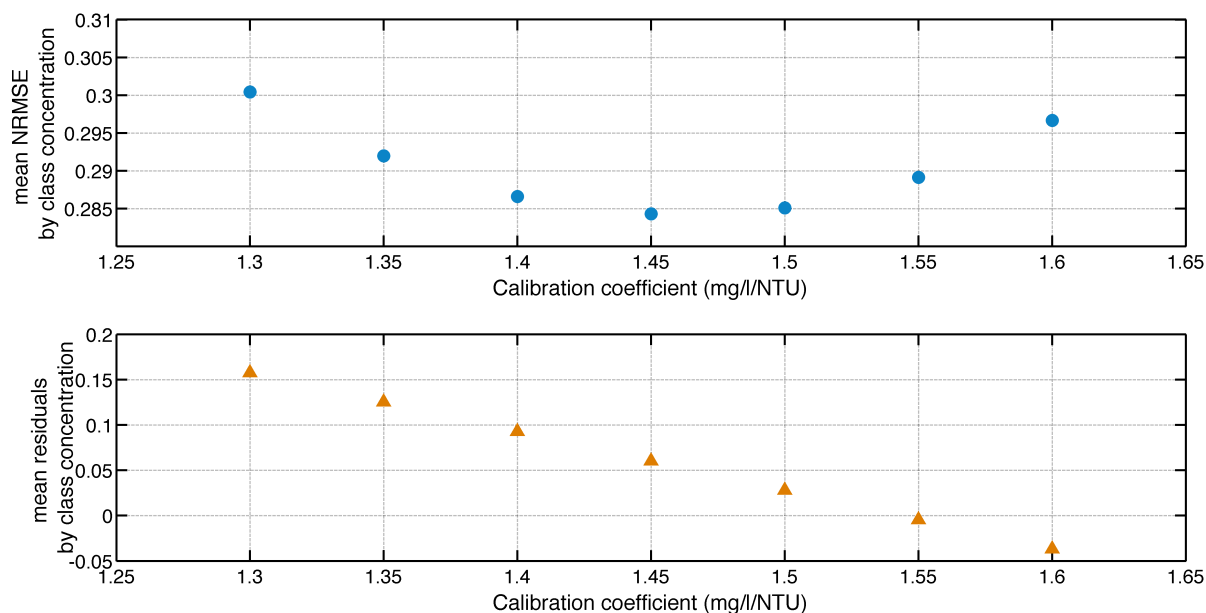


Figure 28 : Statistiques moyennes par coefficient de calibration en mg/l/NTU : RMSE normalisée moyenne et résidus moyens normalisés.

4.2 Variabilité des forçages hydrodynamiques

4.2.1 Courant barotrope, de surface et de fond, en l'absence de vent

La marée constitue le principal forçage hydrodynamique à l'embouchure de l'estuaire de Seine. Les courants de marée sur l'ensemble de la colonne d'eau sont mesurés par le courantomètre AWAC, toutes les 30min. Un exemple de la dynamique tidale à l'échelle d'un cycle vives eaux/mortes eaux est présenté Figure 29. Le maximum de vitesse est observé en flot de VE, 1h après la BM, atteignant près de 1m/s, dirigé vers l'amont (direction Sud-Est), distribué de façon quasi homogène sur l'ensemble de la colonne d'eau. Autour de la PM, le courant est plus cisailé, avec une vitesse importante en surface et quasi nulle au fond. Le jusant, d'intensité plus faible que le flot (autour de 0.5 m/s en VE) est également cisailé, avec un courant plus fort en surface. Si deux semaines de mesures sont présentées ici, près de six mois sont actuellement disponibles. Dans la suite de cette section, nous allons étudier le courant barotrope, avant de s'intéresser au courant de surface (intégré entre 1 met 3m sous la surface) et de fond (intégré sur les 3m au dessus du fond). Dans les deux cas, cette étude se limite aux situations sans vent (i.e. avec un percentile 90 du vent par cycle de marée inférieur à 10m/s). Les données disponibles actuellement correspondant à l'hiver 2017/2018, ce critère de vent est certainement trop élevé, i.e. des épisodes de vent pouvant impacter la circulation ont pu être pris en compte. Ces statistiques seront reprises après collecte des nouveaux jeux de données.

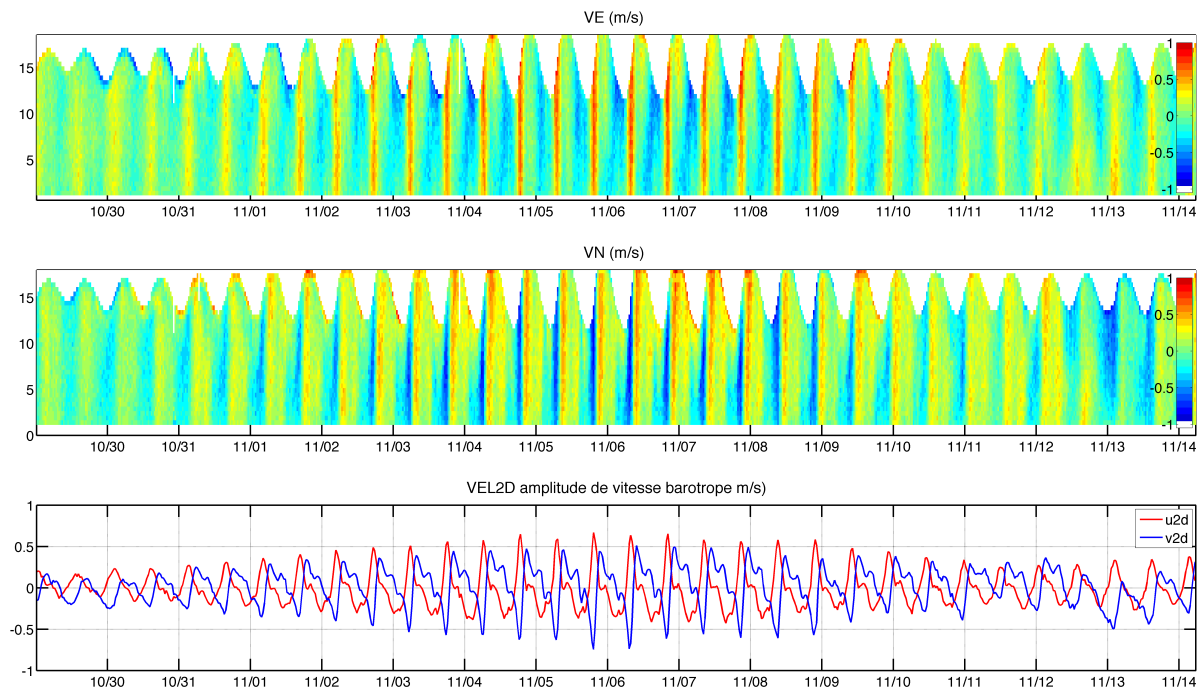


Figure 29 : Dynamique de marée à l'échelle d'un cycle vive eau/morte eau à la station SCENES : composantes horizontales de la vitesse sur l'ensemble de la colonne d'eau et vitesses barotropes.

4.2.1.1 Courants barotropes

Afin de produire une analyse synthétique de la dynamique du forçage barotrope, les mesures sont analysées par cycles de marée. La variabilité des deux composantes de la vitesse est analysée Figure 30. L'influence du marnage est retrouvée, avec des vitesses faibles en ME et des vitesses maximales en VE quelque soit la phase du cycle de marée. Ces données sont alors moyennées par classe de coefficient de marée, afin de construire des ellipses de courant de marée représentatives : chaque cycle tidal est discrétisé toutes les 30min, entre deux basses mers. Pour chaque cycle, les données référencées à la même heure par rapport à la BM sont moyennées, aboutissant à une ellipse moyenne par classe de coefficient de marée (Figure 31). Ces ellipses sont ensuite superposées pour comparaison. De plus, l'hodographe correspondant est construit (Figure 32). Quelle que soit la classe de coefficient, l'allure des ellipses de

courant est identique : le flot est dirigé Sud Est (maximum de 0.9m/s en flot), puis tourne en sens antihoraire vers le nord en fin de flot, début de pleine mer (courant de Verhaule), avec une pointe de vitesse comprise entre 0.2m/s et 0.4m/s de ME à VE. A pleine mer le courant décroît jusqu'à atteindre une intensité inférieure à 0.1m/s. Le jusant se met ensuite en place, de direction Nord Ouest à Sud Ouest en fin de jusant. A l'approche de la basse mer le courant décroît, atteignant 0.2m/s dirigé Sud. Les odographes montrent un résiduel de marée très faible, légèrement Nord en ME et Nord Ouest en VE (pour l'étude des courant barotropes, l'hodographe réalisé est celui des débits cumulés, afin d'intégrer la variabilité de la hauteur d'eau).

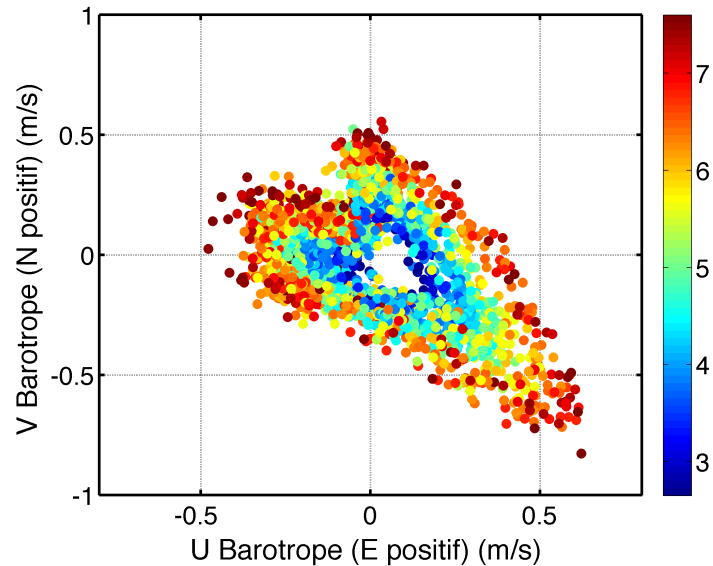


Figure 30 : Distribution des composantes Est et Nord de la vitesse barotrope en fonction du marnage (couleur).

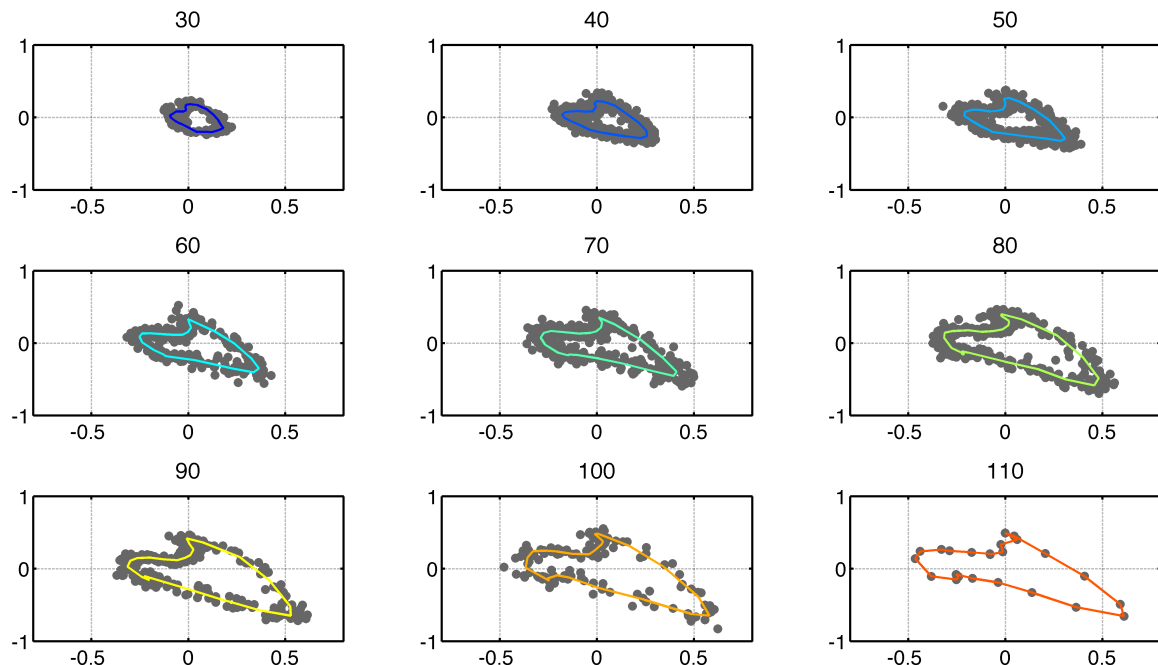


Figure 31 : Calculs des ellipses de marée moyenne par classe de coefficient de marée pour les courants barotropes.

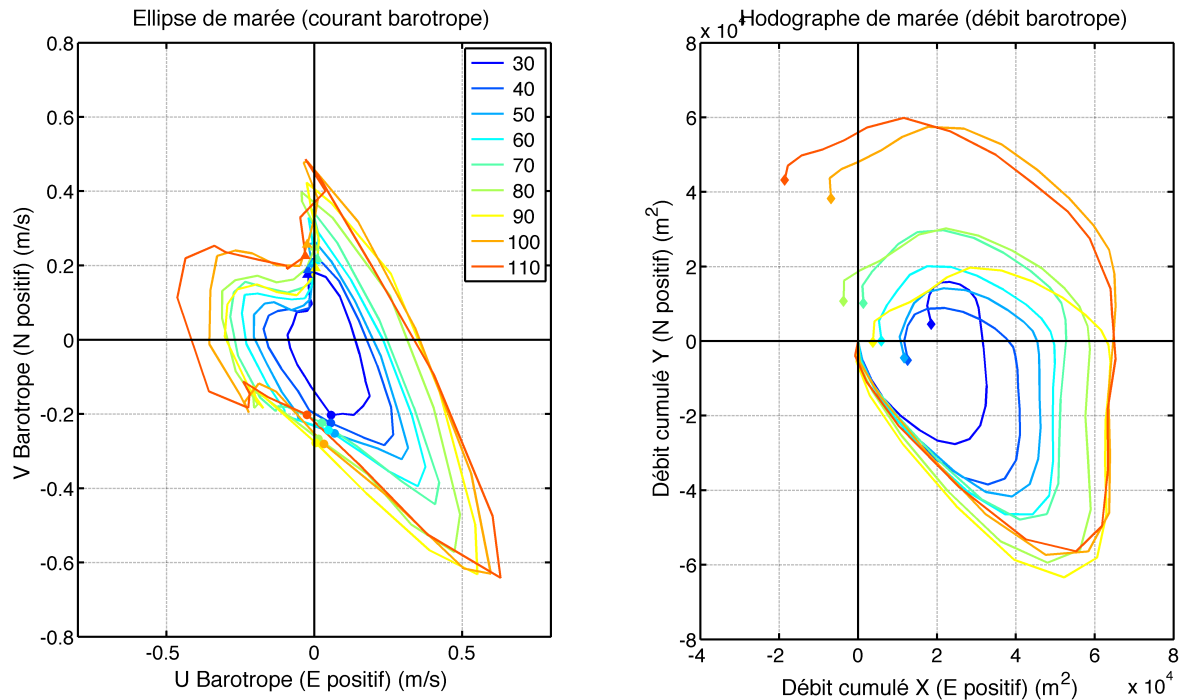


Figure 32 : Ellipses de marée moyennes par classes de coefficient de marée et hodographe de marée associé calculés à partir des débits (courants barotropes x hauteur d'eau). Exemple : classe 30 intègre l'ensemble des cycles de marée dont le coefficient est compris entre 30 et 40. Gauche : les ronds indiquent l'heure de basse mer tandis que les triangles indiquent la pleine mer. Droite : le rond indique la position finale de l'hodographe, en fin de marée.

4.2.1.2 Courant de surface et de fond

Une analyse similaire est réalisée pour les courants de surface (Figure 33) et de fond (Figure 34). En surface, le courant de flot est rapide et intense, dirigé Sud Est, avec une pointe de flot autour de 1 m/s en VE, décroissant en dessous de 0.4m/s en ME. Le courant de surface s'oriente ensuite Nord/Nord Est en début de basse mer avec des vitesses autour de 0.5m/s avant de passer par un minimum à l'étalement de basse mer. Contrairement au courant barotrope, le courant de surface se caractérise par une orientation clairement définie Ouest /Nord Ouest. En jusant de vive eau la pointe de jusant s'établit autour de 0.7m/s, décroissant à 0.3m/s en morte eau. Les hodographes montrent clairement un résiduel de courant vers le Nord/Nord Ouest de l'ordre de 0.05m/s en morte eau et jusqu'à 0.15m/s orienté Nord en vive eau.

Les courants de fond présentent des intensités plus faibles sur l'ensemble du cycle de marée, avec un courant maximum au flot de vive eau de 0.7m/s (en moyenne). Si le courant de flot est également orienté Sud Est au fond, la pointe de courant observée en fin de flot/début de pleine mer en surface est moins marquée, et principalement orientée Nord. Le courant de jusant est de faible intensité et tournant Ouest/Sud Ouest associé à des valeurs de 0.4m/s maximum. Les hodographes de fond montrent un flux résiduel faible, tournant Sud Est à Sud Ouest entre vives eaux et mortes eaux, associé à des courants résiduels inférieurs à 0.05m/s.

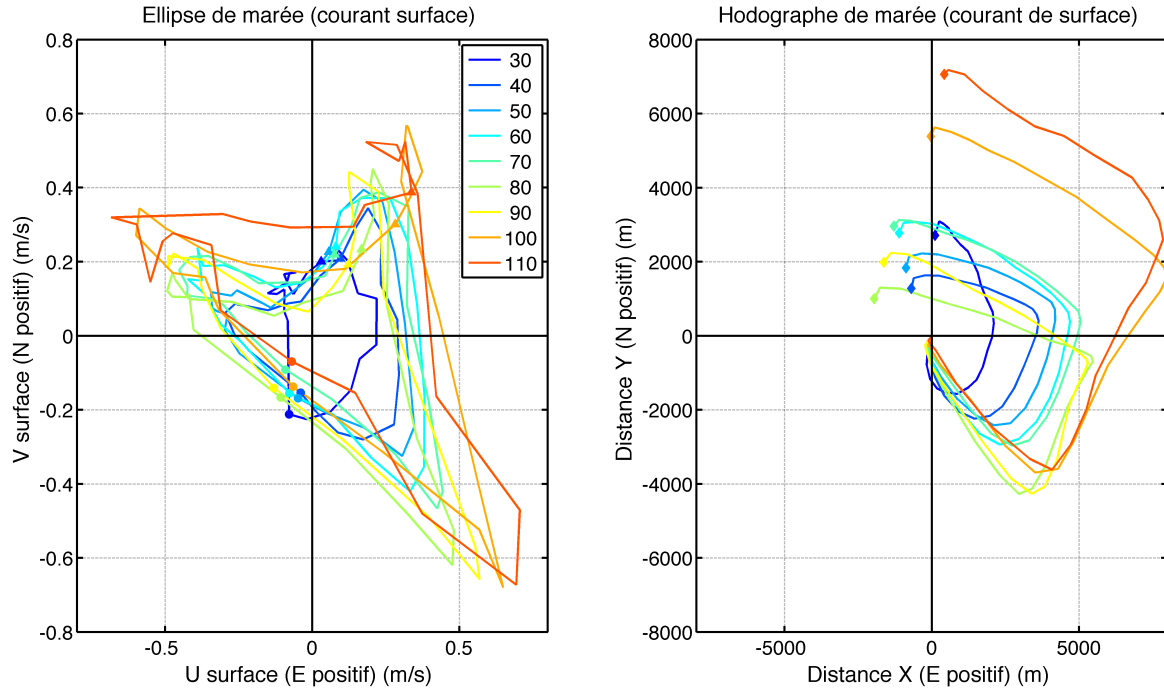


Figure 33 : Ellipses de marée moyennes par classes de coefficient de marée et hodographe de marée associé calculés à partir des courants de surface. Exemple : classe 30 intègre l'ensemble des cycles de marée dont le coefficient est compris entre 30 et 40. Gauche : les ronds indiquent l'heure de basse mer tandis que les triangles indiquent la pleine mer. Droite : le rond indique la position finale de l'hodographe, en fin de marée.

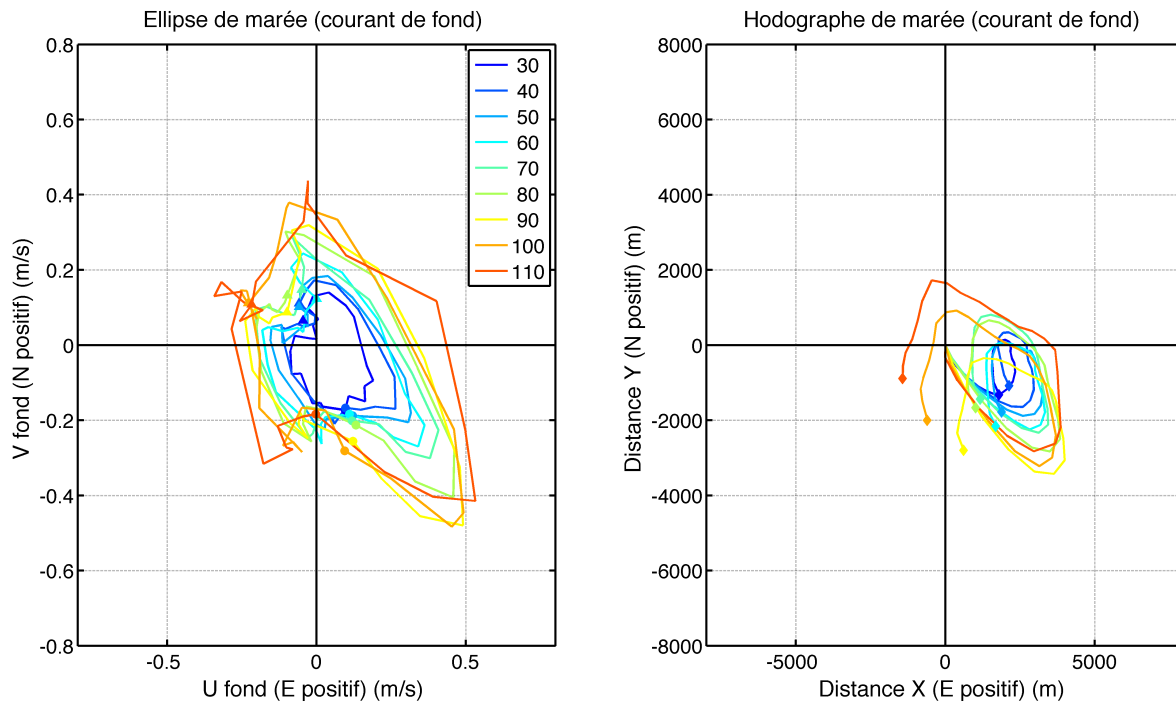


Figure 34 : Ellipses de marée moyennes par classes de coefficient de marée et hodographe de marée associé calculés à partir des courants de fond. Exemple : classe 30 intègre l'ensemble des cycles de marée dont le coefficient est compris entre 30 et 40. Gauche : les ronds indiquent l'heure de basse mer tandis que les triangles indiquent la pleine mer. Droite : le rond indique la position finale de l'hodographe, en fin de marée.

4.2.2 Événements météorologiques

Au delà de la dynamique de marée, le forçage météorologique est fortement présent à l'embouchure de l'estuaire de Seine. Les mesures d'intensité et de direction du vent réalisées par la station SCENES permettent de visualiser la chronologie des événements météorologiques entre octobre 2017 et aout 2018. En fin d'automne et pendant tout l'hiver 2017/2018, de nombreuses tempêtes se sont succédées (Figure 35 et Figure 36). On peut ainsi pointer les événements suivants : ouragan Ophelia mi octobre 2017, tempêtes Ana (10/12), Bruno/Carmen (26-30/12), Eleanor (2-4/01), Fionn (16-18/01) et Emma (26-28/03). Ces différents événements se caractérisent par des vents supérieurs à 15m/s, principalement de direction Ouest/Nord Ouest. Seule la tempête Emma fin février/début mars se caractérise par des vents orientés Est. Au delà des principales tempêtes, l'hiver 2017/2018 est associé à de grandes périodes venteuses, dépassant régulièrement 10m/s. Le printemps et l'été 2018 sont plus calmes, avec un seul coup de vent majeur fin avril/début mai dépassant 15m/s et orienté Nord.

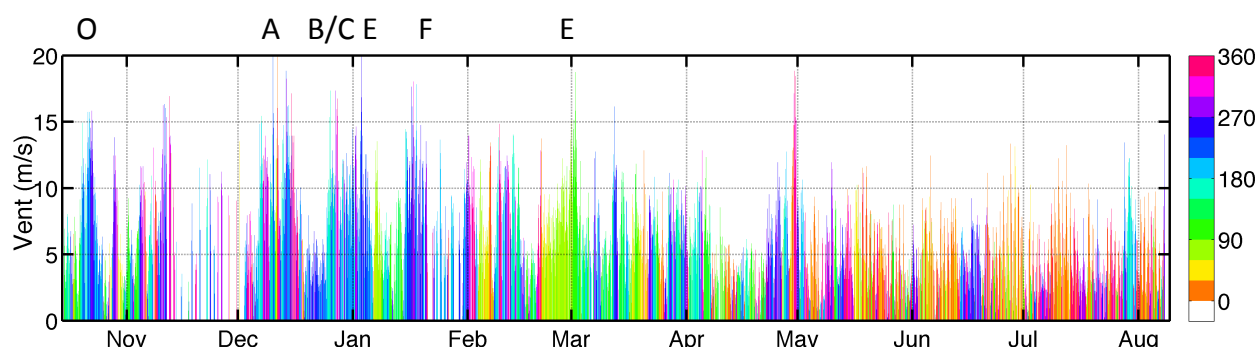


Figure 35 : Série temporelle de l'intensité et de la direction du vent (direction convention météorologique) mesurés par la station SCENES entre octobre 2017 et Aout 2018. Les lettres précisent les principaux événements météorologiques : tempêtes Ophelia, Ana, Bruno/Carmen, Eleanor, Fionn, Emma.

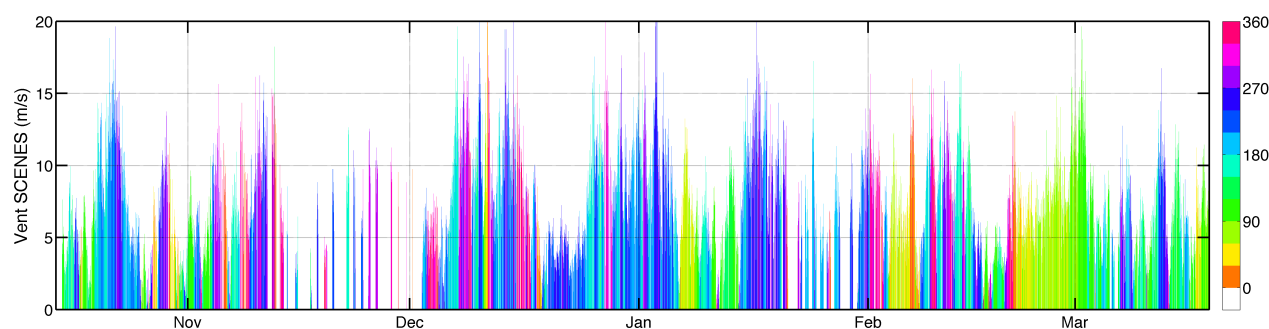


Figure 36 : Evènements météorologiques pendant l'hiver 2017-2018 observé par la station SCENES

4.2.3 Modification des courants barotropes et de surface par le vent

Nous nous intéressons ici à l'influence que peuvent avoir les coups de vent sur la circulation barotrope et de surface. Ces cas ne sont que des exemples, qui dépendent essentiellement du phasage entre la marée et l'intensité/direction du vent. Un vent d'Ouest/Nord Ouest décale l'ellipse de marée vers le Nord Est (Figure 37). La pointe de flot n'est pas clairement renforcée, mais elle se trouve ré-orientée plus Est. Dans ce cas, le résiduel de débit de marée se caractérise par un flux Nord/Nord Est. Un vent de Sud le 15 Décembre 2017 contribue à renforcer la composante Nord/Nord Ouest du courant barotrope, essentiellement lors de la pleine mer (Figure 38), avec pour conséquence un flux résiduel légèrement orienté vers le Nord Ouest. Le 03 Mars, un coup de vent de Nord translate les courants vers le Sud, avec dans le cas présenté un flux résiduel orienté Sud/Sud Est (Figure 39).

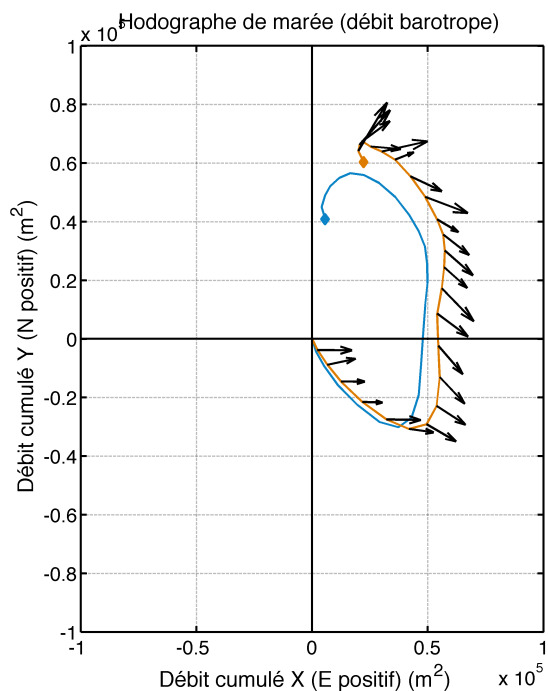
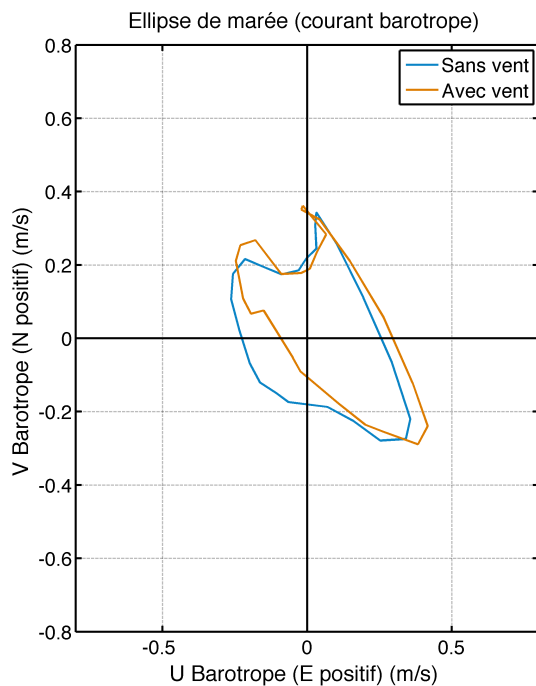


Figure 37 : Influence du vent d'Ouest/Nord Ouest sur les courants barotropes : Exemple du 10 Décembre 2017 (Ana)

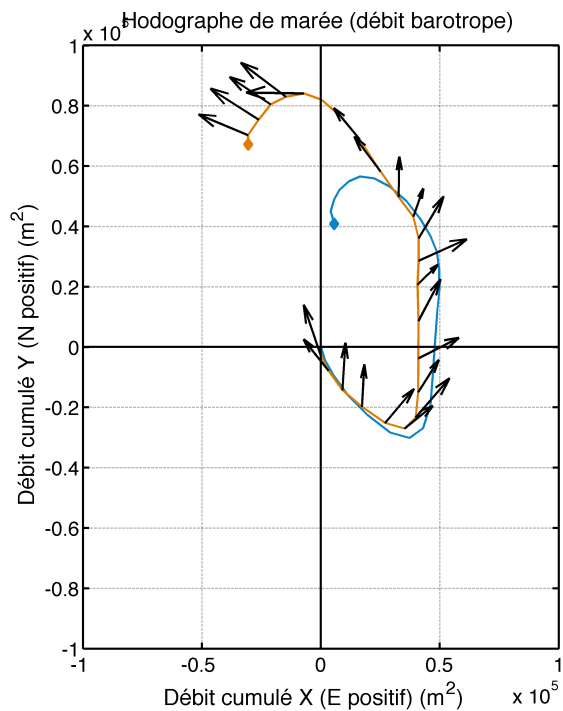
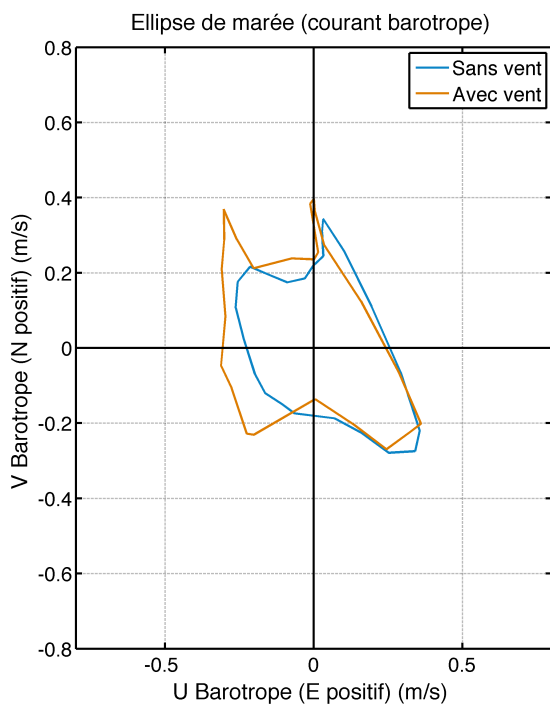


Figure 38 : Influence du vent de Sud/Sud Est sur les courants barotropes : Exemple du 15 décembre 2017

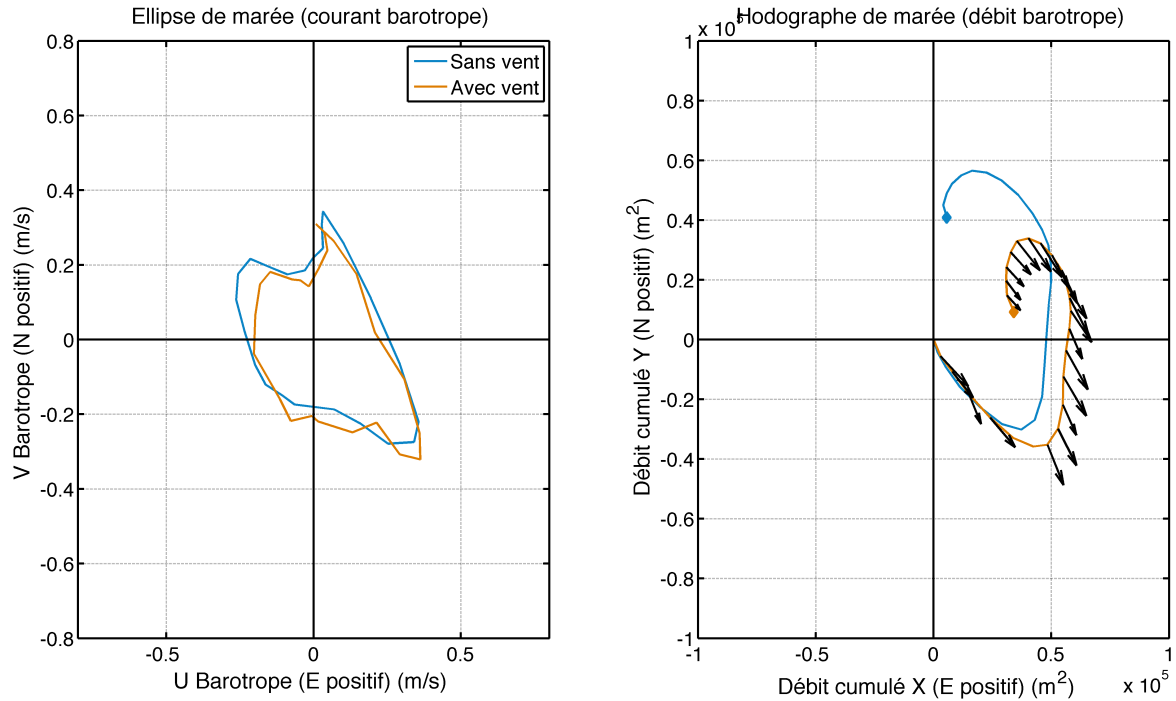


Figure 39 : Influence du vent de Nord sur les courants barotropes : Exemple du 03 mars 2018

Concernant la dynamique de surface, les effets sont similaires mais plus intenses. Les vents d'Ouest s'accompagnent d'une intensification des courants vers le Nord Est, et une augmentation du flux résiduel vers le Nord/Nord Est, associé à une vitesse résiduelle de l'ordre de 0.3m/s dans le cas présenté (Figure 40). Les vents Nord et Sud présentent des dynamiques inversées par rapport à la direction du vent. Ainsi, lors du coup de vent de sud tournant Est en jusant du 15 Décembre 2017, le courant de surface est renforcé en direction de l'Est, avec un résiduel de marée également décalé Est (Figure 41). Le coup de vent de Nord du 14 mars 2018 (Figure 43) est associé à un renforcement de la composante Nord du courant de surface, sur l'ensemble du cycle de marée. En conséquence, le résiduel de marée est orienté Ouest/Nord Ouest pour cet exemple, qui pourrait laisser supposer la mise en place d'un tourbillon à l'Ouest de la Carosse. Un vent d'Est (7 février 2018, Figure 42) renforce la composante Est et Sud du courant de surface, et génère un résiduel orienté Sud Est.

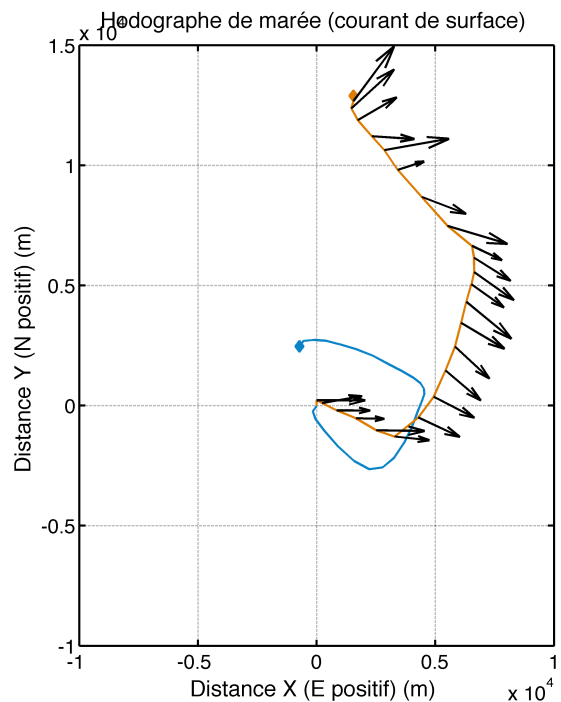
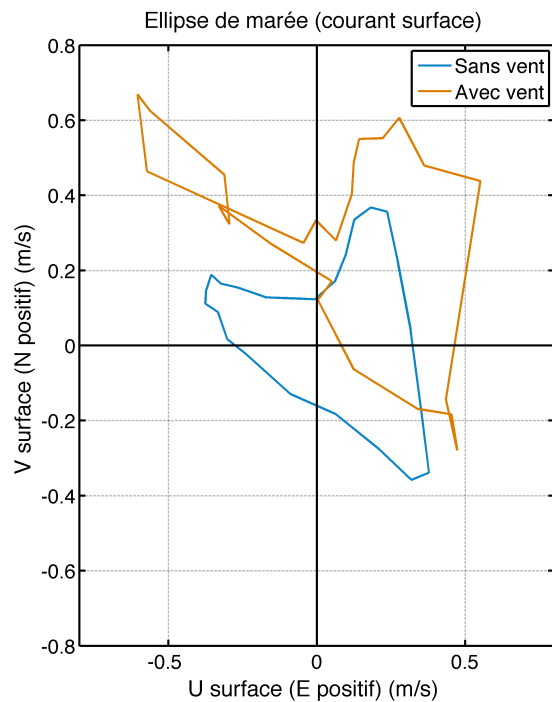


Figure 40 : Influence du vent d'Ouest/Sud Ouest sur les courants de surface : Exemple du 10 Décembre 2017

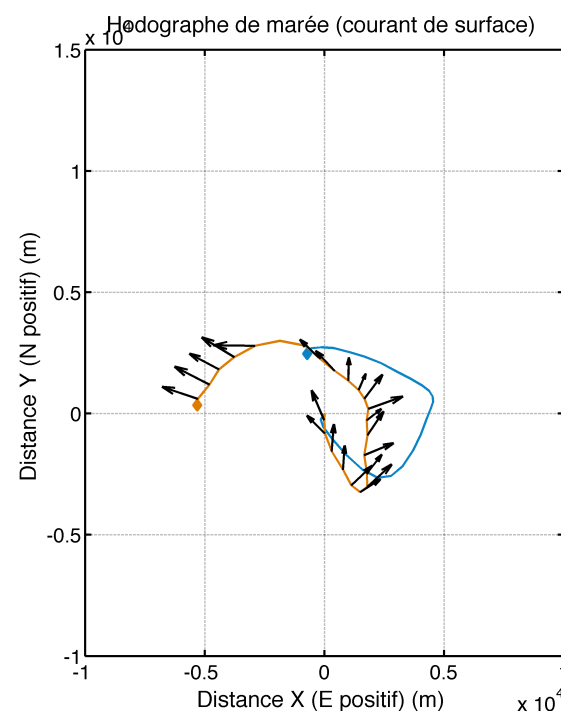
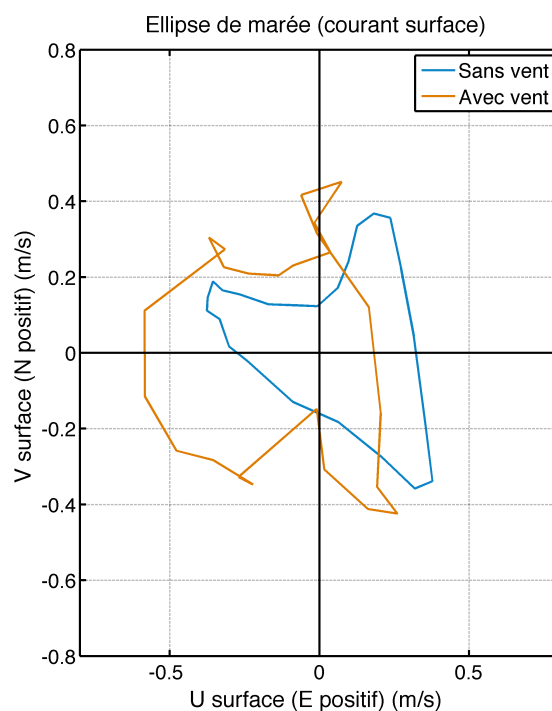


Figure 41 : Influence du vent de Sud sur les courants de surface: Exemple du 15 Décembre 2017

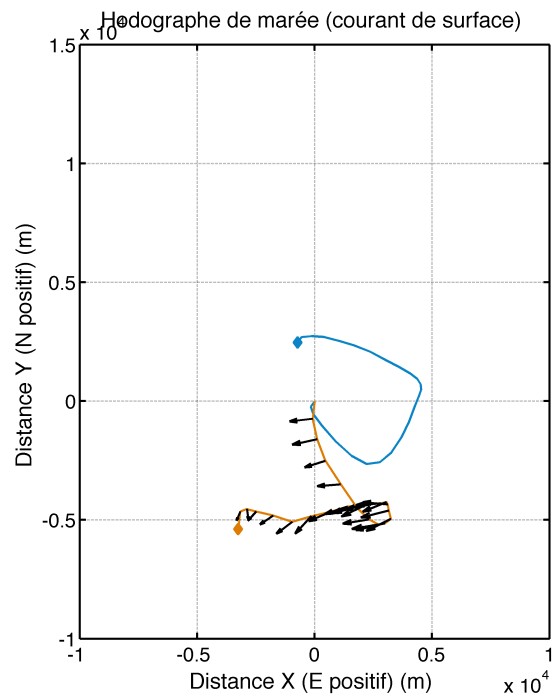
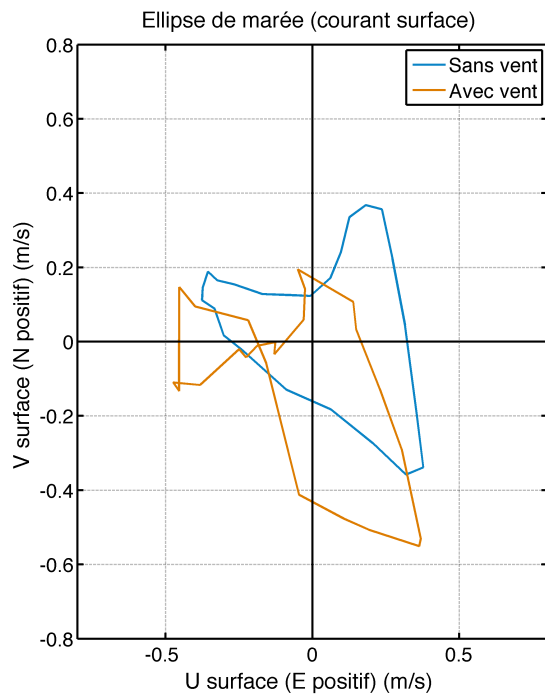


Figure 42 : Influence du vent d'Est sur les courants de surface: Exemple du 7 février 2018

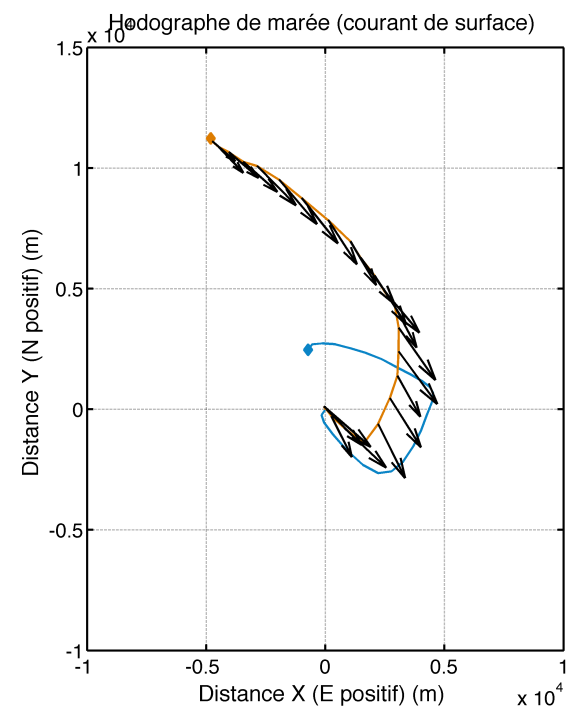
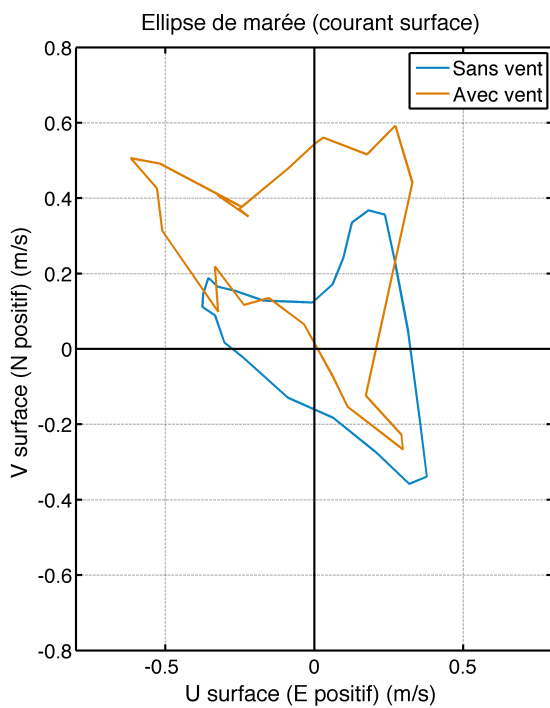


Figure 43 : Influence du vent de Nord sur les courants barotropes : Exemple du 14 mars 2018

4.2.3.1 *Situation du 24 décembre 2017 au 10 janvier 2018 : les tempêtes Bruno, Carmen et Eleanor*

La période du 24 décembre 2017 au 10 janvier 2018 voit passer trois tempêtes en 10 jours : Bruno, Carmen et Eleanor (Figure 44), associées à des coups de vents souvent supérieurs à 10m/s. La première semaine (du 24 au 31 décembre 2017) correspond à des coefficients de morte eau, et la semaine du 1^{er} au 8 janvier (tempête Eleanor) à la vive eau.

Sans vent, les ellipses moyennes de marée successives se traduisent par un flux résiduel vers le Sud Est en morte eau puis par un flux de Nord Ouest en vive eau. Il faut rappeler ici que les ellipses moyennes calculées sont supposées ne pas inclure de vent fort, cependant le jeu de données actuel intégrant uniquement des données d'hiver et de début de printemps, le critère « d'absence » de vent est assez élevé. Ces calculs seront mis à jour lors de la récupération des données printemps/été 2018.

Il est intéressant de s'arrêter sur la dynamique résiduelle observée par l'AWAC lors de la période de forte tempête (Figure 45) : le début de morte eau, sans vent significatif, est associé à un flux de Nord Est (en contradiction avec les ellipses moyennes). Rapidement un premier coup de vent de Sud renforce ce flux de Nord Est. Un coup de vent violent de Nord Ouest autour du 27 décembre modifie la trajectoire vers l'Est/Sud Est. Les coups de vent successifs en revif et vive eau du 28 décembre au 5 janvier ré-orientent ensuite le flux résiduel vers le Nord puis Nord Ouest. Pendant la période de déchet, l'intensité du vent diminue hormis un coup de vent d'Est le 7 janvier, sans influence notable sur le flux résiduel, qui reste orienté Sud Est (ici en accord avec les ellipses moyennes de marée).

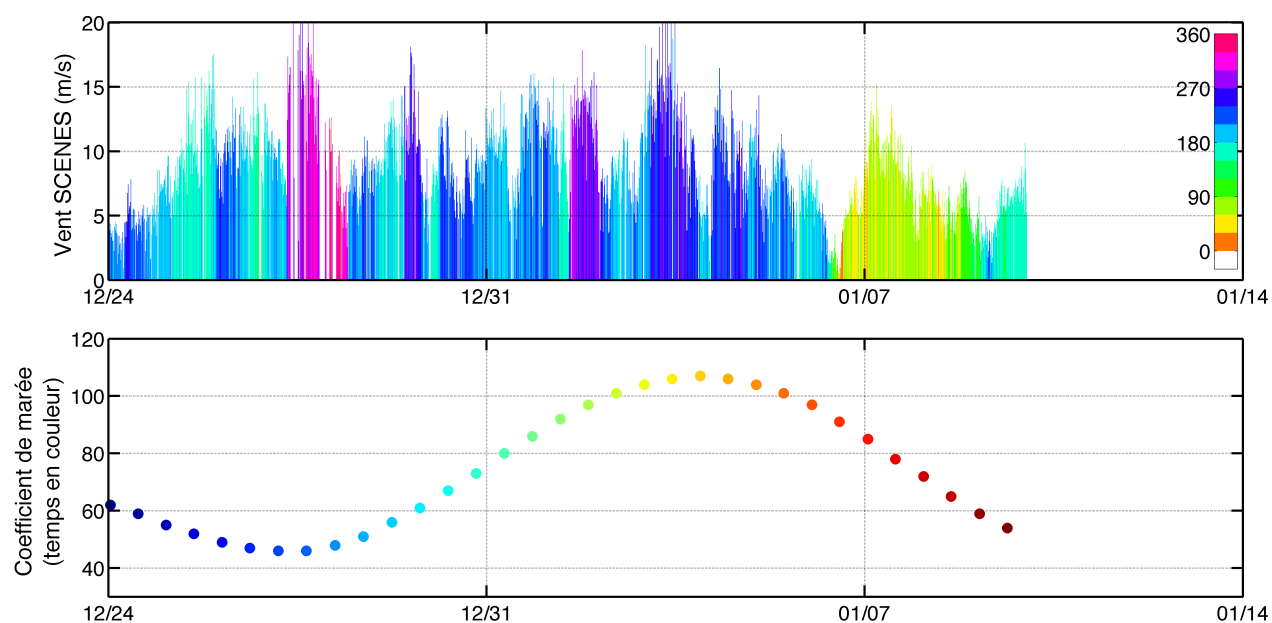


Figure 44 : Situation météorologique (haut) et coefficients de marée (bas) entre le 24 décembre 2017 et le 10 janvier 2018. La couleur associée aux données de coefficient de marée fait référence à la chronologie temporelle, utilisée dans la Figure 45.

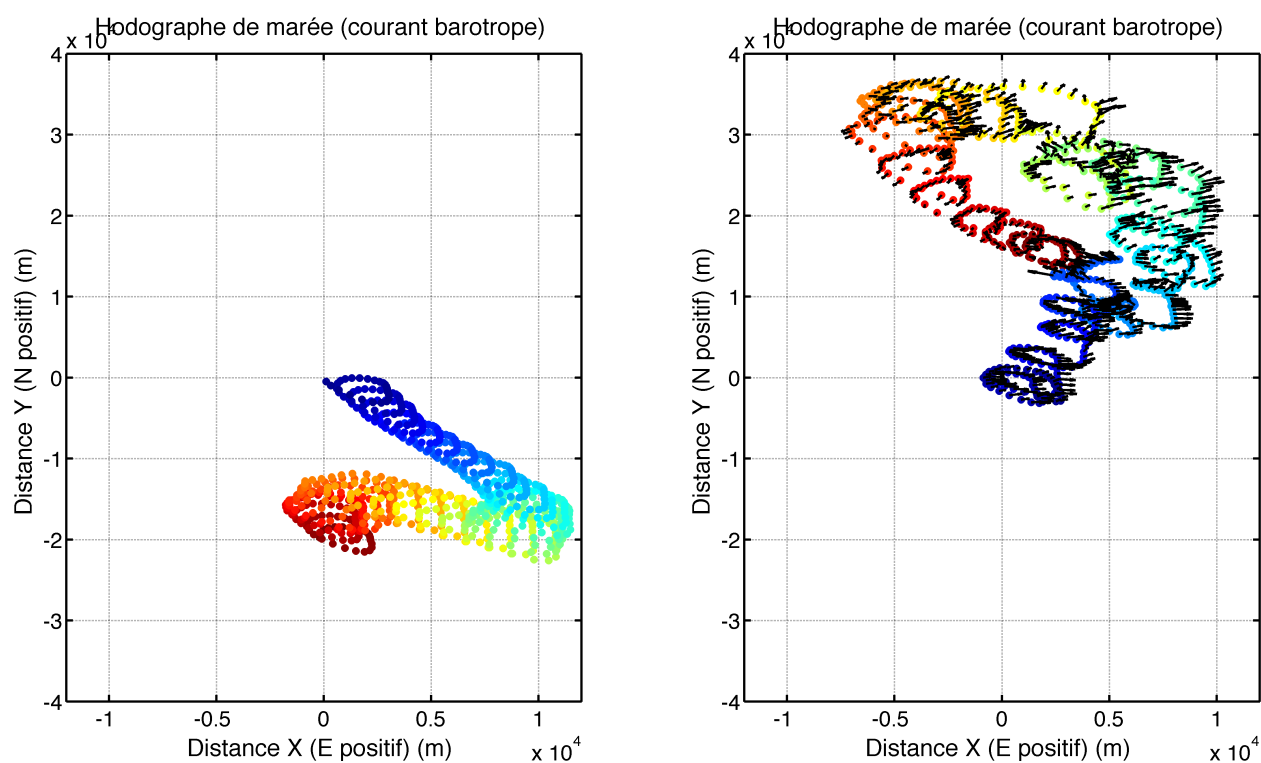


Figure 45 : Hodographe de marée théorique (gauche) sans vent et observée (droite) lors de la période du 24 décembre 2017 au 10 janvier 2018. La couleur de la figure de droite fait référence au temps écoulé sur la période, les flèches rappellent l'intensité et la direction du vent

4.2.4 Etats de mer

Outre l'impact sur la circulation générale, le vent contrôle également les états de mer. Ainsi, les différents coups de vent observés sur la période octobre 2017 – avril 2018 sont ils souvent associés à des observations de houle significatives (Figure 46). Les principales tempêtes associées à ces vents d'Ouest et de Nord Ouest génèrent des houles supérieures à 2m et de période entre 6 et 10s. Assez généralement, les houles les plus importantes sont associées aux périodes les plus longues, comme par exemple mi décembre, fin décembre et début janvier, et mi janvier (Figure 46 et Figure 47). Par vent de Nord Est une houle longue peut rentrer dans l'embouchure (7 janvier 2018) tandis que les vents d'Est ne génèrent qu'une faible agitation, du fait de la protection du continent et du fetch limité. Les coups de vent de Sud produisent principalement une mer de vent, avec une houle courte (entre 4 et 6s) pouvant atteindre 1m à 2m. Cette relation vent/vagues est illustrée Figure 48, avec des vagues de faibles amplitudes par vent de secteur Est, intermédiaires par vent de Sud et maximales par vent d'Ouest, Nord Ouest.

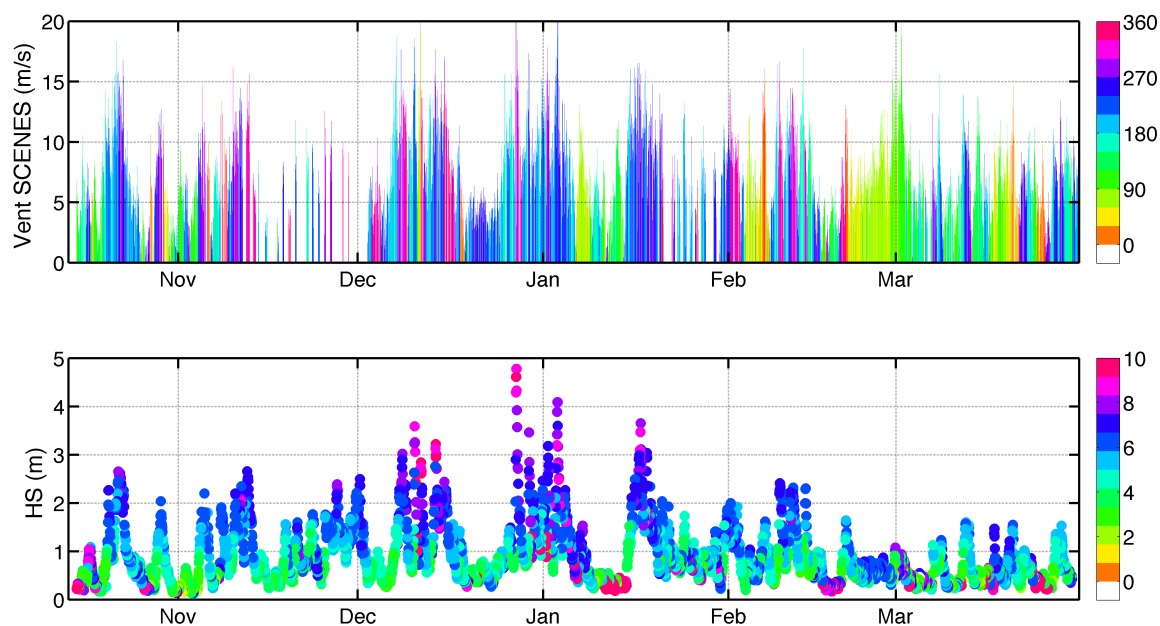


Figure 46 : Variabilité des états de mer durant l'hiver 2017-2018 mesuré par l'AWAC : hauteur significative des vagues (m) et période (s) en échelle de couleur.

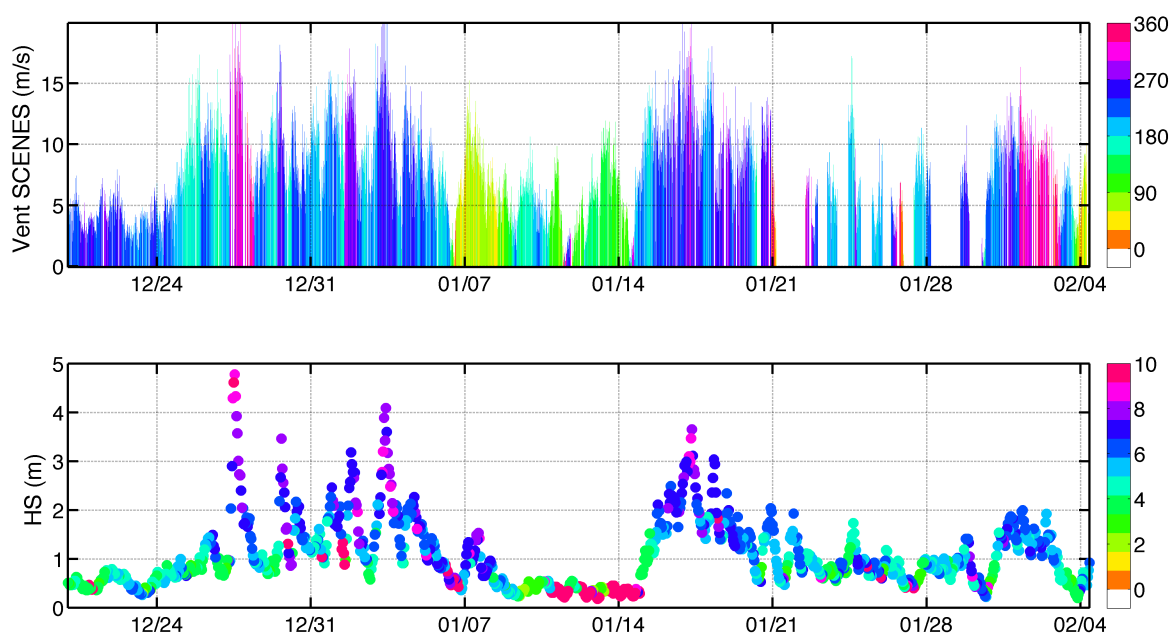


Figure 47 : Variabilité des états de mer : Focus sur les tempêtes Eléonor et Fionn

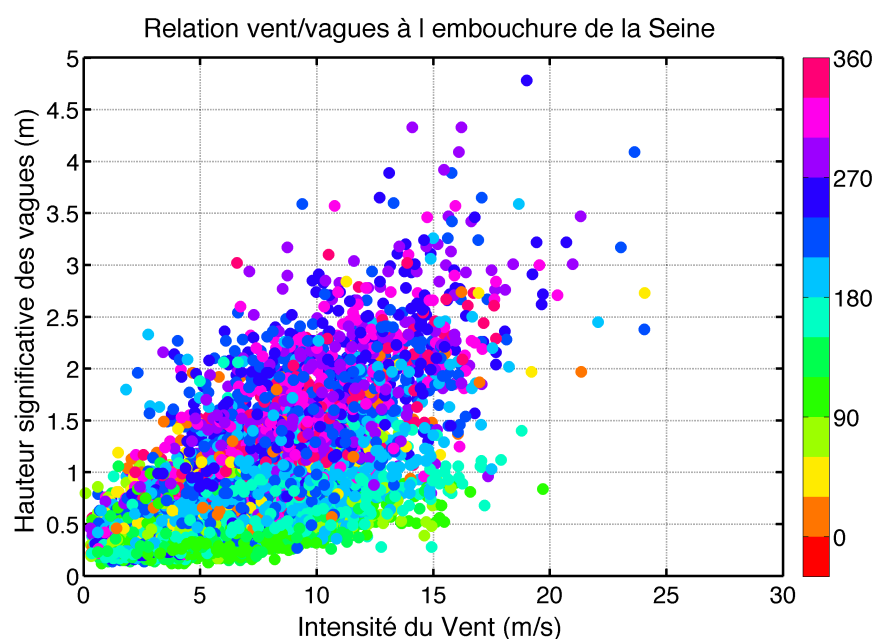


Figure 48 : Relation entre vent (intensité/direction) et vagues à l'embouchure de l'estuaire observé par la station SCENES

4.3 Evolution de la salinité de surface

Paramètre caractéristique des estuaires, la salinité est fortement dépendante du débit liquide de la Seine. Au cours de l'hiver 2017/2018, une situation météorologique exceptionnelle a conduit à une situation hydrologique particulière, avec une crue décennale de la Seine, qui démarre en décembre 2017 (le débit dépasse 1000m³/s fin décembre) et se termine en avril 2018 (le débit reste au dessus de 1000m³/s jusqu'à mi avril 2018), avec un débit maximum à 2200m³/s fin janvier/début février (Figure 49). Du fait des problèmes de mesure de salinité au fond, seule la donnée de surface sera analysée. Toutefois, les données collectées lors des campagnes PHRESQUES 2018 montrent que, si la salinité de surface varie fortement à l'échelle d'un cycle de marée et au cours de la saison, la salinité de fond, la variabilité de la salinité de fond est faible, avec pour valeur moyenne 30PSU (Figure 50).

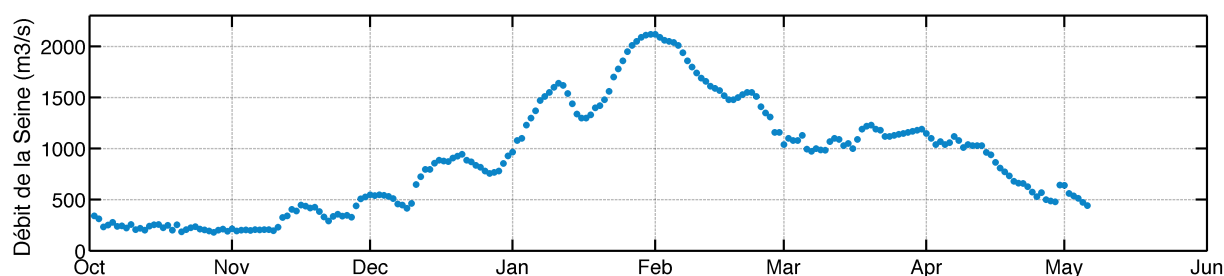


Figure 49 : Chronique de débit de la Seine entre octobre 2017 et mai 2018.

4.3.1 Dynamique tidale

La variation de la salinité à l'échelle du cycle de marée est illustrée par les différentes mesures CTD réalisées à partir du NO Côtes de la Manche en 2018 : une stratification est observée dans les premiers mètres sous la surface, plus ou moins marquée en fonction du débit de la Seine. Mi février, deux semaines après le pic de crue et avec un débit journalier de 1500m³/s, un panache dessalé est observé sur l'ensemble du cycle de marée sur une épaisseur de 5m, avec un minimum de salinité en surface autour de la

basse mer et un maximum de salinité en fin de flot. Début avril 2018, alors que le débit est toujours de 1000m³/s, la stratification est moins marquée mais toujours présente, excepté durant le flot. Une salinité minimale de 20PSU est observée en mi jusant. Fin juin, alors que le débit de la Seine atteint l'étiage, la salinité de surface avoisine les 30PSU sur l'ensemble du cycle de marée excepté en mi jusant, où elle atteint en surface une valeur de 25PSU.

Cette dynamique tidale est également observée par la bouée SCENES (mesure effectuée entre 0.5 et 1m sous la surface). Un exemple de la dynamique de la marée au cycle vive eau morte eau est proposé Figure 51, correspondant à la période d'étiage d'octobre 2017. Sur cet exemple, la salinité de surface oscille généralement entre un minimum autour de la basse mer et un maximum à pleine mer, quel que soit l'amplitude de la marée. On peut toutefois noter que la salinité est alors plus forte en vive eau qu'en morte eau, tant à basse mer qu'à pleine mer. Entre le 28 et le 30 décembre, un fort coup de vent d'Ouest est associé à une augmentation de la salinité jusqu'à la valeur moyenne observée dans la colonne d'eau. Passé le coup de vent, la salinité re-diminue, laissant présager d'une modification de la circulation de surface ou d'un mélange de la colonne d'eau.

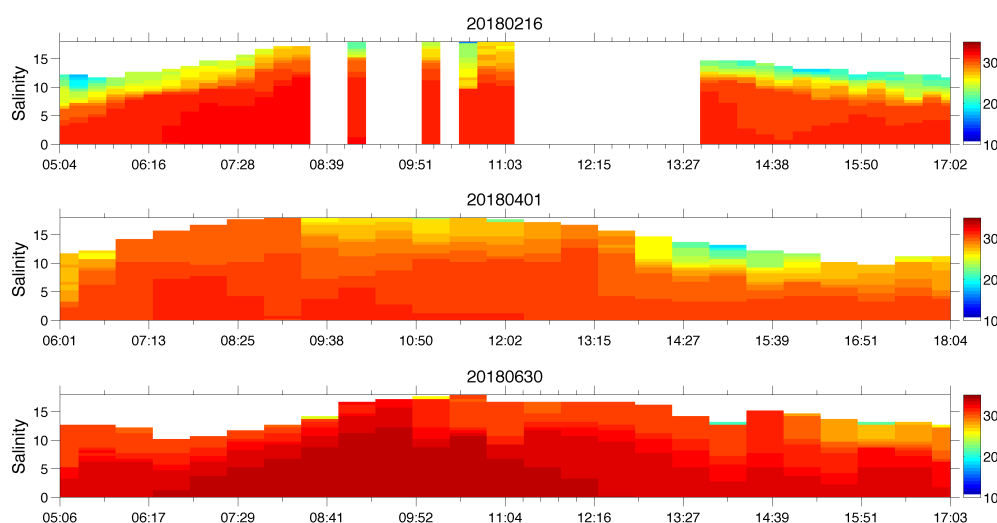


Figure 50 : Variabilité de la salinité à proximité de la station SCENES observée lors des campagne de calibration réalisées à partir du NO Côtes de la Manche en 2018 : haut : 16 février 2018 ; milieu 1^{er} avril 2018 ; bas 30 juin 2018.

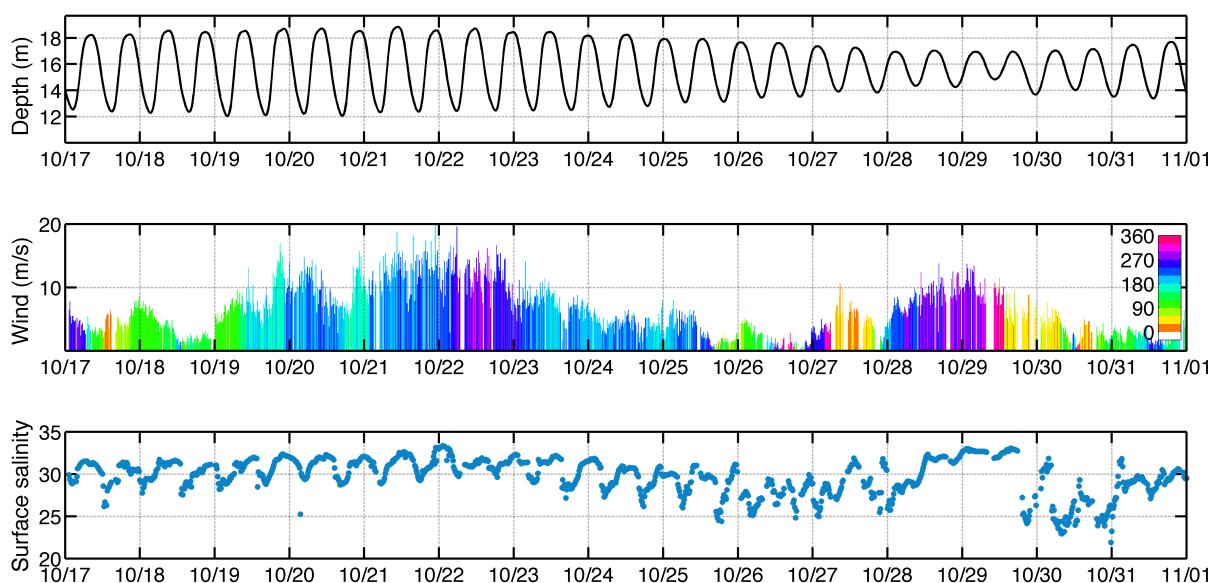


Figure 51 : Exemple de variabilité de la salinité de surface à SCENES à l'échelle d'un cycle vive eau/morte eau (octobre 2017)

4.3.2 Dynamique saisonnière

L'ensemble des données collectées sur 10 mois entre octobre 2017 et aout 2018 permet d'appréhender globalement la dynamique annuelle (Figure 52). La variabilité de la salinité de surface associée au débit liquide de la Seine, déjà illustrée ponctuellement Figure 50, est bien visible, avec une salinité forte centrée autour de 30PSU et peu variable en étiage (octobre-novembre 2017 et mai-aout 2018) et une salinité décroissante négativement corrélée à l'augmentation du débit, en hiver. Lors de cette période, la salinité varie fortement, entre 10 PSU et 32 PSU.

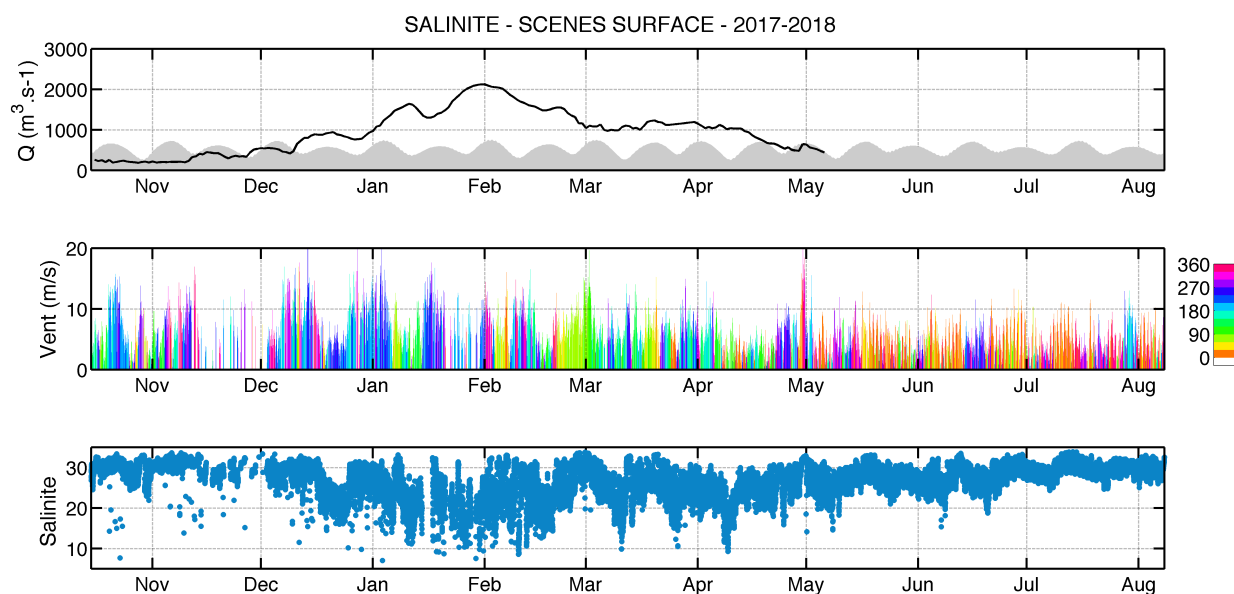


Figure 52 : Dynamique de la salinité de surface entre octobre 2017 et aout 2018, confronté aux principaux forçages : débit, marée (haut) et vent (milieu).

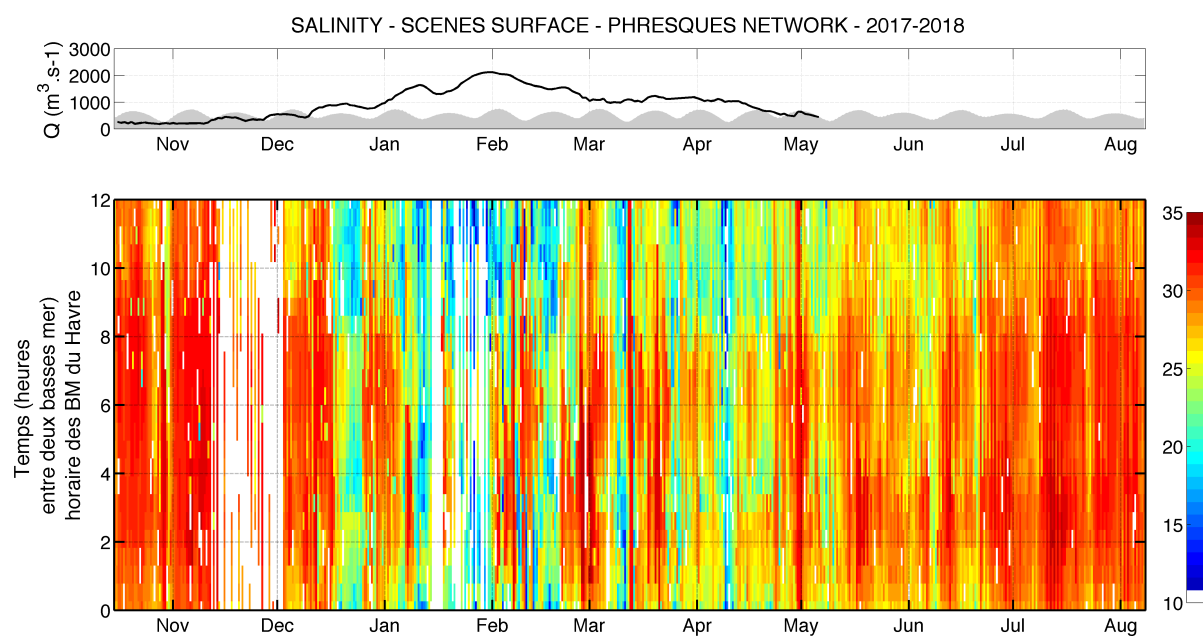


Figure 53 : Variabilité de la salinité de surface à SCENES, vue 2D : en ordonnée est présentée la distribution de la salinité (en couleur) à l'échelle de chaque cycle de marée, concaténés sur l'ensemble des marées sur la période d'étude.

La dynamique tidale haute fréquence à l'échelle de l'année est peu visible à l'aide d'une simple série temporelle, une vision 2D de la variation de la salinité est donc proposée Figure 53.

On peut ainsi observer que tout au long de la saison, la salinité est minimale à marée basse, et maximale autour de la pleine mer. Cette variation tidal est fortement modulée par le débit de la Seine : la salinité à basse mer est d'autant plus faible que le débit est fort. On peut également remarquer que par faible débit, sans coup de vent, la salinité à basse mer est plus faible en morte eau qu'en vive eau, du fait d'un mélange vertical plus faible par petit coefficient, favorable à la stratification. En période hivernale, fort débit et tempêtes dominent la dynamique, et cette relation n'est plus visible.

Une tentative de hiérarchisation des forçages sur la salinité de surface à basse mer est illustrée Figure 54. Si le contrôle majeur du débit est bien représenté, l'influence de marnage n'est pas marquée sur la période (à compléter avec la période d'étiage, données de débit manquantes). Le vent au contraire apparaît comme un facteur important : en l'absence de vent, pour une même gamme de débit, la salinité observée est plus faible qu'en période de coup de vent, contrôlant la position du panache à l'embouchure de l'estuaire. Le lien entre position du panache, vent et orientation du vent devra être analysée ultérieurement.

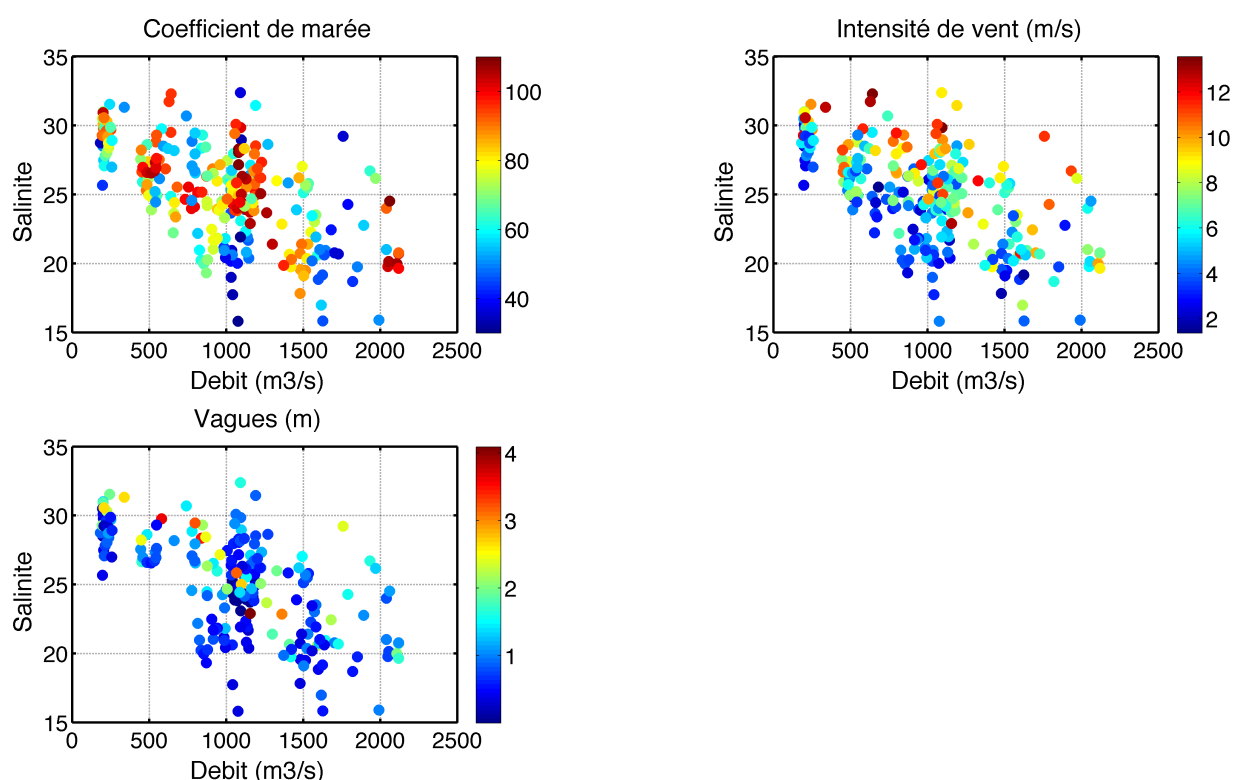


Figure 54 : Relation entre la salinité de surface à basse mer et les principaux forçages : débit, vent, marée et vagues.

4.4 Dynamique sédimentaire vue par SCENES

4.4.1 Vue générale de la dynamique à l'embouchure

La variabilité de la concentration en MES à la station SCENES est présentée Figure 55 et Figure 56. La turbidité de surface varie globalement entre 0 et 100mg/l, avec des pics atteignant les 150mg/l. En surface, une variabilité à l'échelle de la marée et du VE/ME est bien visible, ponctuellement perturbée par les épisodes de tempêtes. La concentration au fond est significativement plus forte, variant entre quelques mg/l jusqu'à au minimum 280mg/l, valeur de saturation du capteur. Si cette saturation est ponctuelle en octobre et novembre, elle devient récurrente et sur des épisodes longs entre décembre et janvier, du fait de la présence de fortes houles à l'embouchure. La mesure de fond sur la période octobre 2017/avril

2018, est fortement influencée par la houle, dans une moindre mesure par le marnage, du fait de la succession fréquente des épisodes de vagues sur cette période. Le lien entre la concentration en MES et les différents forçages sont détaillés ci dessous.

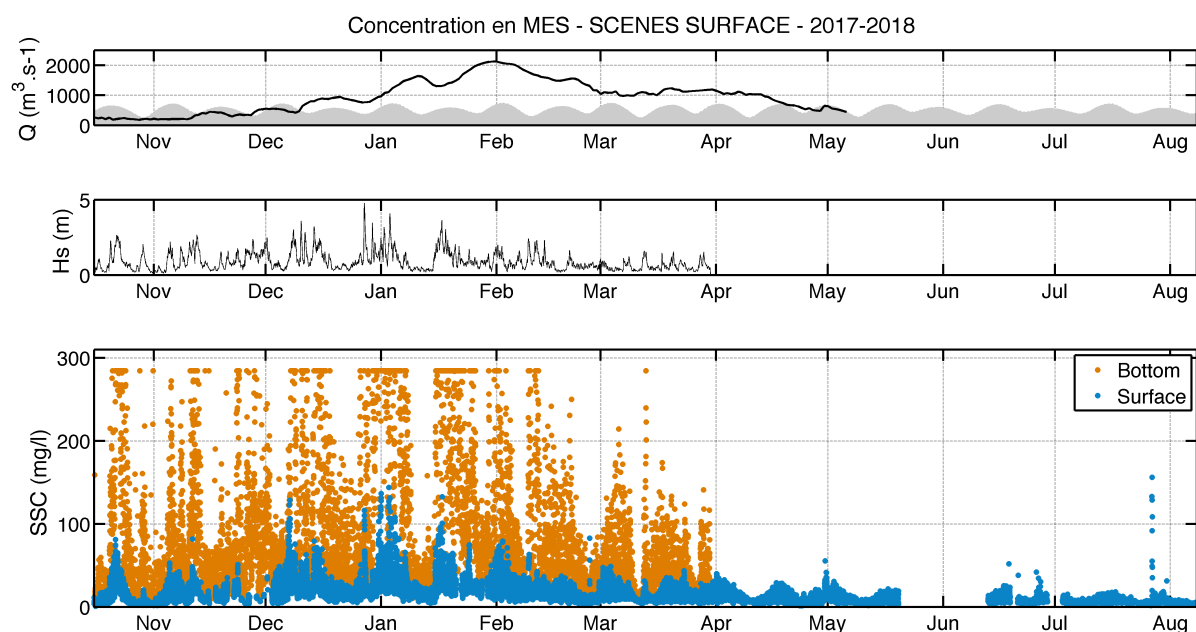


Figure 55 : Chroniques de débit, marée, vagues et de la variabilité de la concentration des MES de surface et de fond mesurée par la bouée SCENES entre octobre 2017 et aout 2018

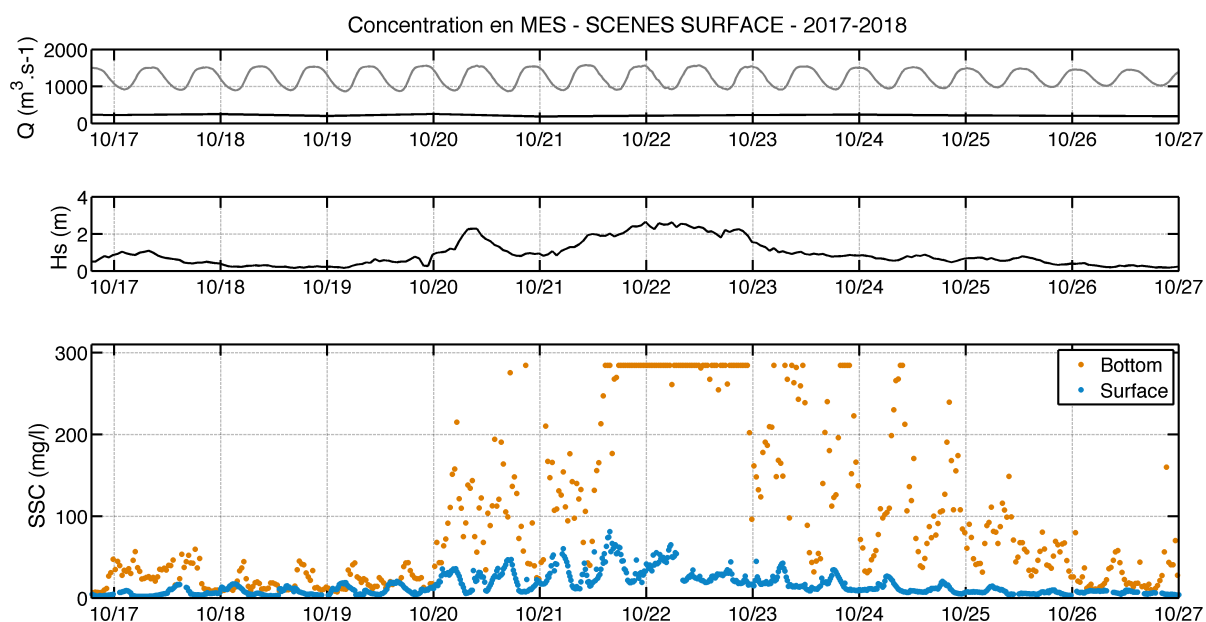


Figure 56 : Chroniques de débit, marée, vagues et de la variabilité de la concentration des MES de surface et de fond mesurée par la bouée SCENES sur une période de VE/ME en octobre 2017

4.4.2 Dynamique de surface : panache et dynamique tidale

La forte variabilité de la concentration en MES à l'échelle de la marée et du cycle hydrologique est illustrée Figure 57 et suivantes. La chronique annuelle peut être divisée en deux périodes : i) d'octobre 2017 à mi février 2018 : conditions hivernales et tempêtes, ii) de mi février à août 2018 : conditions printanière et estivale, sans vagues. En hiver, la dynamique du signal de turbidité est fortement contrôlée par les épisodes de vagues. Le signal de concentration en MES (ou de turbidité) est alors souvent supérieur à 25mg/l tout le long du cycle tidal, et corrélé à l'amplitude des vagues (Figure 58 et Figure 59). Une modulation tidale semble toutefois se superposer, avec des concentrations plus fortes autour de la basse mer, pouvant être associée i) soit à une remise en suspension et un mélange plus efficace à BM, ii) soit à l'export des eaux estuariennes turbides advectées au sein du panache de surface (Figure 57).

Hors période de vagues, la concentration en MES de surface est corrélée i) par la dynamique de marée et la cyclicité VE/ME et ii) par le débit comme illustré

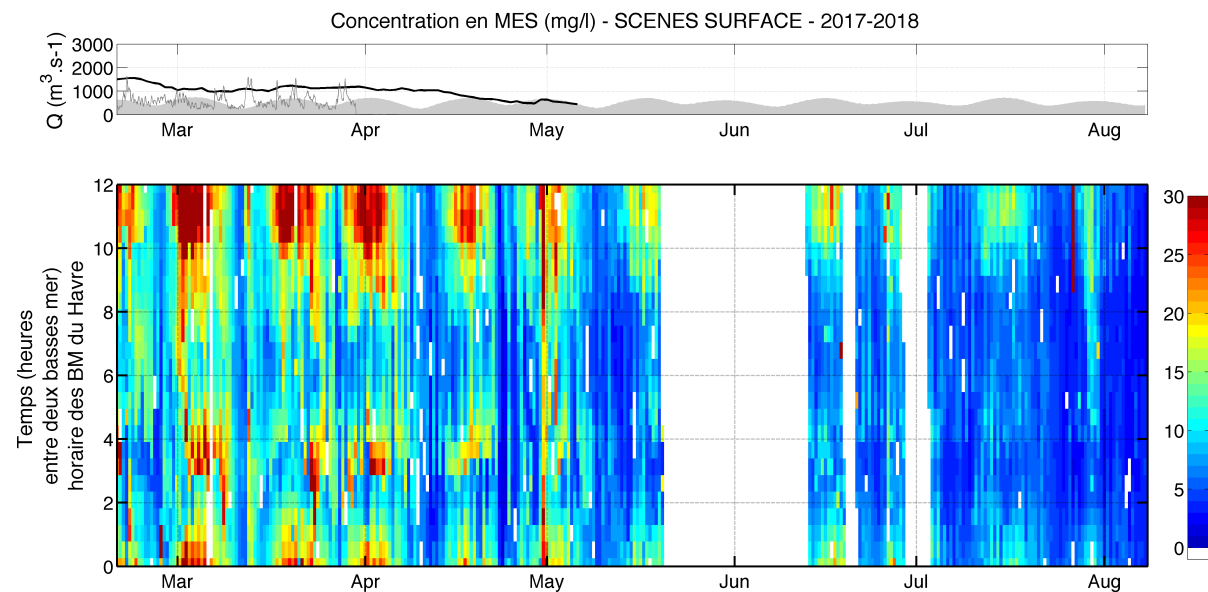


Figure 60. A l'échelle du cycle de marée, la concentration en MES de surface est maximale autour de la basse mer mais également en fin de flot, associée à la circulation observée à l'embouchure et le flux vers le nord en fin de flot, début de pleine mer (voir section 4.2.1). L'intensité des concentrations en MES observées à l'échelle tidale varie fortement avec le débit, mais également avec le cycle VE/ME. Entre février et mars 2018, le débit de la Seine est soutenu et constant autour de 1000m³/s. Sur cette période, les concentrations en MES autour de la basse mer sont élevées, supérieures à 20mg/l (Figure 59). Avec la décrue progressive de la Seine, la concentration en MES à basse mer diminue, pour atteindre en grande VE de juillet des valeurs inférieures à 15mg /l. Outre l'intensité des concentrations en MES, la durée du maximum de turbidité autour de la basse mer varie également avec le débit. Par fort débit, le panache turbide est observé à 4h avant la basse mer et jusqu'à 2h après, tandis qu'en étiage, il n'est observé que 2h avant et jusqu'à 1 à 2h après la basse mer. Ainsi, à marnage équivalent, la concentration sera plus forte en crue qu'en étiage, et à débit constant, la concentration est plus forte en VE qu'en ME, et ce à la fois pour les concentrations médianes sur le cycle de marée que sur la concentration autour de la basse mer (Figure 58 et Figure 59). Cette dynamique saisonnière s'explique par la migration du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine avec le débit : à l'étiage, le bouchon vaseux est situé à l'amont, autour de Tancarville, et n'atteint que rarement l'embouchure à marée basse. En crue, le bouchon vaseux est expulsé vers l'aval, dans la zone d'embouchure, ce qui explique alors les fortes turbidités observées en surface.

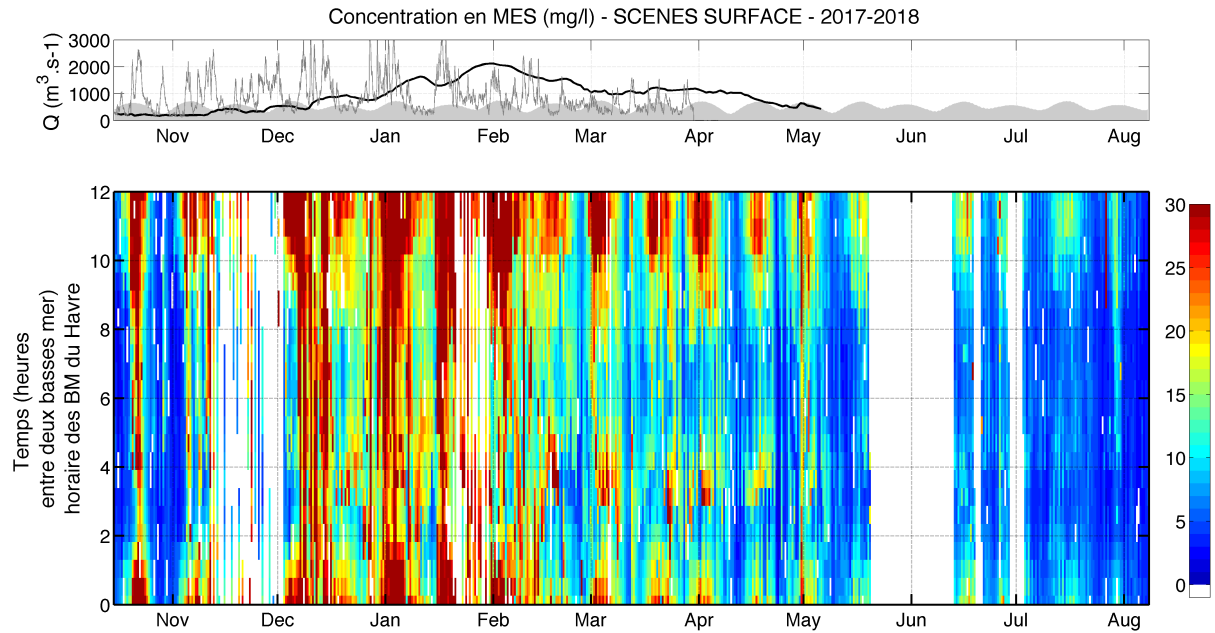


Figure 57 : Vision 2D de la dynamique de marée et de la variabilité annuelle de la concentration en MES en surface. Verticalement sont présentées les données de concentration en MES entre deux basses mer, l'ensemble des cycles de marée étant concaténés horizontalement sur le cycle annuel.

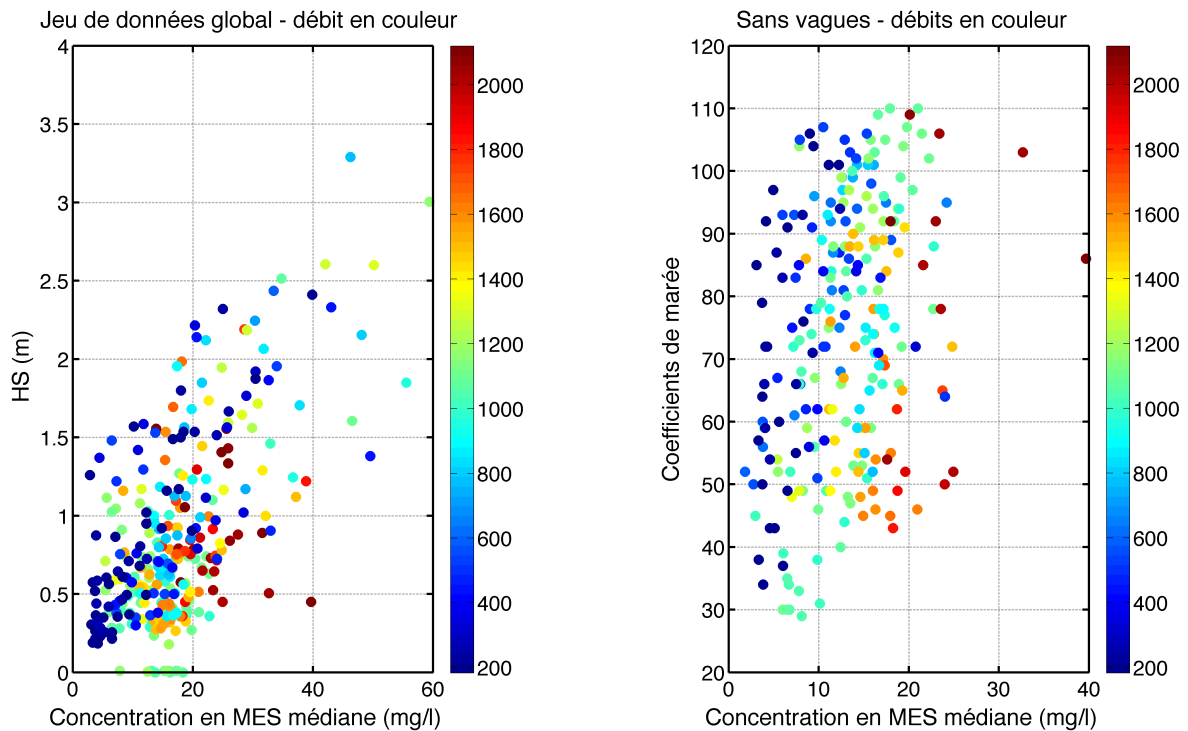


Figure 58 : Relations entre la concentration en MES de surface médiane par cycle de marée et i) les hauteurs significatives de vagues (m) (gauche) et ii) des coefficients de marée (pour les périodes sans vagues, i.e. $H_s < 0.8m$) (droite). L'échelle de couleur représente le débit de la Seine (m³/s)

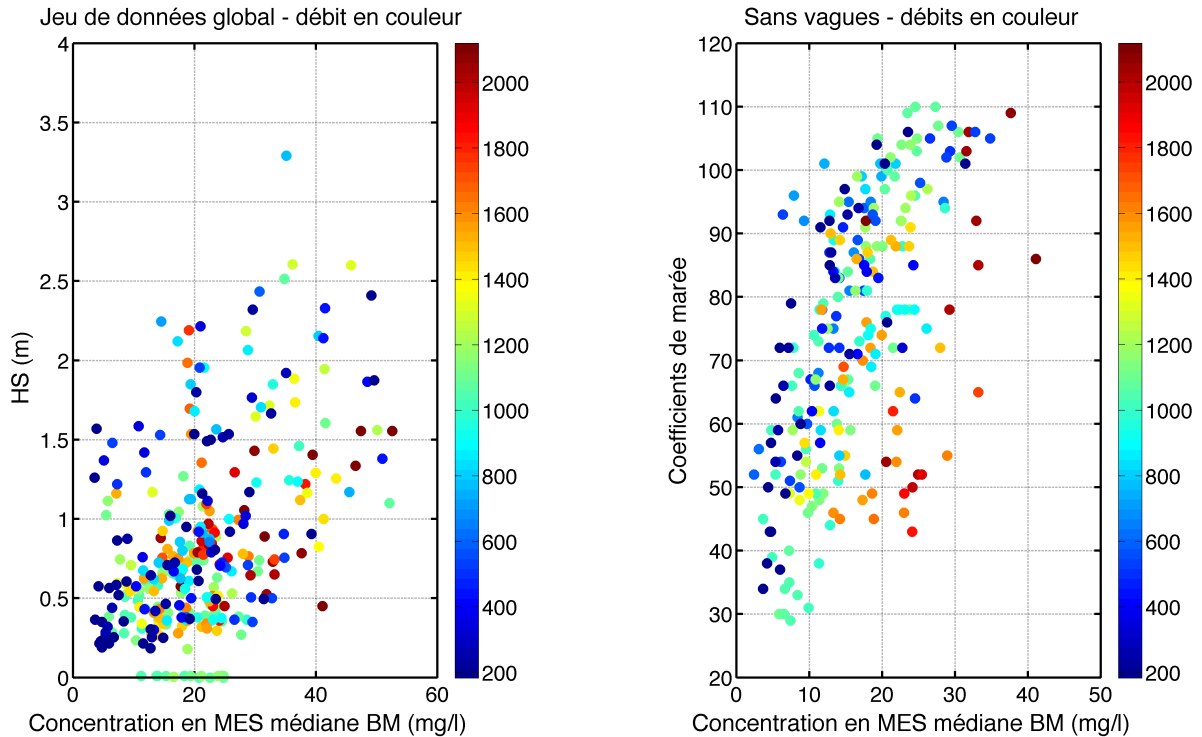


Figure 59 : Relations entre la concentration en MES de surface à basse mer (médiane entre BM-2 et BM+2) par cycle de marée et i) les hauteurs significatives de vagues (m) (gauche) et ii) des coefficients de marée (pour les périodes sans vagues, i.e. $H_s < 0.8\text{m}$) (droite). L'échelle de couleur représente le débit de la Seine (m^3/s)

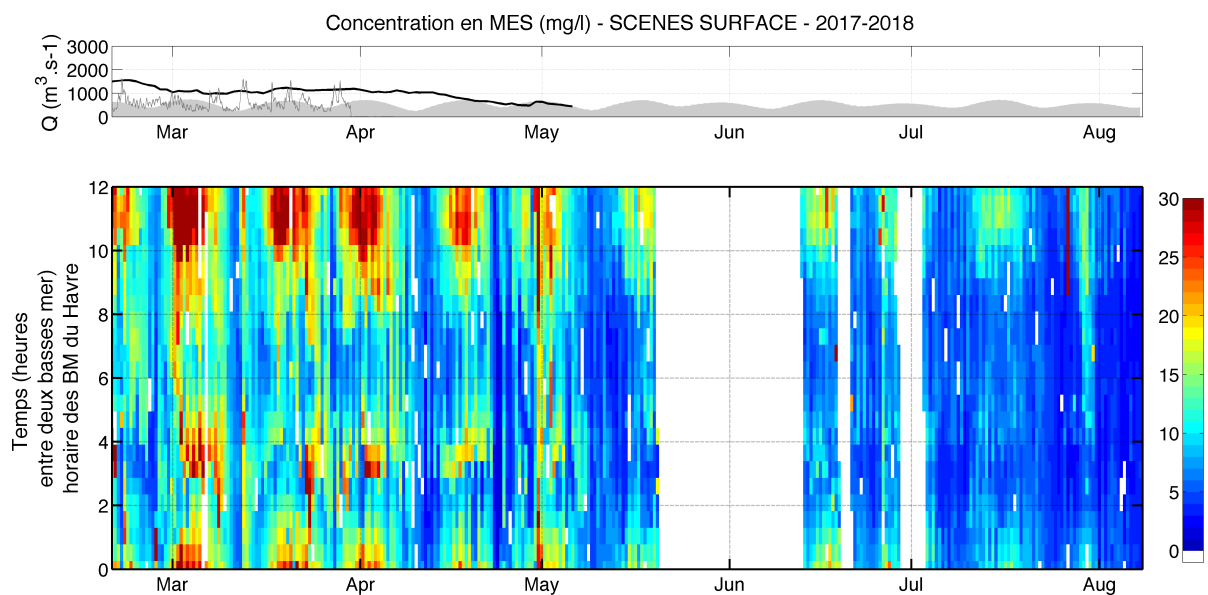


Figure 60 : Vision 2D de la dynamique de marée et de la variabilité saisonnière de la concentration en MES en surface : focus sur la période fin d'hiver/été 2018. Verticalement sont présentées les données de concentration en MES entre deux basses mer, l'ensemble des cycles de marée étant concaténés horizontalement marée par marée

Il est important de rappeler que la dynamique de la concentration en MES à la surface est fortement associée à la position du gradient longitudinal de salinité. Le gradient vertical, également important car déterminant l'épaisseur du panache turbide, n'est pas observé avec la station SCENES, car non représenté par l'unique mesure de surface. En comparant la salinité et la concentration en MES à basse mer, on observe que plus le débit est fort, plus la salinité est faible, plus la concentration en MES est forte (Figure 61). Cependant, le débit n'explique pas l'ensemble de la dynamique, comme en atteste la forte dispersion du nuage de point. La superposition du marnage complète l'analyse de la variabilité saisonnière (hors période de vagues) : si la dynamique de salinité est peu impactée par l'intensité des marées, la concentration en MES de surface est elle fortement influencée : à salinité (ou débit) équivalent, plus le marnage est fort, plus le bouchon vaseux est développé et plus la concentration en MES de surface est importante à marée basse.

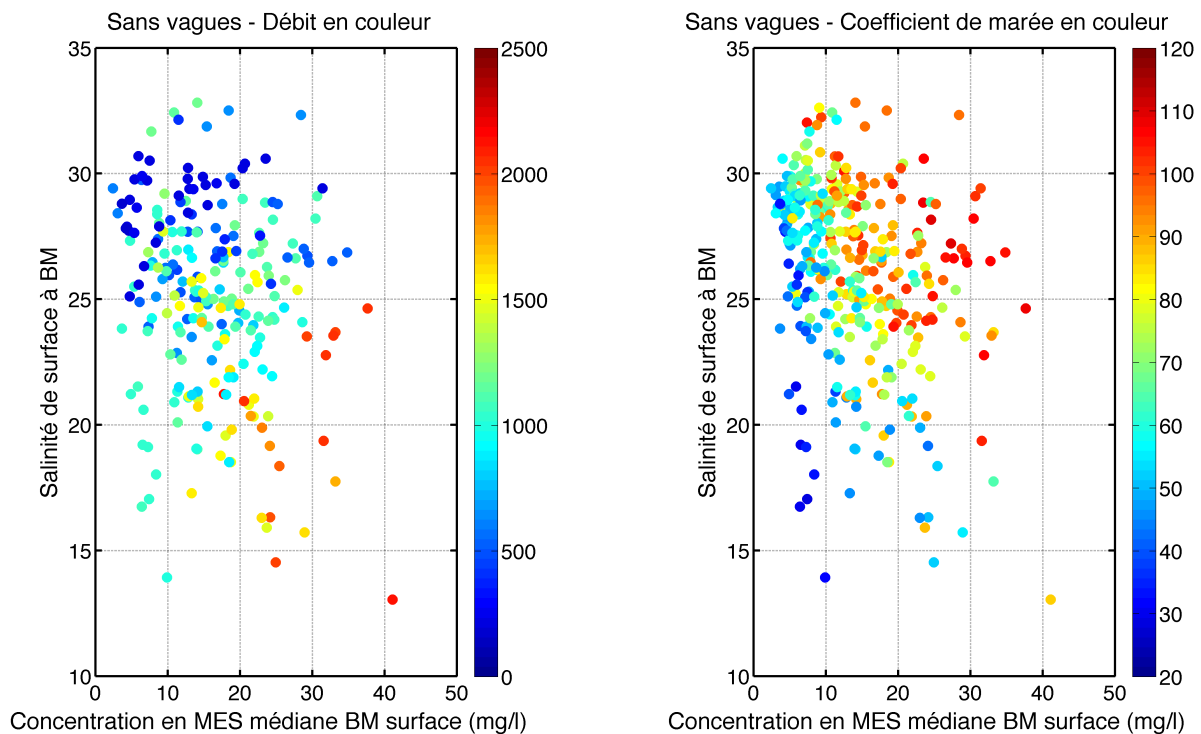


Figure 61 : Relations entre la salinité et la concentration en MES de surface à basse mer (médianes entre BM-2 et BM+2) par cycle de marée. L'échelle de couleur représente à gauche le débit de la Seine (m³/s) et à droite les coefficients de marée.

4.4.3 Dynamique de fond : impact des tempêtes

La dynamique de MES au fond, sur la période hivernale, est fortement impactée par l'effet des tempêtes (Figure 62). Lors des épisodes de vagues, la concentration en MES médiane au fond atteint des niveaux élevés, supérieurs à 100mg/l, et les niveaux de concentrations augmentent proportionnellement à l'intensité de la houle (Figure 63). Pour un épisode donné à l'échelle du cycle de marée, la concentration en MES est plus importante en flot et fin de jusant (+/- 2h autour de la basse mer) qu'autour de la pleine mer (BM+5 à BM+7), ce qui pourrait s'expliquer par un effet maximal des vagues par faible tranche d'eau (Figure 64). Cette prédominance des concentrations au flot est également présente sans vagues, traduisant une remise en suspension des sédiments de fond par les courants de marée, plus intenses au flot, mais également en VE (Figure 65). Ainsi, pour des coefficients de marée inférieurs à 50, les concentrations en MES moyennes de fond au flot ne dépassent pas 50mg/l au flot, tandis qu'en grande VE (coefficient supérieur à 100) cette concentration excède toujours 50mg/l. Il semblerait également qu'une

influence du débit puisse être observée, avec des concentrations plus fortes au flot pour des débits de crue que pour des débits d'étiage à coefficient équivalent. Ce point pourrait traduire une disponibilité de sédiments fins érodables plus importante en crue, associée à l'expulsion du bouchon vaseux vers l'embouchure et la proche baie de seine. Il devra néanmoins être réexaminé avec le complément de données estivales.

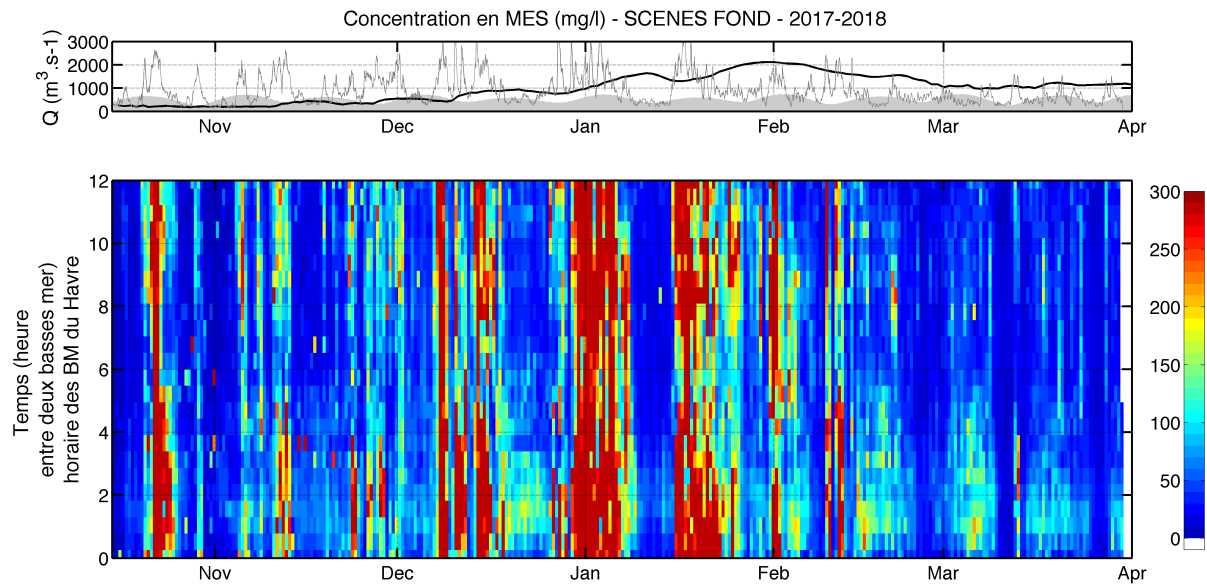


Figure 62 : Vision 2D de la dynamique de marée et de la variabilité annuelle de la concentration en MES de fond. Verticalement sont présentées les données de concentration en MES entre deux basses mer, l'ensemble des cycles de marée étant concaténés horizontalement sur le cycle annuel

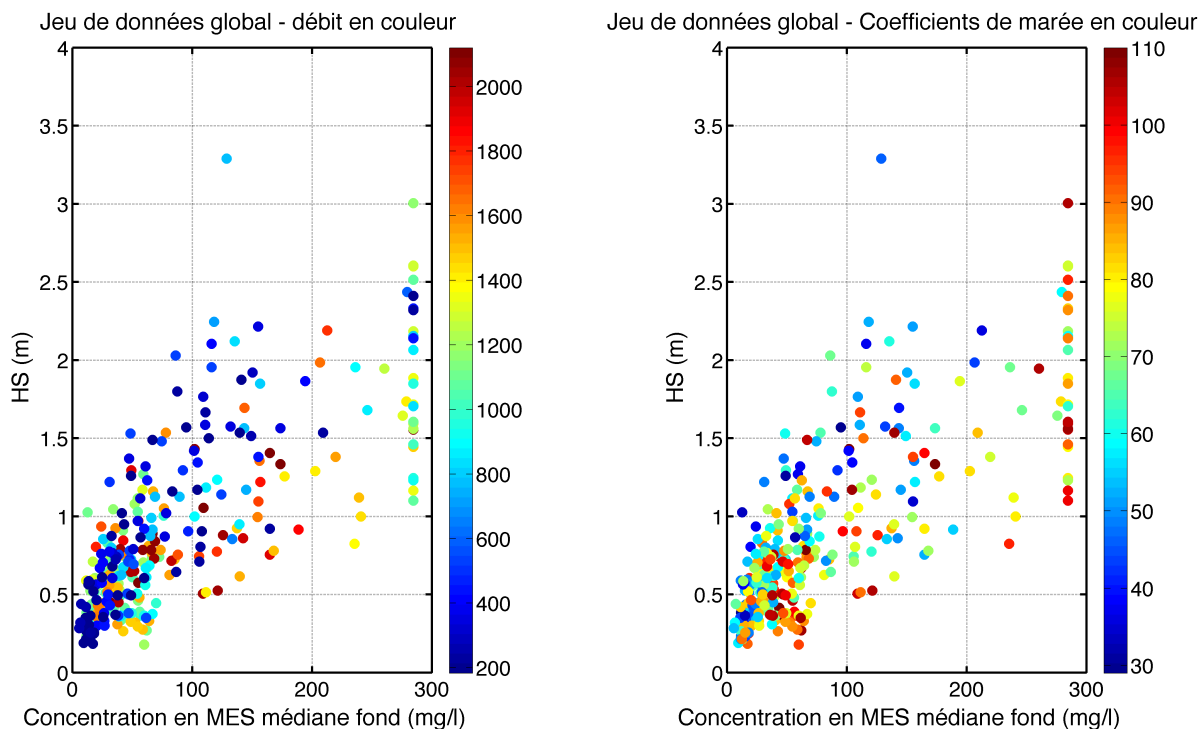


Figure 63 : Relations entre la concentration en MES médiane de fond et la hauteur significative de vagues médiane par cycle de marée et. L'échelle de couleur représente à gauche le débit de la Seine (m3/s) et à droite les coefficients de marée.

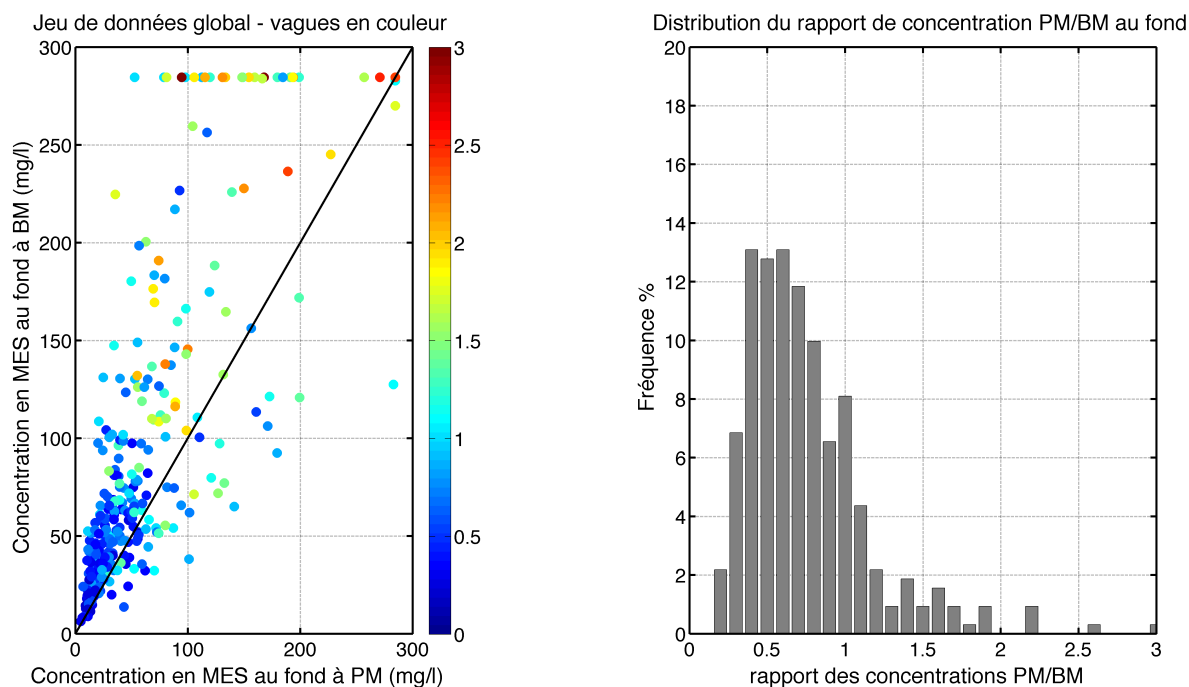


Figure 64 : Comparaison entre concentration de MES au fond à pleine mer (BM+5 à BM+7) et à basse mer (BM-2 à BM+2) (gauche) et distribution du rapport des concentrations PM/BM (droite)

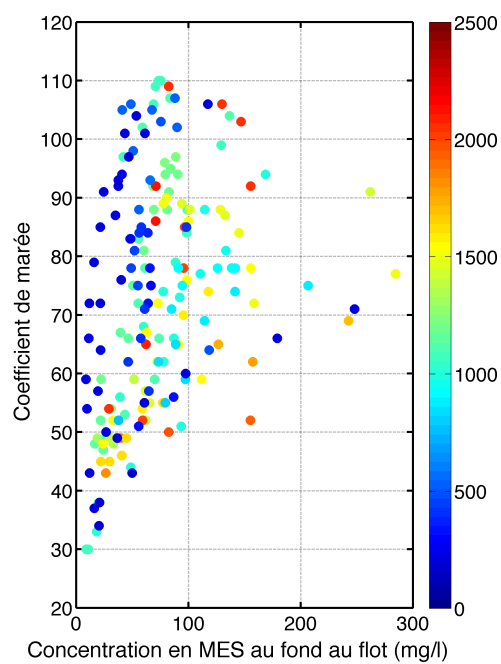


Figure 65 : Concentration des MES au fond au flot (entre BM et BM+2) en fonction du marnage et du débit (couleur) hors périodes de vagues

4.5 Processus biogéochimiques à l'interface estuaire/baie

La station SCENES permet également de suivre les processus biogéochimiques à l'interface estuaire / baie de Seine et notamment la dynamique de la production primaire via la mesure conjointe de la concentration en chlorophylle a (via les capteurs de fluorescence en surface et au fond) et de l'oxygène dissous (surface uniquement). De novembre 2017 à fin mars 2018, le signal de fluorescence reste faible, avec des niveaux de concentration en Chla entre 1 et 4 $\mu\text{g/l}$ (Figure 66 et Figure 69). Sur cette période automne/hiver, l'oxygène dissous augmente de façon continue passant de 5 à 7 mg/l. En début de printemps, un premier bloom de faible intensité se produit début avril, suivi par une succession de fortes concentrations en chlorophylle a de mai à aout, atteignant des niveaux de concentration supérieurs à 15 $\mu\text{g/l}$. Ces épisodes de fortes poussée de chlorophylle a sont associés à des augmentations significatives de la concentration en oxygène dissous (supérieure à 8mg/l) du fait de l'activité photosynthétique du phytoplancton. Toutefois, après chaque pic de concentration en chlorophylle a, le niveau de base de la concentration en oxygène dissous diminue progressivement à partir d'avril, jusqu'à atteindre des valeurs de 4mg/l. en aout. Un focus sur une dynamique temporelle courte montre que la dynamique de l'oxygène dissous semble légèrement déphasée par rapport à la dynamique de la chlorophylle a, avec des valeurs plus importantes lors d'augmentation du signal de chlorophylle (

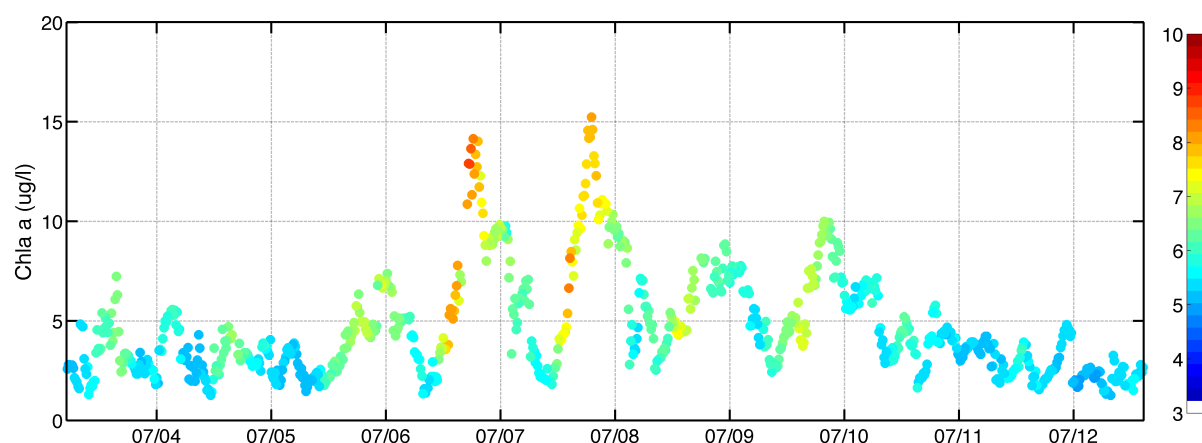


Figure 67). Il est intéressant de noter qu'en avril une dynamique semi diurne du signal de chlorophylle a est observée (Figure 68), tandis qu'en juillet la dynamique est clairement diurne (

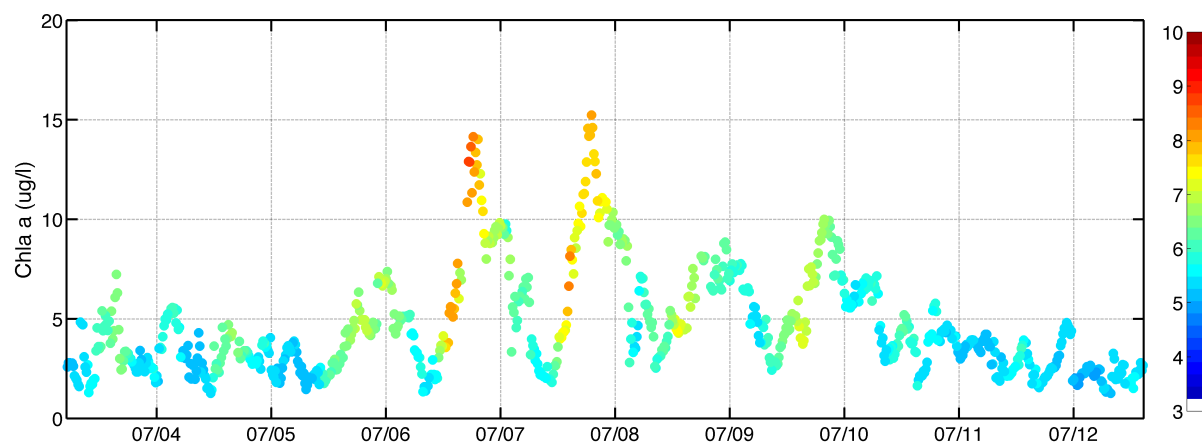


Figure 67).

La dynamique du signal de chlorophylle a est associée au cycle semi lunaire de la marée, avec des poussées de phytoplancton majoritairement en fin de morte eau (Figure 66). La Figure 70 illustre cette dynamique, avec des maxima de chlorophylle a principalement pour des faibles coefficients, en morte eau et revif.

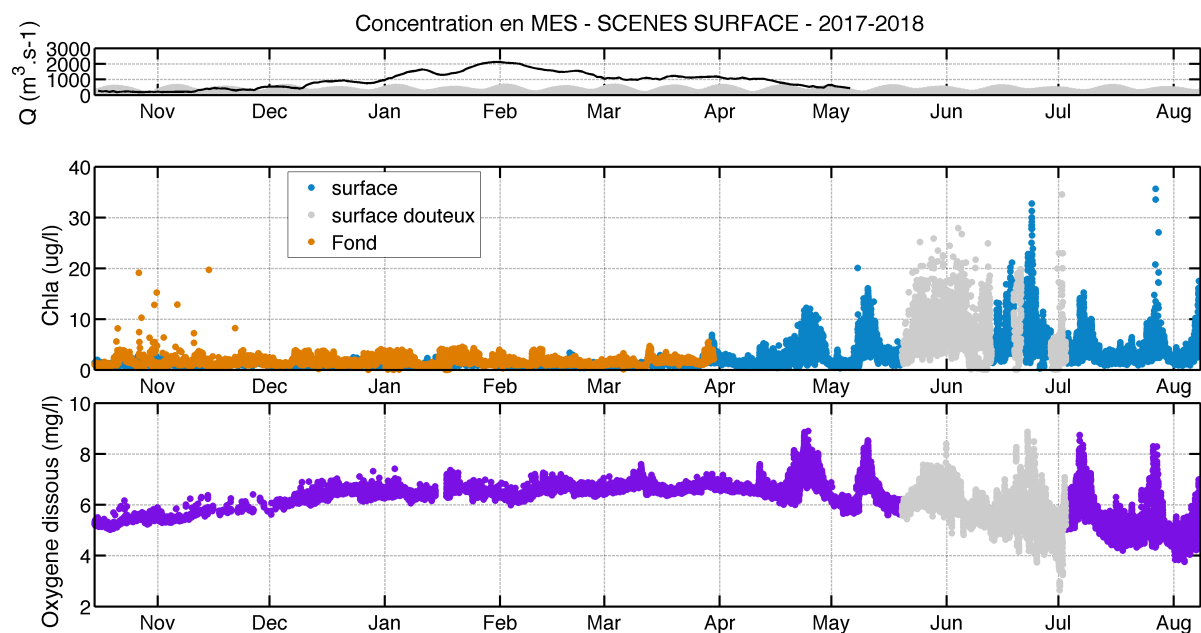


Figure 66 : Série temporelle de concentration en Chlorophylle a (surface et fond) et d'oxygène dissous (surface) à la station SCENES entre octobre 2017 et aout 2018

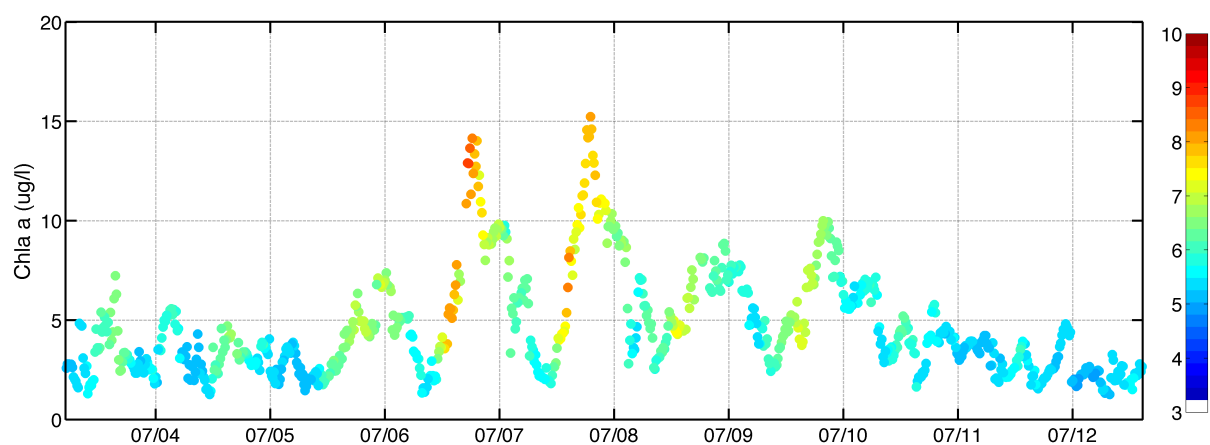


Figure 67 : Dynamique de chlorophylle a et de l'oxygène dissous (couleur) autour de la première morte eau de juillet 2018

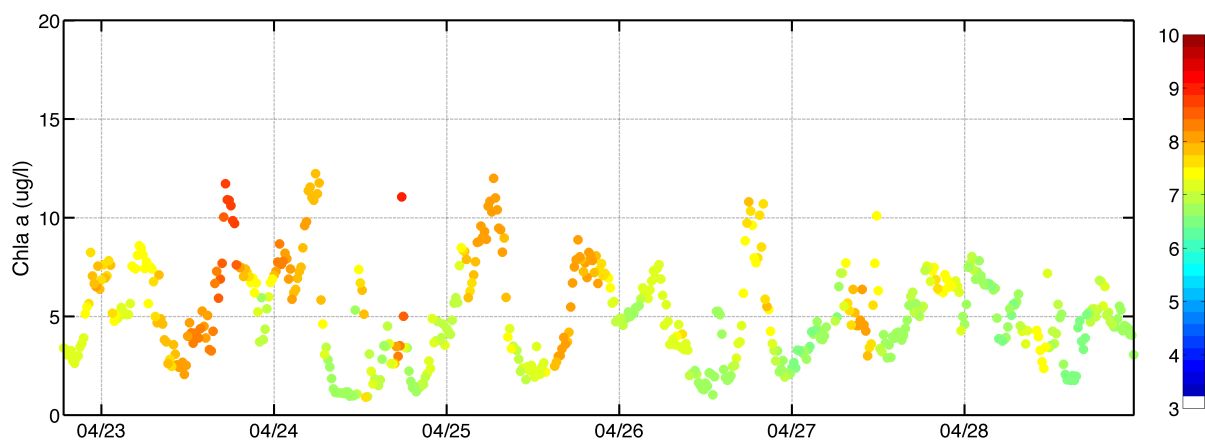


Figure 68 : Dynamique de chlorophylle a et de l'oxygène dissous (couleur) fin avril 2018

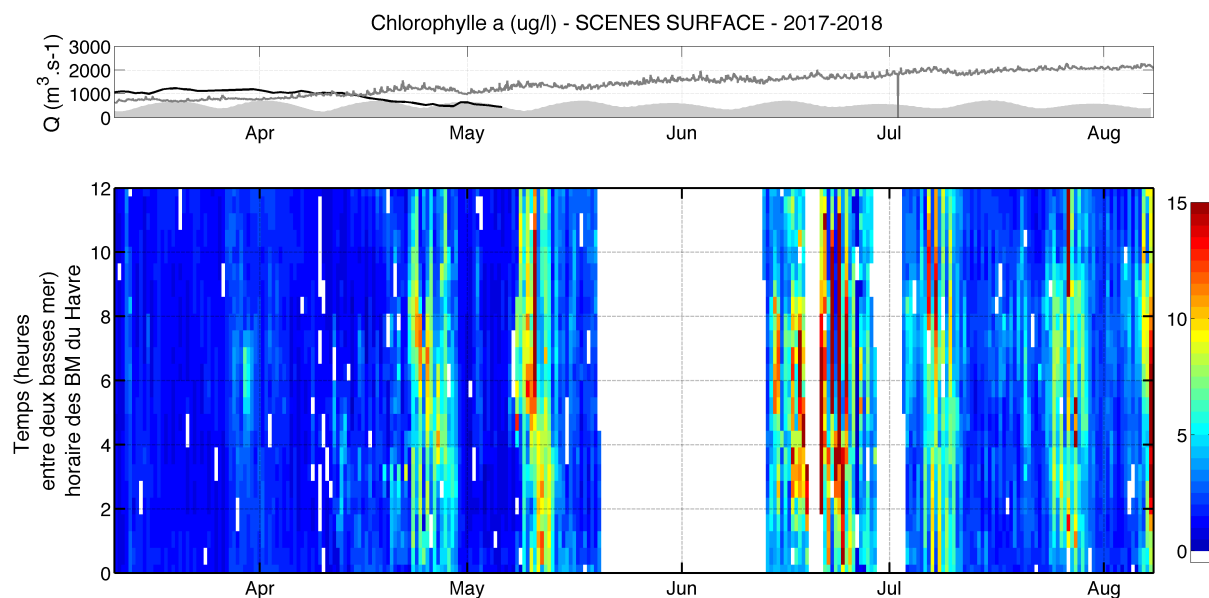


Figure 69 : Vision 2D de la dynamique de marée et de la variabilité saisonnière de la concentration en chlorophylle a en surface : focus sur la période printemps/été 2018. Verticalement sont présentées les données de concentration en Chla entre deux basses mer, l'ensemble des cycles de marée étant concaténés horizontalement marée par marée

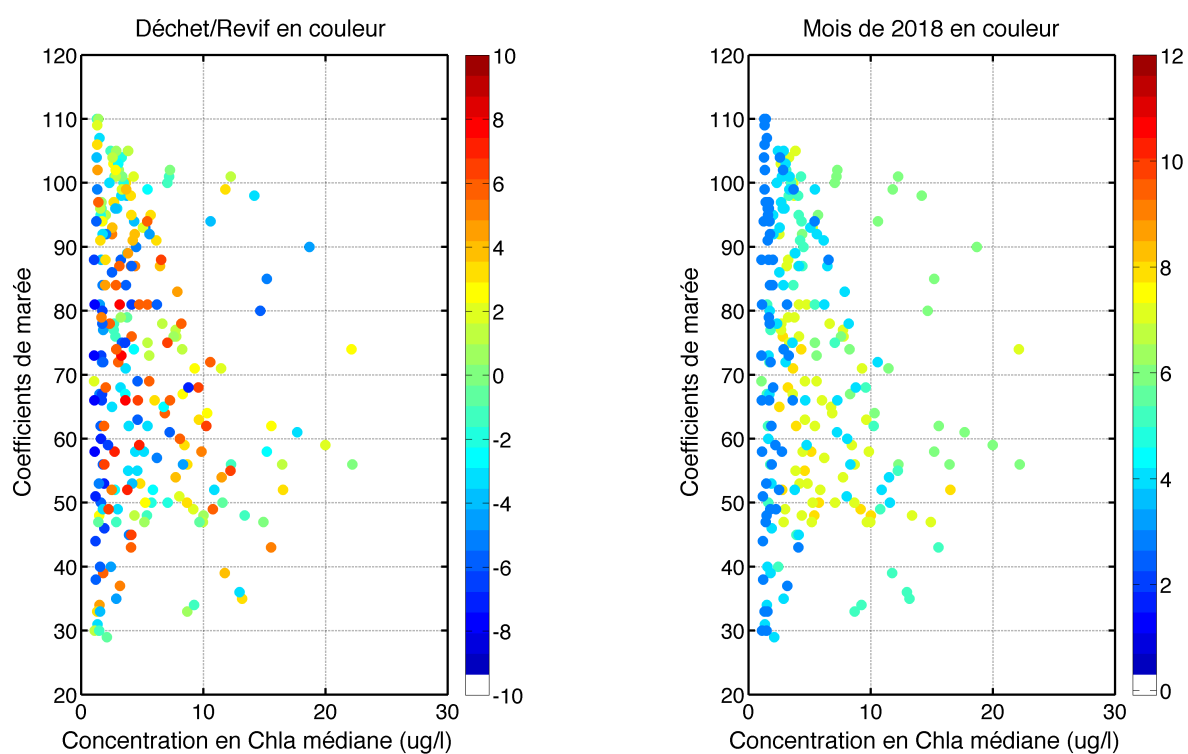


Figure 70 : Relations entre concentration en Chlorophylle a et coefficients de marée. Gauche : phases de déchet/revif en couleur (en point de coefficient par marée) ; Droite : mois de 2018 en couleur

5 Conclusions

L'un des deux objectifs du volet « Renforcement du réseau » du projet PHRESQUES Phase 1 concernait le développement et le déploiement de la station SCENES à l'embouchure de l'estuaire de Seine, en remplacement de la bouée D4-Carosse. La phase de design et développement de la bouée, tant d'un point de vue mécanique (bouée et station de fond), électronique et capteurs que du mouillage s'est déroulée avec succès et dans le respect du calendrier initial.

La station SCENES est alors entrée dans sa phase opérationnelle en octobre 2017 avec le déploiement à l'embouchure. Les données collectées jusqu'en août 2018, date du rapport, ont permis i) de valider les choix techniques, ou de les affiner suite à l'expérience acquise durant l'hiver 2017/2018, ii) de livrer une première analyse de la dynamique hydro-sédimentaire et biogéochimique haute fréquence à l'embouchure, de la marée au cycle annuel.


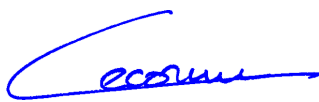
6 Annexes

Projet CPIER PHRESQUES - Demande de prolongation de l'AOT 2015 □ Bouée Carosse



Historique du document

<i>Version</i>	<i>Date</i>	<i>Auteurs</i>	<i>Commentaires</i>
1.0	01/09/2017	Romaric VERNEY	Création du document

<i>Auteur :</i> R. VERNEY	<i>Date :</i> 04/09/2017	<i>Visa :</i> 
<i>Approuvé par :</i> F. LECORNU	<i>Date :</i> 04/09/2017	<i>Visa :</i> 

© Ifremer

Hormis les cas expressément prévus par le Code de la Propriété Intellectuelle au titre de l'article L.122-5 2° d'une part et de l'article L.122-5 3° d'autre part, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite (article L.122-4) » et qu'une telle représentation ou reproduction constitue un délit de contrefaçon sanctionné par deux ans d'emprisonnement et 150 000 euros d'amende. L'Ifremer se réserve le droit à réparation de tout préjudice subi.

© Ifremer

All rights reserved. No part of this work covered by the copyrights herein may be reproduced or copied in any form or by any means ☐ electronic, graphic or mechanical, including photocopying, recording, taping or information and retrieval systems- without written permission.

Sommaire

1. Contexte	6
2. Période de déploiement	6
3. La bouée SCENES	6
3.1. Bouée de Surface.....	6
3.2. Station de fond.....	9
4. Plan de mouillage de la bouée.....	9
5. Positionnement de la bouée.....	11
6. Paramètres des feux à éclats des bouées	13
7. Annexe – AOT 2015	14

1. Contexte

Le projet PHRESQUES (2016-2020) financé par le Contrat de Plan Interrégional État-Régions (CPIER) Vallée de Seine et piloté par le GIP SEINE AVAL a pour objectif de doter l'Axe Seine d'un réseau d'observation de la qualité de l'eau du bassin parisien à la baie de Seine, en s'appuyant et consolidant les réseaux existants.

En 2015, une première bouée scientifique instrumentée a été déployée à proximité de la Carosse (bouée D4). L'objet du présent document concerne la demande de prolongation de l'AOT précédent (en annexe du document) sur la même zone, a minima jusqu'au 31 décembre 2020, pour une nouvelle bouée (dénommée SCENES) remplaçant la précédente, et dont les caractéristiques sont détaillées ci-après.

2. Période de déploiement

La présente demande d'autorisation d'occupation du territoire concerne la période suivante :

du 10 octobre 2017 (date programmée de mise à l'eau de la bouée par les Phares et Balises)

au 31 décembre 2020 (date de fin de projet CPIER PHRESQUES).

Au-delà de cette date, il est probable que la bouée reste en place s'il est décidé de pérenniser le réseau d'observation.

3. La bouée SCENES

La bouée SCENES (Station Côtière pour l'observation de l'Environnement en Estuaire de Seine) est une bouée scientifique propriété de l'Ifremer et équipée de capteurs observant différents paramètres de l'environnement estuarien (salinité, température, turbidité, fluorescence, courant, vagues). Elle est constituée de deux éléments distincts : une bouée de surface et une station de fond.

3.1. Bouée de Surface

Pour information, la bouée SCENES et son mouillage sont une copie de la bouée SMILE déjà déployée en Baie de Seine au large de Luc sur Mer.

La bouée de surface est une ancienne bouée MAREL déployée en estuaire de Seine dans les années 2000. Pour rappel, ses dimensions hors tout sont : 3.6m de diamètre et 6.6m de haut (Figure 1). Le flotteur en lui-même a une dimension de 3.6m de diamètre et 3.2m de haut, sur lequel se fixe une superstructure constituée d'un portique de 2.2m de hauteur accueillant outre les équipements scientifiques les éléments de signalisation réglementaires : croix de Saint André, réflecteur radar et feu de signalisation (rythme SADO feu VEGA VLB3 (code 470) 5 éclats toutes les 20s [0.5-1.5]).

Cette bouée de surface est reliée à une bouée de mouillage intermédiaire OCEAN3 de 600L par une laisse d'accroche (GM Line) en chaîne 16 5D gainée PVC, assurant une fixation en deux points (crocs HR) de la bouée scientifique (Figure 2). Cette bouée intermédiaire assure le mouillage, à travers une ligne en chaîne galvanisée DN25 5D de 50m de long, reliée à un lest béton de 5000kg.

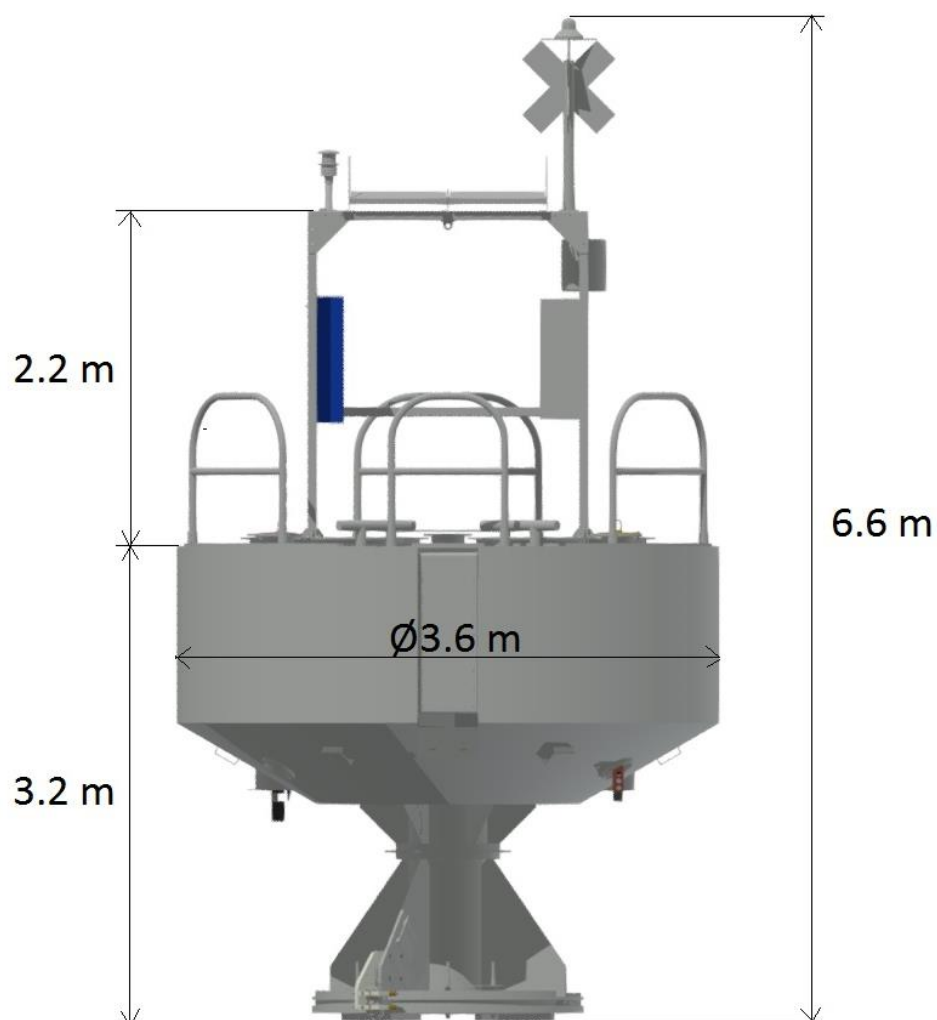


Figure 1 : Présentation de la bouée SCENES – dimensions principales

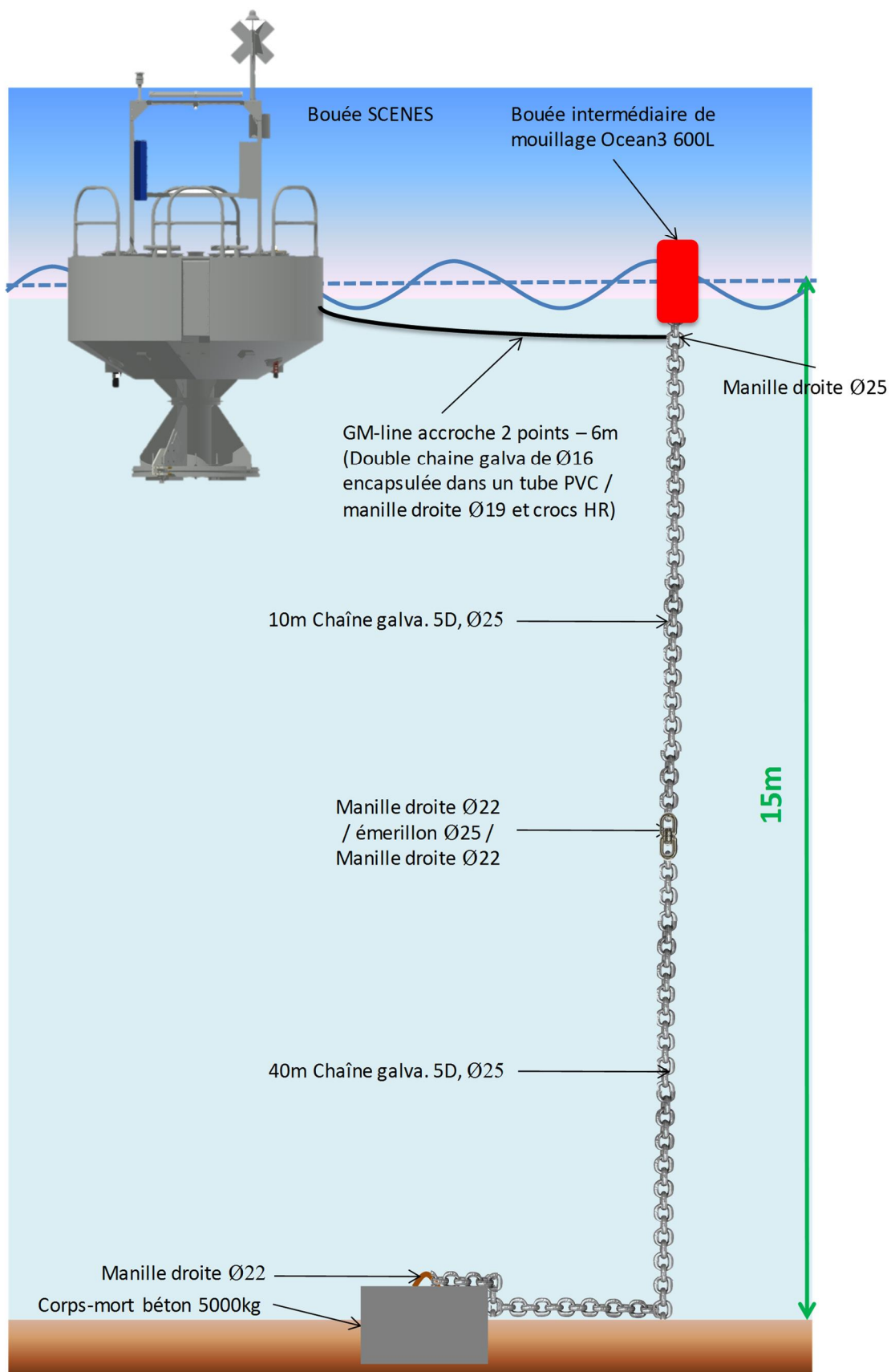


Figure 2 : Description du mouillage de la bouée SCENES

3.2. Station de fond

La station de fond accueille des équipements scientifiques et dialogue avec la bouée de surface par modem acoustique. Cette station de fond prend la forme d'une pyramide rectangulaire 4 pans inclinés de 45°, limitant le risque d'accroche par chalutage éventuel (Figure 3). L'emprise au sol est de 1.62mx1.92m, et de 42cm de hauteur. Cette station est stabilisée au fond par 6 pieds de 9cm de hauteur, et une chaîne de 12mm relie la station avec le lest de la bouée principale.

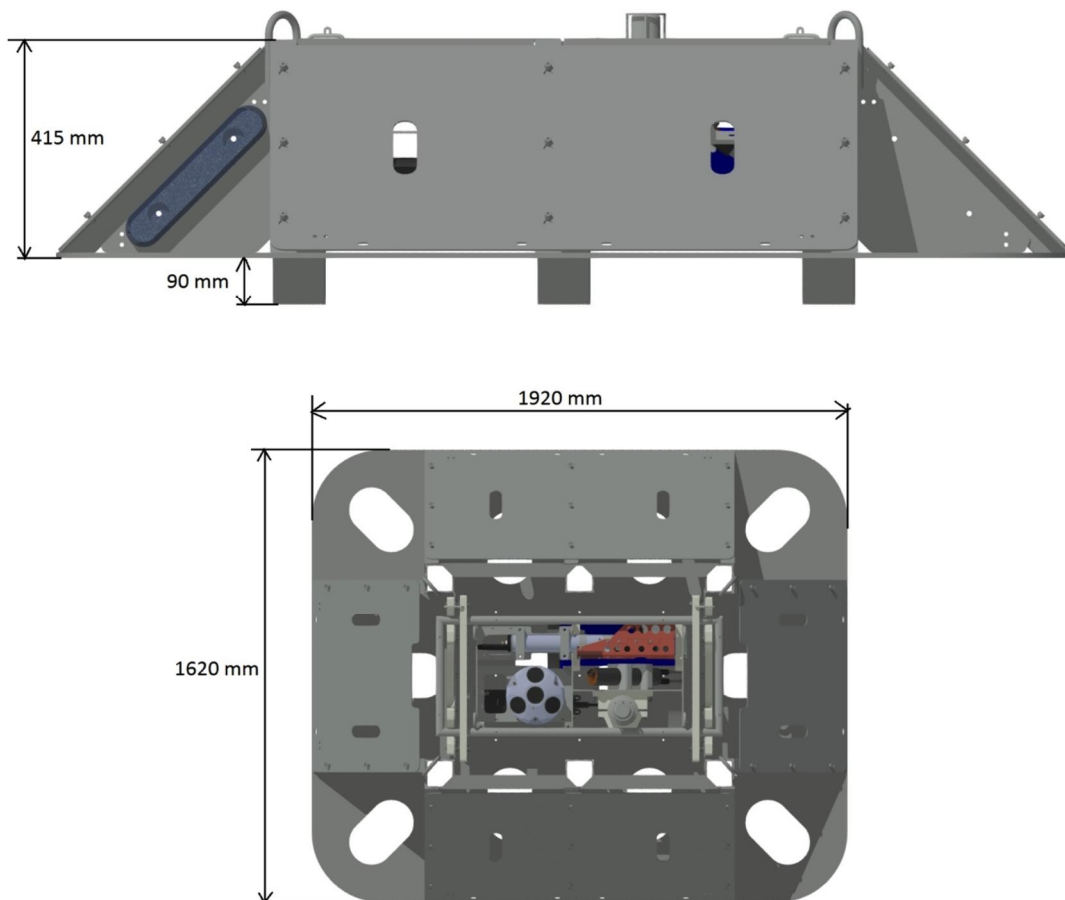


Figure 3 : Schéma et dimensionnement de la station de fond

4. Plan de mouillage de la bouée

Le plan de mouillage de la bouée SCENES est identique à celui de la bouée actuellement présente sur le site de la Carosse : la bouée principale est associée à deux bouées de signalisation GBR1250 (Croix de St André et feu de signalisation Sealite SL-70 16Ah(code 1-1) à éclats jaune FL en 4s, taux de travail de 0.25 [1s -3s]-lest de 600kg) de façon à former un triangle de signalisation de la station de fond (Figure 4 et Figure 5). Le triangle formé par les bouées de surface est de 100m de côté, la station de fond étant située à l'intérieur du triangle, sa localisation décalée du centre du triangle vers le sommet constitué de la bouée scientifique (distance lest/station de 30 à 35m).

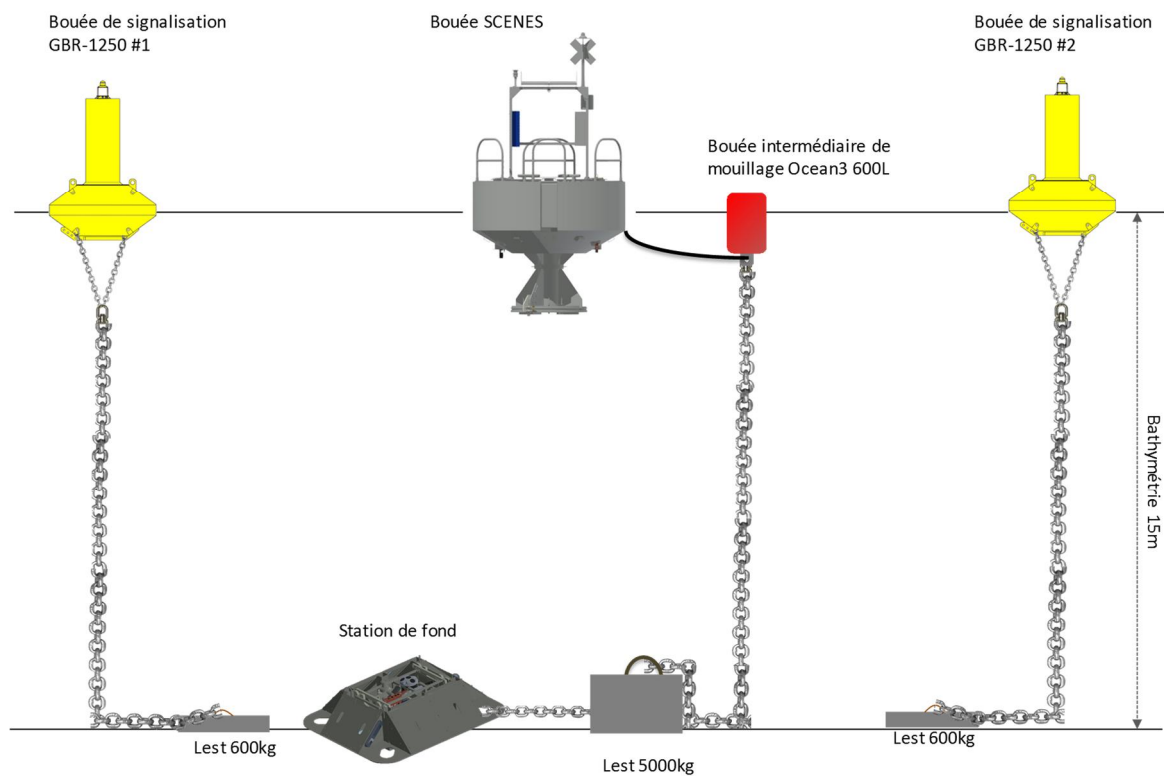


Figure 4 : Schéma général du mouillage SCENES – vue en coupe

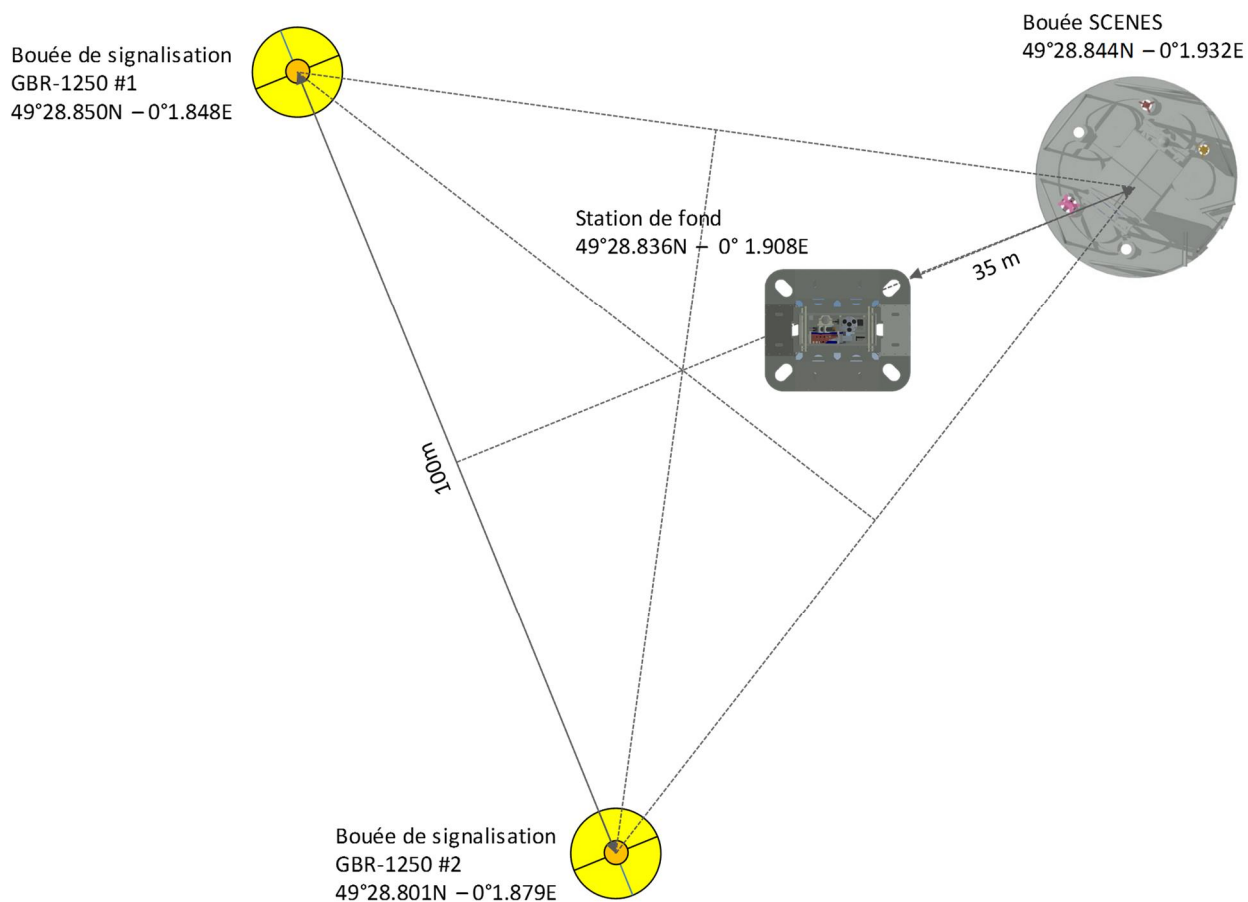


Figure 5 : Schéma général du mouillage SCENES – vue de dessus et localisation des bouées

5. Positionnement de la bouée

La bouée SCENES remplace la bouée actuellement mouillée sur le site de la Carosse (Figure 6). Le triangle réalisé par le nouveau mouillage s'inscrit pleinement dans le triangle de mouillage actuel de la bouée (Figure 7). Le tableau suivant renseigne les positions souhaitées des différents éléments de mouillage.

Positionnement mouillage SCENES		
GBR1	49° 28.850 N	0° 1.848 E
GBR2	49° 28.801 N	0° 1.879 E
SCENES	49° 28.844 N	0° 1.932 E
Station de fond	49° 28.836 N	0° 1.908 E

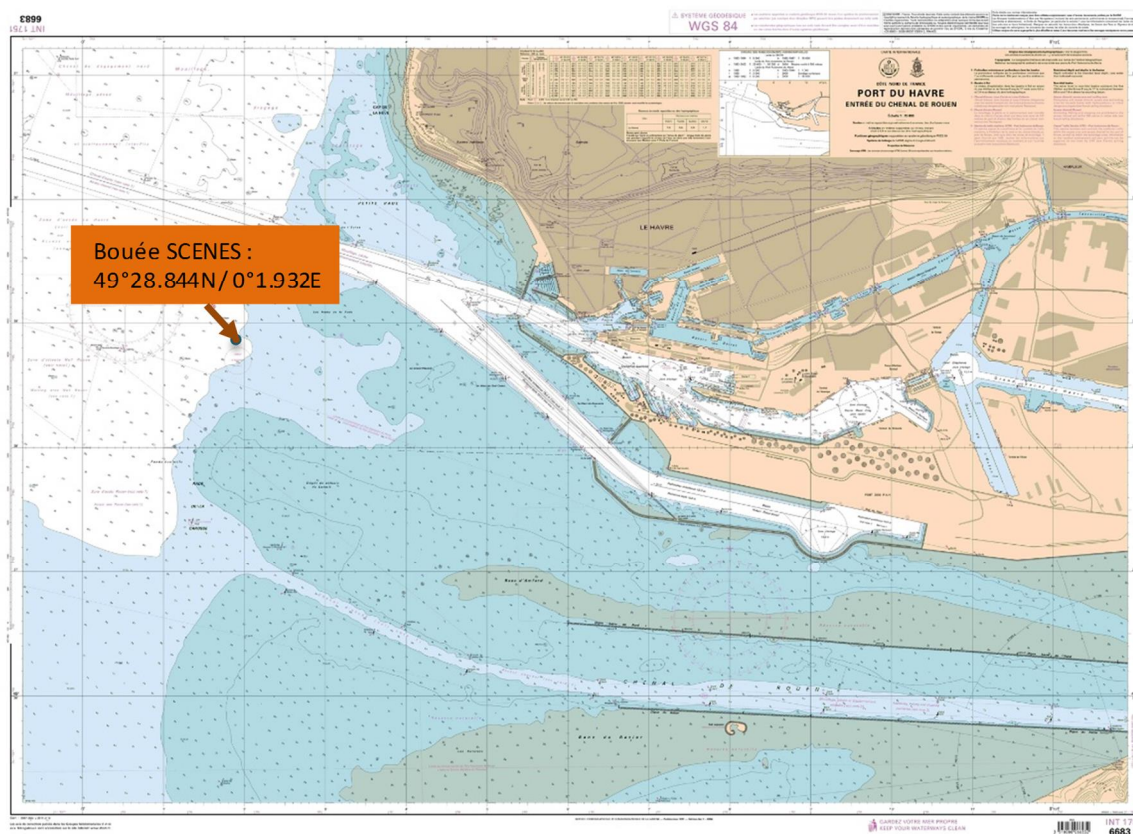


Figure 6 : Localisation de la bouée SCENES dans l'embouchure de l'estuaire de Seine

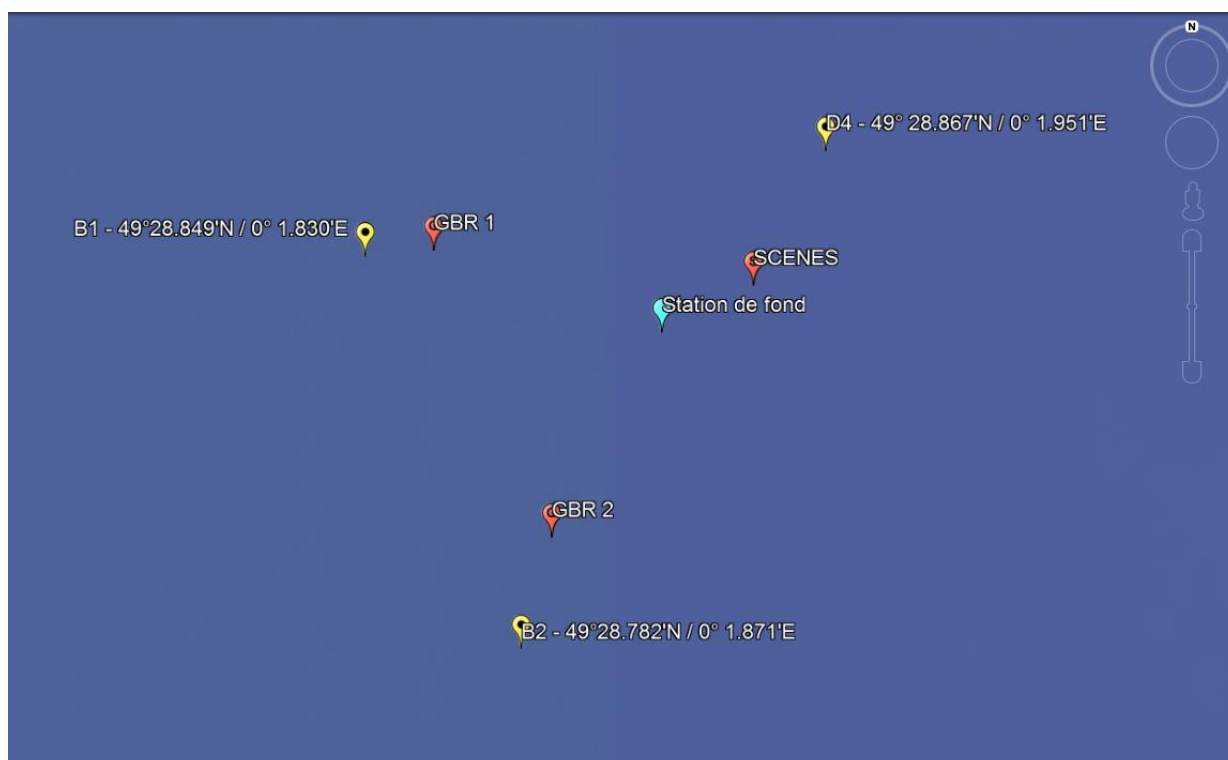


Figure 7 : Localisation de la bouée SCENES et de ses bouées de balisages(en rouge) par rapport au mouillage actuel (en jaune)

7. Annexe – AOT 2015



D-ZIP.DIL-MGT/VSE.15.177

Service du Domaine et du Développement
Industriel et Logistique

Hervé HOUIS
Chef de Service

Affaire suivie par Mathilde GUILLOT
☎ 02 32 74 74 00 – Poste : 7845

ATTESTATION

Je soussigné Hervé HOUIS, Chef du Service du Domaine et du Développement Industriel et Logistique du Grand Port Maritime du Havre, atteste que l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), ayant son siège social 155 rue Jean-Jacques Rousseau, 92138 Issy-les-Moulineaux, est autorisé à déployer une bouée principale et deux bouées de balisage sur le Domaine Public Maritime Naturel dont le Grand Port Maritime du Havre est gestionnaire – Commune du Havre.

La bouée principale devra être déployée aux coordonnées GPS N49°28.8638 -E0°01.9519.

Les bouées de balisages devront être positionnées dans un rayon de 100 mètres de la bouée principale.

IFREMER devra préalablement à tout déploiement respecter les prescriptions des Phares et Balises et informer la Préfecture Maritime.

IFREMER est responsable de tous dommages (matériels, immatériels, corporels) causés par lui-même ou un de ses préposés à l'occasion de l'exploitation des bouées susvisées sur le domaine du Grand Port Maritime Naturel mis à disposition par le GPMH en tant que gestionnaire de ce domaine, et ce à l'égard des tiers, des usagers, de l'exploitant et du GPMH pris en ses installations et personnel.

GRAND PORT MARITIME DU HAVRE

Terre-Plein de la Barre – CS 81413 – 76067 Le Havre Cedex – France
Tél : 02 32 74 69 31 – Fax : 02 32 74 74 16 – www.lehavre-haropaports.com



L'institut souscrira une police d'assurance garantissant sa responsabilité civile dans tous les cas où elle pourrait être recherchée, notamment du fait de son occupation des lieux.

Les polices, avenants et quittance doivent être communiqués au GPMH, sur simple demande.

Cette attestation est délivrée à compter du 4 mars 2015 jusqu'au 31 janvier 2016.

Pour servir et valoir ce que de droit

Fait au Havre, le 6 MARS 2015

Le Chef de Service,

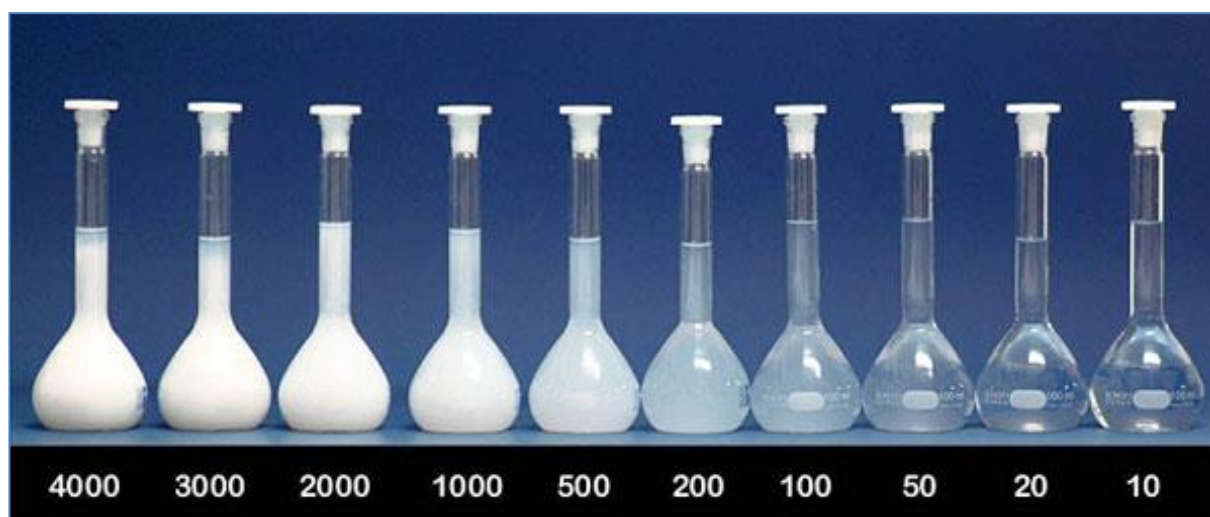
Par délégitation



Hervé HOUIS

RAPPORT DE VERIFICATION

WETLabs FLNTUSB [S/N : 1652]



RESUME	
Rédacteur	Matthias JACQUET
Constructeur	WETLabs
Modèle	ECO FLNTUSB
Numéro de série	1652
Identification laboratoire	G051
Suivi métrologique	SVO (occasionnel)
Contexte / Commentaire	Vérification post déploiement SCENES Surface

Titre du rapport : Compte-Rendu de campagne / PHRESQUES 2018 - Leg 2	
Référence interne : ODE/DYNECO/DHYSED 18-XXX Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	Date de publication : AAA/MM/JJ Version : 1.0.0 Référence de l'illustration de couverture Crédit photo/titre/date Langue(s) : FR
Résumé/ Abstract : Les sondes de turbidité WETLabs sont déployées sur le mouillage SCENES (bouée de surface ou station de fond) pendant plusieurs mois. La métrologie de ces instruments est effectuée après chaque déploiement pour contrôler la qualité des mesures.	
Mots-clés/ Key words : NA	
Comment citer ce document : NA	
Disponibilité des données de la recherche : Oui	
DOI : NA	

Commanditaire du rapport : NA	
Nom / référence du contrat : <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne du rapport intermédiaire : R.DEP/UNIT/LABO AN-NUM/ID ARCHIMER)	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) : PHRESQUES	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
Matthias JACQUET matthias.jacquet@ifremer.fr	DYNECO/DHYSED
Destinataire : NA	
Validé par : Romaric VERNEY	

1. MATERIEL

Le matériel nécessaire pour l'ensemble du mode opératoire réalisé est :

- 2 béchers 500 mL,
- Fiole jaugée 1 000 mL,
- Eprouvettes graduées 2000mL, 1000mL et 25mL,
- Micropipette 10mL,
- Agitateur magnétique + barreau,
- Sulfate d'hydrazine + Hexaméthylène-tétramine,
- Eau milli-Q,
- Hotte + gants + lunettes de protection,
- Spatule cuillère,
- Potence + noix + pince,
- PC.

2. Lieu d'opération / Conditions ambiantes

L'ensemble des tâches réalisées sont effectuées au Laboratoire de Sédimentologie n°210.00.01.

Les conditions ambiantes sont : 24.5°C.

3. Mode opératoire

Eau

Pour la préparation des suspensions d'étalonnage de formazine et la mesure du blanc de turbidité, de l'eau ultra pure milli-Q est utilisée.

Etalon concentré de formazine

L'étalonnage ou la vérification des sondes de turbidité est effectué à partir d'une solution étalon de formazine concentrée à 4000 FNU-NTU, préparée en laboratoire à température ambiante (18-25°C). Son protocole de réalisation est le suivant, tel que référencé dans la norme ISO 7027-1:2016 :

- Dissoudre 5,0 g de sulfate d'hydrazine dans environ 400 mL d'eau distillée.
- Dissoudre 50,0 g d'hexaméthylène-tétramine dans environ 400 mL d'eau distillée.

- Introduire les deux solutions dans une fiole jaugée de 1 litre, ajuster au volume, mélanger puis laisser reposer 24 heures à $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Cette suspension est stable pendant une période pouvant aller jusqu'à six mois si elle est conservée dans un récipient fermé hermétiquement, à une température de $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ et à l'abri de la lumière.

ACQUISITION

Afin de réaliser la vérification de la sonde, 7 mesures sont effectuées : 1 dark counts, 1 blanc et 5 points uniformément répartis sur la gamme de mesure de l'instrument.

Le dark counts correspond à la mesure de turbidité quand le photo-détecteur est masqué. Il s'agit du bruit électronique de l'instrument, et celui-ci se mesure en mettant un scotch noir sur la cellule photo-déetectrice, comme préconisé par le constructeur.



Figure 1 - Mesure du dark counts

Ensuite, les mesures sont réalisées dans un b cher entouré de scotch noir, et la fenêtre optique est placée à une distance suffisamment grande de la paroi pour éviter toute perturbation de mesure, notamment sensible lors du blanc de turbidité. Cette distance est propre à chaque modèle de sonde et connue à partir d'essais en laboratoire. **Pour cette manipe, la distance cellule/fond est d'environ 25cm, et l'immersion de la sonde est inférieure à 1cm.**

En premier lieu est effectué la mesure du blanc de turbidité, puis successivement des volumes de formazine sont introduits pour atteindre les différents paliers de turbidité souhaités, à l'aide d'une éprouvette graduée.

L'acquisition se fait à 1Hz pendant 1 minute, après homogénéisation et stabilisation de la turbidité dans le volume de mesure. La distance entre la



Figure 2 - Mesure du blanc (à gauche) et d'un palier de turbidité (à droite)

L'homogénéisation est assurée par un agitateur magnétique qui entraîne un barreau aimanté dans le fond du bécher. Celle-ci est contrôlée par 1 mesure au HACH 2100N IS (préalablement étalonné) sur un prélèvement réalisé à l'aide d'une micropipette, au niveau de la zone de mesure. Il est effectué après l'acquisition pour ne pas perturber la mesure.

4. INCERTITUDES DE MESURES

L'écart-type expérimental d'une série de mesure, noté σ_{n-1} , est défini par :

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n-1}},$$

où m_i représente l'ensemble des mesures,
 \bar{m} est la valeur moyenne de la série,
 n est le nombre total de mesures effectuées.

L'incertitude de type A (répétabilité), noté u_A , est calculée telle que :

$$u_A = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}.$$

Le fabricant ne donnant aucune indication sur l'erreur de mesure de la sonde (exactitude de mesure, dérive temporelle, ...). Par conséquent l'incertitude de type B, noté u_B , ne peut être déterminée.

$$u_B = 0.$$

L'incertitude-type, noté U , est définie par la somme des carrés des incertitudes de type A et B :

$$U = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

L'incertitude-type élargie, noté $U_{k=2}$, sera calculé pour $k=2$, soit un niveau de confiance de 95% :

$$U_{k=2} = 2 \times U.$$

La norme NF EN ISO 7027 préconise de rapporter les résultats issus d'étalonnage ou de vérification tel qu'indiqué dans le tableau suivant :

Mesure Turbidité T	Expression Résultat
$T \leq 0,99$ FNU	$T \pm 0,01$ FNU
$1,0 \leq T \leq 9,9$ FNU	$T \pm 0,1$ FNU
$10 \leq T \leq 40$ FNU	$T \pm 1$ FNU
$40 \leq T \leq 99$ FAU	$T \pm 1$ FAU
$T \geq 100$ FAU	$T \pm 10$ FAU

Tableau 1 - Expression des résultats

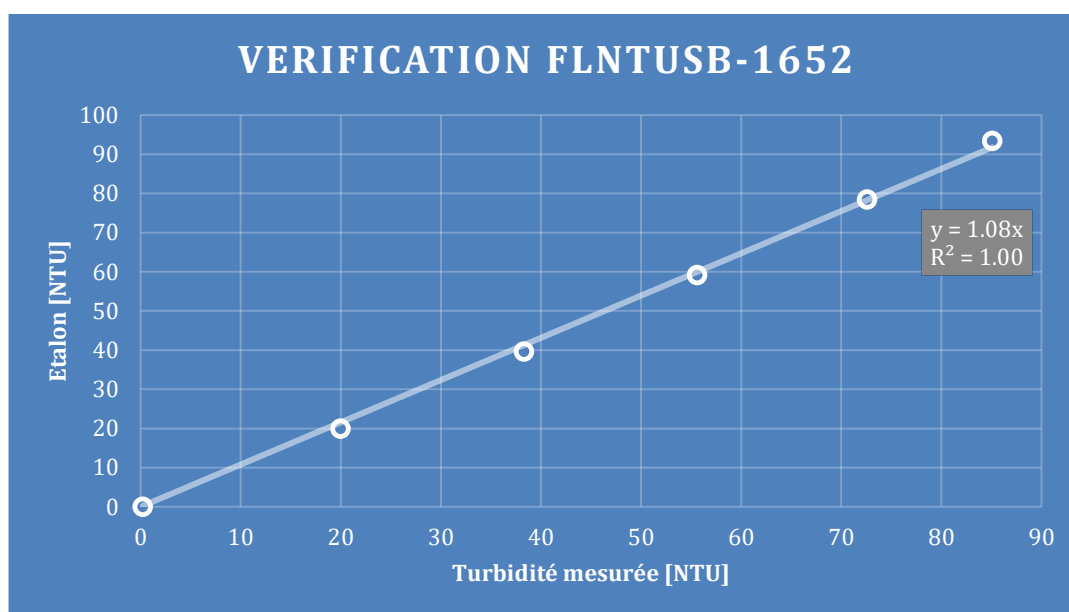
5. Constat de vérification

DATE	FABRICANT	MODELE	SERIAL NUMBER	ETENDUE DE MESURE
27/07/2018	WETLabs	FLNTUSB	1652	[0-100] NTU

Les points de mesures et incertitudes associées aux mesures de volume sont répertoriés dans le tableau suivant :

Volume H₂O milli-Q initial = 5L
Dark Counts = 50,6 ± 0,2 counts

Turbidité Etalon [NTU]	0	19,9	39,6	59,1	78,4	93,4
Turbidité mesurée ± U _{k=2} [NTU]	0,220 ± 0,033	20,0 ± 0,1	38,3 ± 0,2	55,6 ± 0,3	72,6 ± 0,3	85,1 ± 0,2
HACH [NTU]	0,077	18,4	36,1	53,8	71,4	85,0
Ecart relatif [%]	/	-0,5	3,3	5,9	7,4	8,9



E.M.T. = 15%

CONFORME ☒

NON-CONFORME ☐

- Au vu des résultats de mesures, la sonde est jugée conforme à l'Ecart Maximal Toléré.
- L'écart relatif entre l'étalon et la valeur mesurée croît avec la turbidité, et ne dépasse pas 9%.
- La mesure du blanc donne un résultat plutôt élevé (0,2 NTU), probablement dû à une distance « sonde - paroi de fond » pas suffisamment importante.