



HAL
open science

**Mesure des apports en suspension du Rhône. Suivi de
l'extension du coin salé dans le fleuve. RAPPORT
FINAL SUR LA VALIDATION ET
L'EXPLOITATION DE L'ÉQUIPEMENT
SCIENTIFIQUE DU BAC DE BARCARIN.**

Olivier Radakovitch, Issa Sakho, Boris Hanot, Philippe Dussouillez, François Sabatier, Doriane Delanghe-Sabatier, Michal Tal

► **To cite this version:**

Olivier Radakovitch, Issa Sakho, Boris Hanot, Philippe Dussouillez, François Sabatier, et al.. Mesure des apports en suspension du Rhône. Suivi de l'extension du coin salé dans le fleuve. RAPPORT FINAL SUR LA VALIDATION ET L'EXPLOITATION DE L'ÉQUIPEMENT SCIENTIFIQUE DU BAC DE BARCARIN.. [Rapport Technique] CEREGE UMR 7330. 2014. hal-03776829

HAL Id: hal-03776829

<https://hal.science/hal-03776829>

Submitted on 14 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

RAPPORT FINAL SUR LA VALIDATION ET L'EXPLOITATION DE L'ÉQUIPEMENT SCIENTIFIQUE DU BAC DE BARCARIN Juillet 2014

Mesure des apports en suspension du Rhône
Suivi de l'extension du coin salé dans le fleuve



CEREGE UMR 7330, Europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix en provence

Rédacteurs: O. Radakovitch*, I. Sakho, B. Hanot, P. Dussouillez, F. Sabatier,
D. Sabatier-Delanghe, M. Tal.

*. radakovitch@cerege.fr

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	2
2. DESCRIPTIF DU SYSTÈME.....	3
3. FLUX LIQUIDES ESTIMÉS PAR L'ADCP.....	18
4. FLUX DE MATIÈRE EN SUSPENSION ESTIMÉS PAR L'ADCP	21
5. DYNAMIQUE DU COIN SALÉ	39
6. CONCLUSION.....	42

1. INTRODUCTION

Le nouveau bac de Barcarin (*Barcarin V*) mis en service en avril 2011 a permis la mise en place d'un équipement scientifique innovant répondant à un besoin de connaissance sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du Grand Rhône à proximité de son embouchure.

Cet équipement à trois objectifs : 1) améliorer l'évaluation des flux de matières en suspension qui transitent dans le fleuve lors des crues ; 2) mieux connaître les vitesses d'écoulements ; 3) acquérir des connaissances sur la mise en place du coin salé dans le fleuve.

L'ensemble de l'équipement s'est monté en plusieurs temps. Le financement initial mis en œuvre par l'Observatoire des Sédiments du Rhône a permis l'acquisition des instruments de mesure, leur installation sur le bac et la réalisation des premiers tests par un ingénieur de recherche (CDD 6 mois) au cours de l'année 2011. Les premières mesures ont été réalisées et validées durant cette période.

En 2012, un financement de la CNR, du CG13 et de la région PACA a permis de recruter un CDD sur une période de 9 mois (Novembre 2012-Juillet 2013) pour l'entretien du matériel, le traitement des données accumulées et la réalisation de mission de suivis sur le terrain. Ce rapport présente les principaux résultats de ce travail, en ciblant directement les événements hydrodynamiques les plus marquants et dont le traitement est terminé.

Cet équipement est actuellement listé comme station de mesure dans le cadre du programme Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). En Juillet 2014, une sonde de mesure en continu de la conductivité et de la turbidité a été ajoutée sur un des piliers du ponton du Bac. Cette sonde a été acquise sur des crédits de l'OSR et de la Zone Atelier Bassin versant du Rhône (ZABR).

Nous tenons à souligner que la bonne réalisation du travail scientifique a été possible grâce à l'aide importante apportée par le Syndicat Mixte des Traversées du Rhône et son personnel navigant et a terre. Nous remercions tout particulièrement Mr Poisson pour sa collaboration.

2. DESCRIPTIF DU SYSTÈME

Le bac *Barcarin V* a été équipé en 2011 de 3 instruments de mesures et de plusieurs appareils liés à l'acquisition et à la transmission des données. L'intégralité du système est synthétisée dans le plan de câblage des instruments de la figure 1. Cet équipement a évolué depuis, suite notamment à la rupture du câble du turbidimètre à cause de frottements engendrés par les courants contre la coque. Cette sonde est remplacée depuis Juin 2014 par une sonde turbidité-température-pression fixée sur un des pontons de l'ancien bac (Sonde EXO 2 de Ysi instruments).

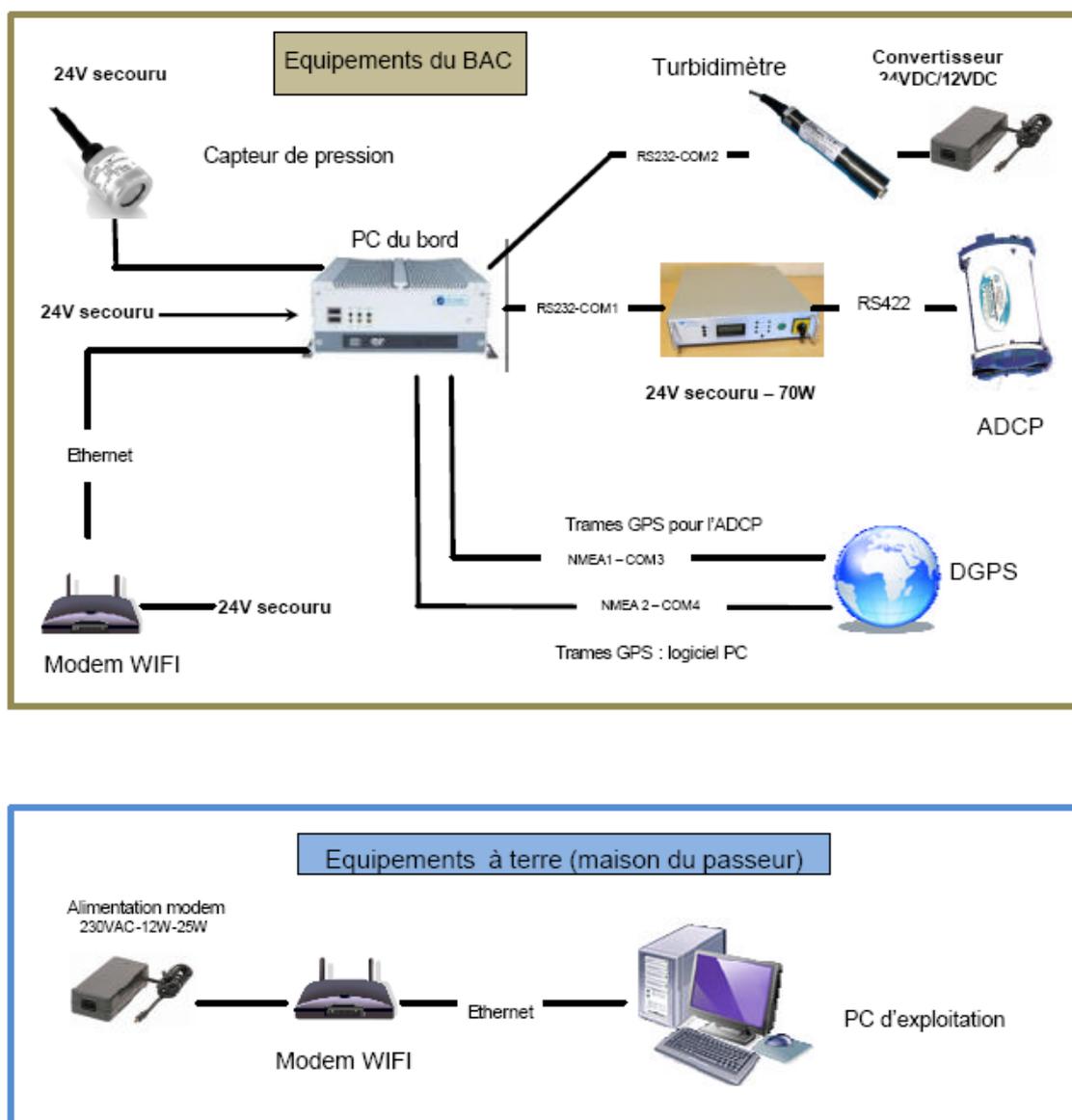


Figure 1 : Architecture du système de mesure du projet Barcarin

a. L'Adcp 600 kHz :

Un Adcp (Acoustic Doppler Current Profiler), Teledyne RDI WorkHorse Mariner 600kHz a été monté sur le flanc amont du bateau, les faisceaux étant positionnés à environ 40 cm sous la ligne de flottaison du bac (figure 2).

L'Adcp mesure les vitesses de courants ainsi que l'intensité du signal rétrodiffusé sur toute une verticale (hauteur d'eau divisée en cellules) grâce à des ondes sonores (*pings*). Ces ondes sont diffusées sur les objets rencontrés au cours de leur parcours dans la colonne d'eau (particules minérales, organiques,...) puis rétrodiffusées vers l'émetteur, qui devient alors récepteur. La fréquence de cette rétrodiffusion est différente de celle de l'émission du fait de l'effet Doppler provoqué par les particules en mouvement dans la colonne d'eau. La différence entre fréquence émise et réfléchié permet de déterminer vitesses et orientations du courant ainsi que l'intensité du signal de la masse d'eau (figure 3).



Figure 2: Adcp Workhorse Mariner 600 KHz

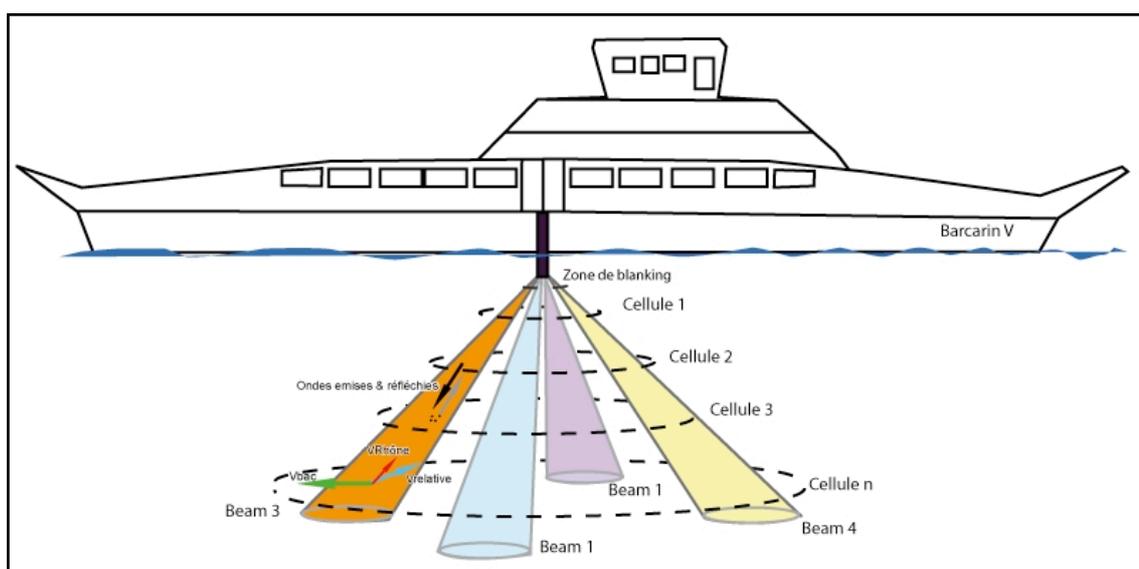


Figure 3 : Schéma du principe de fonctionnement de l'Adcp

Les différentes configurations de l'appareil doivent être définies soigneusement afin d'obtenir des données de qualité. Tout d'abord, il faut choisir le nombre de cellules de mesure le plus adapté (22 cellules ici) ainsi que leur taille (50cm), puis évaluer la hauteur de la zone d'ombre des faisceaux (88cm, zone invisible au niveau de l'ADCP). Il faut également définir le nombre d'impulsions sonores émises (pings) et leur intervalle de temps. La moyenne des pings est appelée un ensemble correspondant à un cycle de mesure. Dans le cadre du projet Barcarin toutes les impulsions sont conservées ; la configuration est de 1 ping par ensemble d'une durée de 0.1 seconde.

b. Le Turbidimètre Analite NEP395-MS:

Un turbidimètre de type NEP395-MS était initialement placé proche de l'Adcp afin de pouvoir être dirigé en sub-surface ou plus profondément à 1m de la ligne de flottaison du navire (Figure 4). Couplé avec les données de l'Adcp et des mesures de terrains, le turbidimètre permet d'affiner l'évaluation des quantités de matière en suspension sur l'ensemble de la colonne d'eau grâce à la mesure la turbidité de l'eau, sur la base d'unités NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Il permet d'avoir une mesure indirecte de MES (Matière en suspension) qui sert de référence pour une cellule de l'Adcp.

Quatre gammes de mesures étaient possibles sur ce turbidimètre et il a été initialement configuré par défaut à 0-400 NTU. Il s'est avéré par la suite que cette gamme était inadaptée au suivi. Si elle permet d'avoir une bonne idée de la turbidité en temps normal, la valeur de 400 NTU est dépassée en crue et dans ce cas les données ne sont plus utilisables. La gamme qui a été fixée sur la nouvelle sonde en poste fixe depuis Juillet 2014 est donc de 0-1000 NTU.

c. Le capteur de pression Pr-46x:

Un capteur de pression Keller Pr-46x a été installé sur le même support que le turbidimètre pour mesurer la pression exercée par le navire sur l'eau, ou plus exactement l'enfoncement des appareils en fonction de la charge du bac. La gamme de mesure varie de 0 à 0.2 bar (+/-0.1mbar) soit 0 à 203.95cm d'eau (+/- 0.1 cm). L'objectif de cet appareil était de pouvoir calculer l'enfoncement du Bac afin, si besoin, de faire des corrections sur le calcul des débits. Cette correction était prévue dans le cadre de débits mesurés en temps réel, ce qui n'a jamais pu être mis en place. Il s'avère au final que ce capteur présente peu d'intérêt.

d. Montage du système sur le Barcarin V

Les figures 4 et 5 montrent le montage des instruments sur leur support du flanc amont de *Barcarin V*.

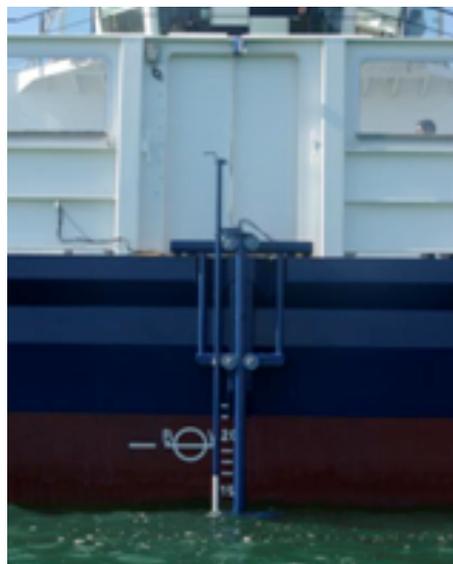
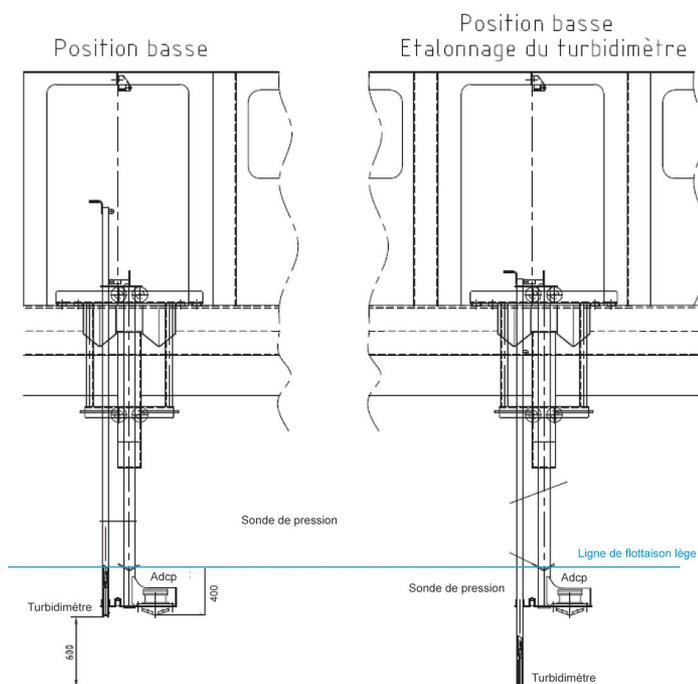


Figure 4 : Coupe du montage des instruments de mesure

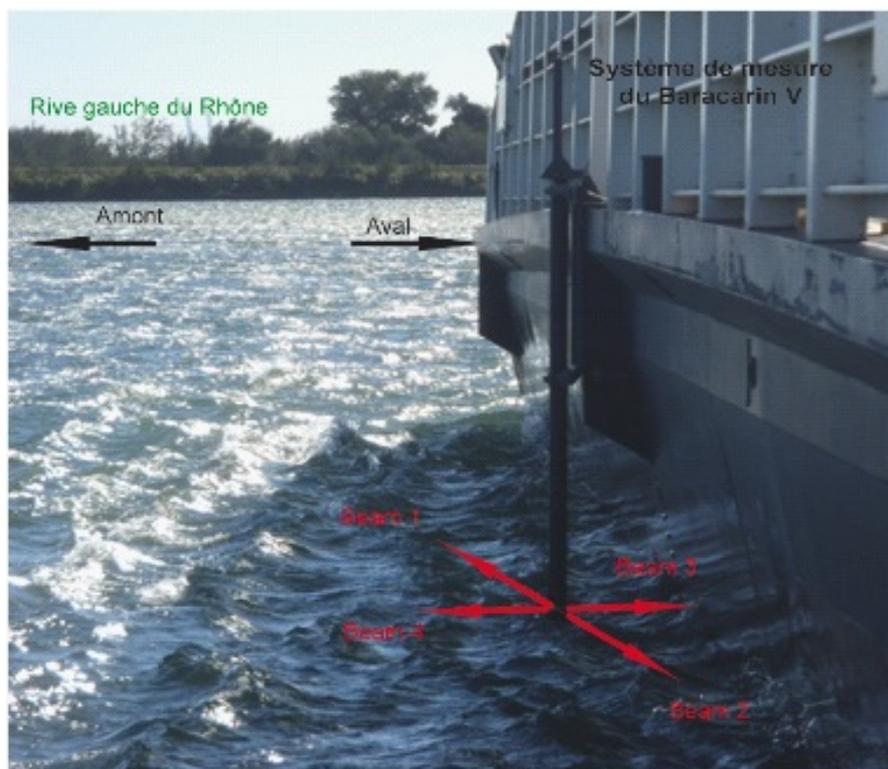


Figure 5 : Position de l'Adcp sur le Barcarin V

e. Appareils d'acquisition et de transmission

L'architecture des appareils et de leurs connexions est synthétisée en figure 1. Un boîtier de découplage galvanique a été disposé entre l'alimentation générale et le système de mesure. Il permet une alimentation en 24 volts et palie aux problèmes d'oxydation et de fuites de courants des appareils. Un deck ADCP (figure 6) régule le courant de manière homogène pour l'alimentation de l'Adcp et améliore la réception des données, en raison de la longueur du câblage (30m) entre l'Adcp et le PC de Barcarin.

Les trames du GPS du Barcarin V sont dupliquées pour que l'Adcp et les capteurs indépendants (turbidimètre et pression) reçoivent leur positionnement géographique. Pour ceci, deux appareils de conversion et de régulation des tensions pour les capteurs turbidimètre & pression et pour l'alimentation du Deck Adcp ont été ajoutés au système.



Figure 6 : Deck Adcp

e.1) Systèmes informatiques

3 Postes de travail sont fonctionnels :

- 1 PC à bord (réf. Nexcom fan-les type NISE 3150e) sur le Barcarin V reçoit les données ADCP 24h/24h 7j/7j ainsi que les données des capteurs de pression & du turbidimètre 22/24h 7 j/7j.
- 1 PC d'exploitation (réf. HP pro 3010) localisé à quai au niveau de la maison du Passeur. Ce poste permet une sauvegarde quotidienne de données enregistrées sur Barcarin V. De plus un onduleur (réf. APC smart-UPS RT 3000) est installé à la maison du Passeur afin d'assurer une alimentation électrique du PC de la maison du Passeur en cas de coupure de courant.
- 1 PC de post-traitement des données (réf. HP Z800) localisé au laboratoire de recherche du Cerege.

e.2) Systèmes de connexion

3 modems sont installés :

- Un modem (réf. Westermo RM 640) sur le Barcarin V permet d'obtenir un réseau local avec le PC de la maison du Passeur via une connexion Wifi.
- Un modem (réf. Westermo RM 640) à la maison du Passeur permet d'obtenir un réseau local avec le PC de Barcarin V via une connexion Wifi.
- Un modem Routeur (réf. LiveBox Inventel) permet d'obtenir une connexion internet sur un réseau privé accessible depuis le laboratoire du Cerege.

f. Fonctionnement global du système

Toutes les données des capteurs (Adcp, turbidimètre, capteur de pression & GPS) sont réceptionnées sur le PC à bord du *Barcarin V*. Deux suites logicielles gèrent l'acquisition des données :

- Le logiciel Vmdas.exe (société RDI) gère les paramètres d'acquisition des mesures de l'ADCP (configuration de la fréquence des mesures et des enregistrements, taille des cellules...) et il réceptionne les trames GPS. Les données de l'ADCP sont enregistrées en continu 24h/24h, 7j/7j. Plusieurs fichiers de caractéristiques et de formats différents sont générés par cette application.
- Le logiciel Barcarin.exe (société NKE) gère les paramètres d'acquisition des capteurs de pression et du turbidimètre (configuration des cadences des mesures et des enregistrements). Il réceptionne également les trames GPS. Les données sont enregistrées pendant les traversées du bac 22h/24h, 7j/7j.

Outre l'acquisition des données, l'application Barcarin.exe comporte d'autres fonctionnalités :

- *Fonctionnalité d'assemblage :*

Cette fonctionnalité a pour objectif de prendre en compte seulement les mesures acquises pendant les traversées. Lors des appontages, les mesures des capteurs de pression et de turbidité ne sont pas enregistrées.

Les enregistrements des capteurs (turbidimètre & pression) effectués lors des traversées subsistent dans un premier fichier journalier au format ASCII (.txt).

Les enregistrements des données de l'Adcp étant continus (même à quai), le logiciel Barcarin.exe découpe ces données par traversée puis assemble ces mesures moyennées

(Long Term Average) fournies par l'application Vmdas dans un second fichier journalier au format de l'Adcp (Annexe 2).

Ces deux fichiers de données en provenance de l'Adcp et des capteurs sont transmis automatiquement et quotidiennement vers un poste à quai situé dans la « maison du passeur » par liaison WIFI.

- *Fonctionnalité d'affichage*

Une interface graphique permet de visualiser la turbidité, la pression et la température du Rhône en temps réel (figure 7) sur les PC du projet mais aussi de l'extérieur du réseau via un navigateur internet. La position ainsi que la trajectoire du navire est également visible sur un fond d'image aérienne ou satellite à très haute résolution.

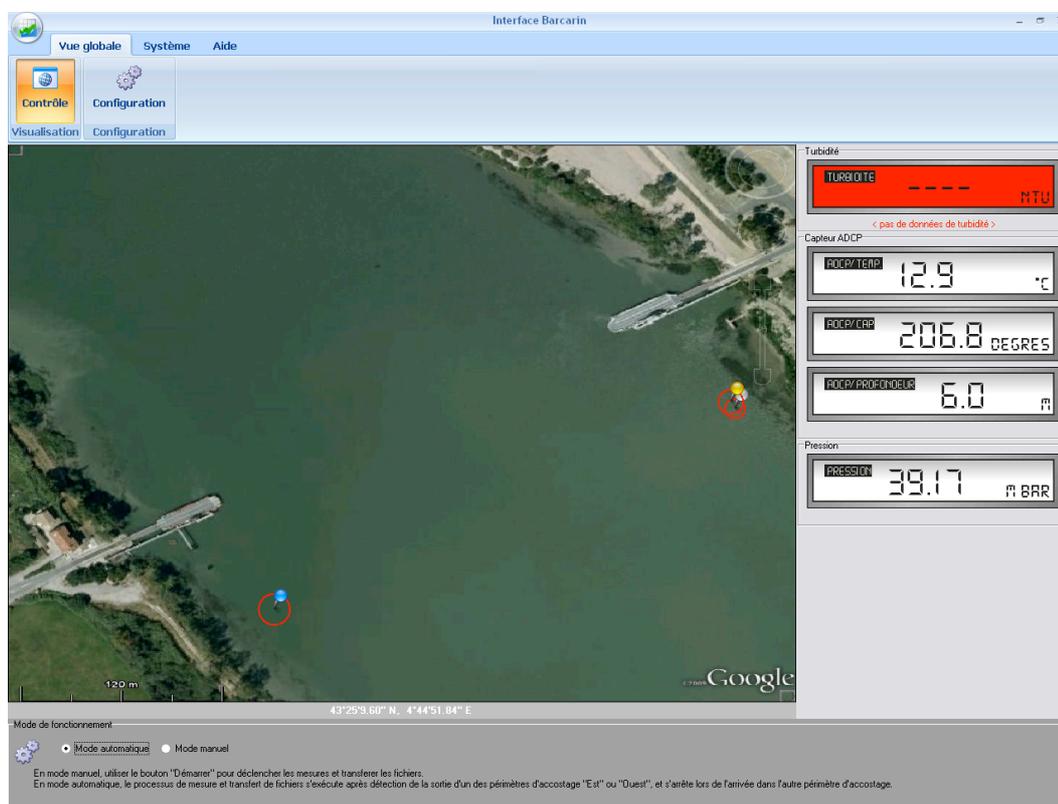


Figure 7 : Interface graphique du logiciel Barcarin V

- *Fonctionnalité de suivi technique :*

L'application génère un journal des événements portant sur le fonctionnement et dysfonctionnement des appareils ainsi que des suites logicielles. Un fichier au format ASCII (.Log) est créé lors du lancement et de l'arrêt de l'application (figure 8) Cependant, l'arrêt inopiné du PC ou un blocage du système ou de l'application ne sont pas répertoriés dans ce fichier. Cette dernière fonctionnalité permet de réaliser un bilan de fonctionnement des instruments de mesures.

```

2012-09-03_10-46-54.Log - Bloc-notes
Fichier  Edition  Format  Affichage  ?
03/09 10:46 Lancement de l'application VmDas.
03/09 10:46 Démarrage de l'application C:\Nke\Barcarin.exe version 1.0.1.34
03/09 10:46 Le dossier de rejet contient des fichiers non transférés
03/09 10:46 Capteur ADCP : impossible de se connecter au port TCP de l'appli
03/09 10:46 position en A, arrêt enr. [5]
03/09 10:46 Fin de l'enregistrement
03/09 10:46 Capteur ADCP : ne répond pas
03/09 10:46 délais de sécurité. [7]
03/09 10:47 Capteur ADCP : répond à nouveau
03/09 10:54 sortie de position A, debut enr. [10]
03/09 10:55 Capteur turbidité : nettoyage de la tête
03/09 10:55 Début de l'enregistrement
03/09 10:57 position en B, arrêt enr. [20]
03/09 10:57 Fin de l'enregistrement
03/09 10:57 Le fichier de mesure C:\Nke\System\_traversee\Barcarin_030912105
03/09 10:57 Le fichier de mesure C:\Nke\System\_traversee\ADCP_030912105512.
03/09 10:57 délais de sécurité. [25]
03/09 10:57 Capteur ADCP : ne répond pas
03/09 10:57 Capteur ADCP : répond à nouveau
03/09 11:03 Capteur ADCP : ne répond pas
03/09 11:03 Capteur ADCP : répond à nouveau
03/09 11:04 Capteur ADCP : ne répond pas
03/09 11:04 Capteur ADCP : répond à nouveau
03/09 11:04 sortie de position B, debut enr. [30]
03/09 11:04 Début de l'enregistrement
03/09 11:07 position en A, arrêt enr. [5]
03/09 11:07 Fin de l'enregistrement
03/09 11:07 Le fichier de mesure C:\Nke\System\_traversee\ADCP_030912110425.
03/09 11:07 Le fichier de mesure C:\Nke\System\_traversee\Barcarin_030912110

```

Figure 8 : Exemple du fichier Log de l'application Barcarin V (journal des événements)

g. Bilan de fonctionnement sur la période 2011-2012

Les premières données d'acquisition en continu ont débuté en Juillet 2011. Depuis cette date, le dispositif d'acquisition est fortement sollicité car il est sous tension continue 24/24h et 7/7jours. Par ailleurs, les contraintes du milieu physique (humidité, température, vent, poussières,...) ainsi que ceux propres à la navigation (vibrations, corrosion, à-coups lors des appontages...) entraînent une détérioration rapide du matériel. De ce fait, de nombreux incidents se sont produits et des journées d'acquisitions ont été perdues. Le texte ci-dessous présente un bilan de fonctionnement en termes de quantité de données sur la période 2011-2012 puis un résumé sur la période 2013-2014. Le bilan des acquisitions sur la période du 03/03/2011 au 10/09/2012 indique que les mesures ont été prises pendant 311 jours soit 51% de la période d'activité (Figure 9). La durée réelle des traversées est 2 à 3 minutes selon les conditions du milieu et le pilote, plus de la moitié des traversées (52%) ayant une durée supérieure à 3 minutes. Les enregistrements des traversées commencent et s'arrêtent en fonction des coordonnées géographiques du bateau à quai avec une marge d'erreur estimée +/- 5m. La faible précision du GPS engendre des enregistrements continus qui ont pour conséquence une baisse de la fréquence quotidienne des traversées et une hausse de leur durée. Ceci impacte directement la qualité des fichiers qui présentent alors des enregistrements où des traversées se composent de plusieurs aller-retour ainsi que des mesures à quai.

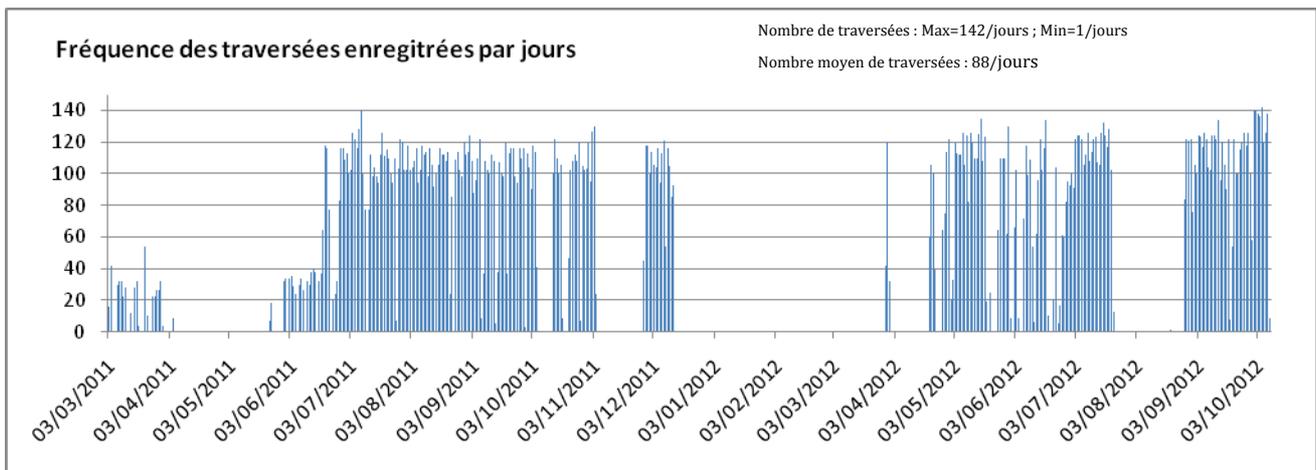


Figure 9 : Fréquence des traversées journalières enregistrées par l'équipement Barcarin V

g.1) Bilan technique des instruments de mesures

Dysfonctionnement de l'Adcp

L'Adcp s'est interrompu sur plus de 20% des enregistrements (figure 10). Le fichier log ne discerne pas les interruptions manuelles lors des phases de configuration ou celles des incidents techniques.

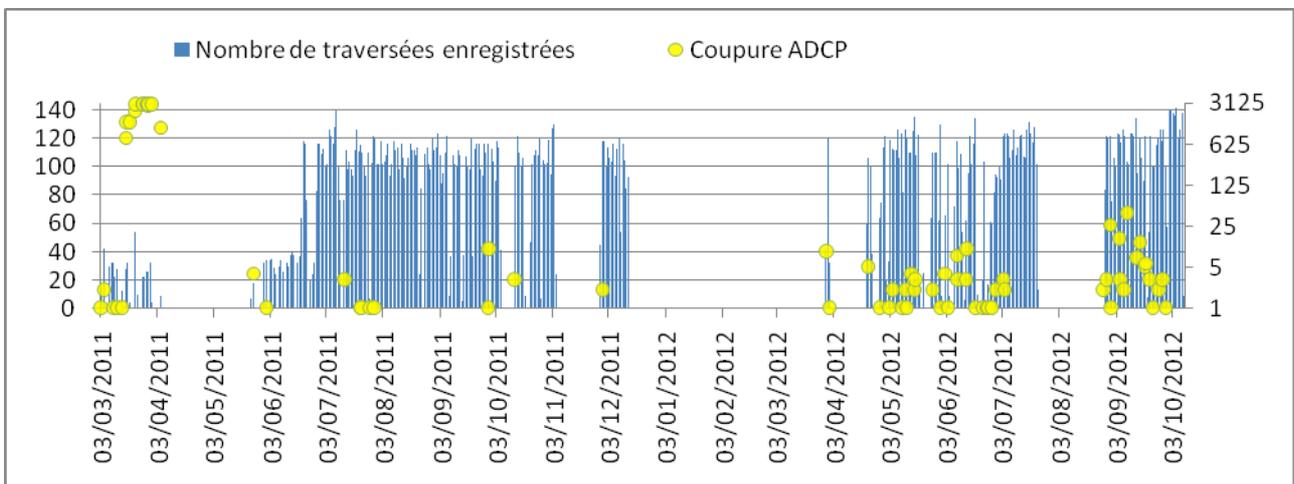


Figure 10 : Nombre de coupure de l'Adcp en fonction des traversées effectuées par le Barcarin V

L'Adcp n'a plus fonctionné à partir du mois d'octobre 2011 en raison d'une forte corrosion des fiches et du câble de connexion. Celui-ci a été révisé par les services techniques de la société Teledyne RDI et le câble d'alimentation a dû être provisoirement remplacé. L'Adcp a été de nouveau opérationnel à partir du 23/03/2012.

En septembre 2012, un peu moins de 6 mois après la dernière intervention, le câble provisoire a été de nouveau endommagé suite à son frottement contre la structure (Figure 11). Il a été remplacé par un câble « sans fiche » fixé directement sur l'Adcp. Un nettoyage des faisceaux de l'Adcp a aussi été

effectué plusieurs fois en raison du dépôt d'algue recouvrant les têtes. A première vue ce dépôt n'altère pas les capacités de l'appareil.



Figure 11 : Etat du câble Adcp et des faisceaux de l'Adcp après 175 jours de fonctionnement

Dysfonctionnement du turbidimètre et du capteur de pression

Vingt-cinq pourcent des journées d'enregistrement ont connu des coupures du turbidimètre (figure 12). Le capteur de pression est fonctionnellement plus stable, seulement 11% des journées d'enregistrement ont subi des coupures. Il est parfois difficile de connaître l'origine des coupures des capteurs qui peuvent être être techniques ou intentionnelles lors des configurations. En octobre 2012, le turbidimètre a connu une casse, son tuyau de protection (en acier) étant coupé net. Il s'agit probablement d'une usure associée à des forces de traction permanentes lors de l'avancée du bateau. Le turbidimètre n'a pas pu être réparé, et le choix du remplacement s'est porté sur une sonde EX02 en poste fixe. Elle a été mise en place en Juin 2014 sur un des piliers du ponton de l'ancien bac, en rive droite.

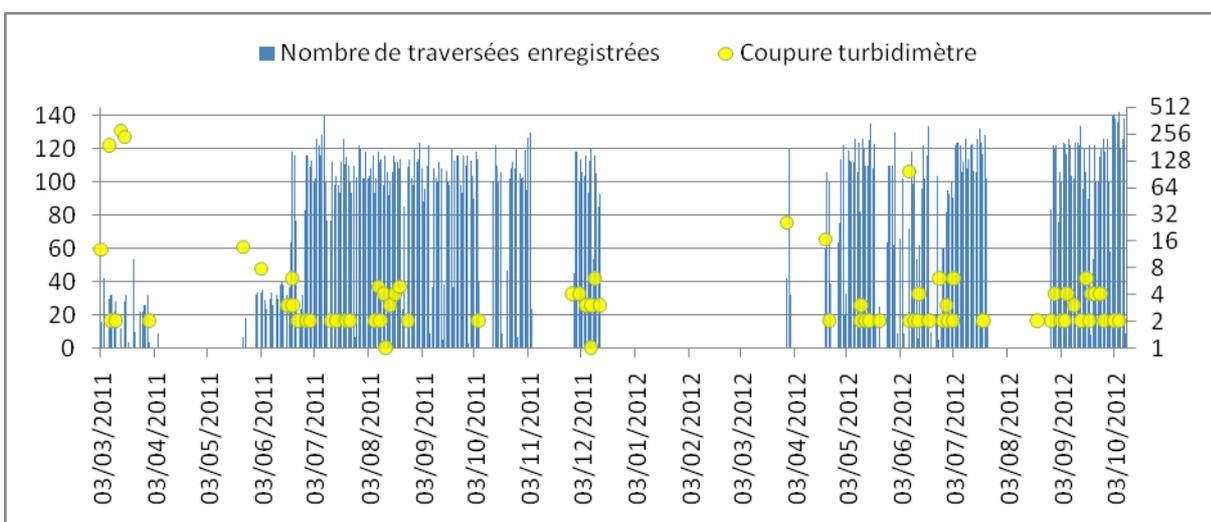


Figure 12 : Nombre de coupure du turbidimètre en fonction des traversées effectuées par le Barcarin V

Dysfonctionnement et instabilité du GPS

La faible précision du GPS a été évoquée ci-dessus par la variabilité de la fréquence et de la durée des enregistrements des traversées. On constate également une divergence des trajectoires du bateau (le cap) estimées par l'Adcp (mode bottom track) et calculées par le GPS. En effet, il apparaît à certaines périodes et de façon aléatoire de nombreuses coupures du GPS (figure 13) et aussi une dégradation des trames NMEA émises par le GPS. Ceci engendre d'une part un blocage du logiciel d'acquisition Vmdas.exe des données de l'ADCP et d'autre part une perte d'information de localisation pour les capteurs de pression et du turbidimètre.

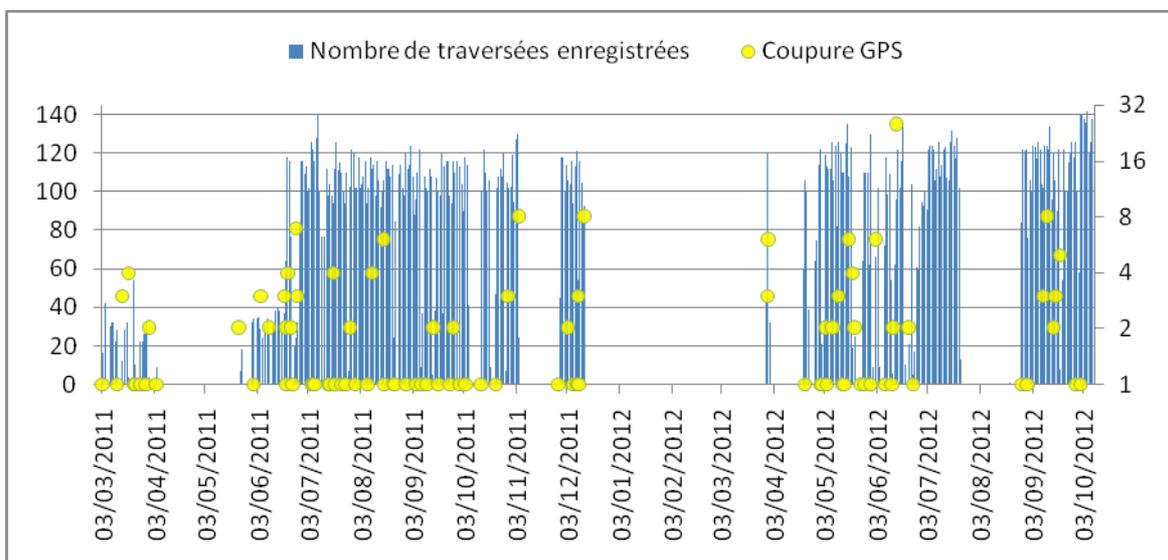


Figure 13 : Nombre de coupure GPS en fonction des traversées effectuées par le Barcarin V

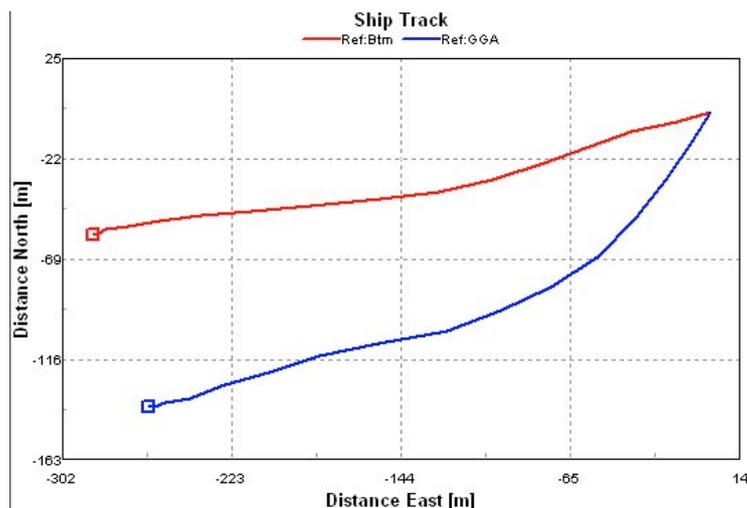


Figure 14 : Comparaison des mesures GPS (Réf: GGA) & Adcp (Réf: Btm) du cap suivi par le Barcarin V lors d'une traversée

Sur la figure 14, les trajectoires (ou cap) du navire calculées en fonction de l'Adcp (bottom track, Réf : Btm) ou du GPS (Réf : GGA) doivent plus ou moins se chevaucher. Ici, on observe très bien une divergence qui apparaît dès le début d'une traversée et montre l'imprécision du GPS.

Des tests réalisés en septembre 2012 avec la société RDI et un GPS Différentiel à haute précision montrent bien des trajectoires concordantes entre l'Adcp et le DGPS. Ceci prouve que le GPS du *Barcarin V* est imprécis et qu'il ne peut être utilisé pour améliorer les données acquises par l'Adcp. En cas d'étude lors de crue, il est recommandé d'utiliser un GPS différentiel.

g.2) Bilan des durées d'activités des instruments de mesures

En terme de durée de fonctionnement lors des phases d'enregistrements pendant les traversées, les instruments de mesures ne présentent pas de divergence majeure mais quelques différences seulement (tableau 1). En effet, sur la totalité des 311 jours, les instruments les plus fiables, selon le critère de durée de fonctionnement, sont : le capteur de pression (~92% d'activité), le turbidimètre (~84% d'activité), l'Adcp (~82% d'activité) puis le GPS (~78% d'activité). Les plus longues coupures (>21 heures) concernent les capteurs de pression et le GPS (plus de 6% d'inactivité chacun), l'Adcp (~4% d'inactivité) et le turbidimètre. Les dysfonctionnements inférieurs à 3h représentent environ 10 à 12% de la durée d'activité des instruments à l'exception du capteur de pression.

	<i>Durée en heure</i>	<i>Adcp</i>	<i>Turbidimètre</i>	<i>Pression</i>	<i>GPS</i>
Activité		81.7%	84.2%	91.6%	78.1%
inactivité	3h	11.6%	11.9%	1.0%	10.0%
	6h	0.6%	1.3%	0.3%	0.6%
	9h	0.6%	0.3%	0.0%	0.6%
	12h	0.3%	0.0%	0.0%	0.6%
	15h	0.3%	0.3%	0.0%	0.3%
	18h	0.3%	0.0%	0.3%	2.3%
	21h	0.3%	0.3%	0.3%	1.3%
	24h	4.2%	1.6%	6.4%	6.1%

Tableau 1 : récapitulatif des durées d'activités des instruments pendant 311 jours

Les mesures les plus importantes sont réalisées par l'Adcp et le turbidimètre. Il apparaît que ces deux instruments sont inactifs au même moment seulement 7 jours sur 311 (figure 15). De ce fait, chaque jour dispose d'un nombre de jeu de données exploitable.

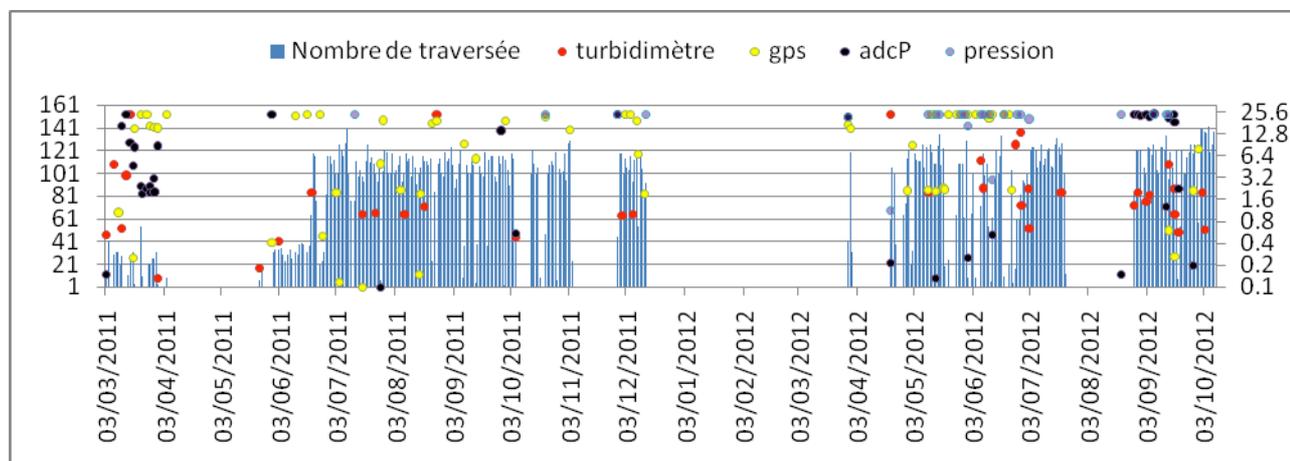


Figure 15 : Répartition de la durée d'inactivité des instruments de mesure selon les traversées

g.3) Problèmes sur les appareils électriques et la connexion Wifi

Le boîtier de découplage galvanique et l'onduleur ont connu des pannes et ont dû être réparés. Des problèmes sont aussi apparus sur la connexion Wifi. Cette connexion entre le PC du Barcarin et celui de la Maison du Passeur assure une sauvegarde quotidienne des données d'acquisition la nuit lors de l'arrêt du bac, mais elle permet aussi l'affichage en temps réel de la position du bateau et des mesures de turbidité, pression et température du Rhône. Elle n'entraîne pas d'incidence au niveau des données mais la liaison est coupée à mi-traversée en direction de la rive gauche du Rhône, entraînant une perte de l'affichage sur l'interface graphique. Deux réflecteurs ont été installés au niveau de l'antenne du bac et l'antenne de la maison du passeur (figure 16) afin d'améliorer la liaison Wifi.

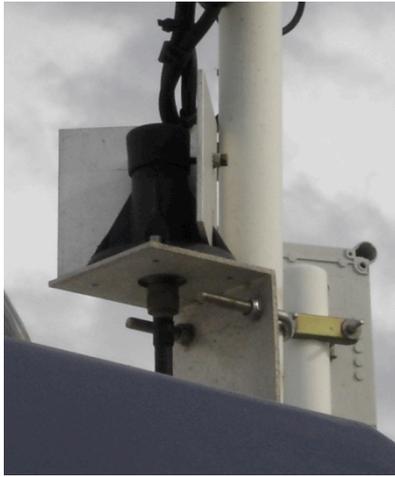


Figure 16 : Antennes Wifi et réflecteurs installés sur le Barcarin V et au niveau de la maison du Passeur

g.4) Bilan technique des postes informatiques et des suites logicielles

Des coupures de courant ont généré des bugs au niveau de la carte graphique entraînant un blocage complet du système. Une mise à jour des pilotes de la carte graphique et une optimisation du bios ont été réalisées en avril 2012 afin que le PC redémarre automatiquement en cas de coupure de courant. Au niveau de suites logicielles, les applications Barcarin.exe et Vmdas se sont figées arrêtant les enregistrements. Les mauvaises trames NMEA du GPS sont la cause de l'arrêt de l'application Vmdas. L'arrêt inopiné de Vmdas entraîne le dysfonctionnement du logiciel Barcarin.exe.

h. Bilan sur la période 2013-2014 et retour d'expérience

En 2013 et 2014, les taux de disponibilité des données Adcp sont similaires aux 2 années précédentes: on constate des pertes de données dues à des erreurs de communication entre les appareils (GPS vers PC), des bugs logiciels (Vmdas ou Windows) ou des problèmes matériels sur les capteurs ou l'ordinateur (saturation ou panne disque dur).

Les pannes les plus sérieuses apparues durant ces 2 ans sont :

- La mise hors service définitive du capteur de pression fin 2012: ce capteur devait fournir la profondeur d'enfoncement de l'Adcp afin d'intégrer ce paramètre pour un calcul plus précis du débit.
- La mise hors service définitive du capteur de turbidité en Novembre 2012.

- Une panne du disque dur fin 2013 qui a nécessité une réinstallation complète du système et la perte de données pendant 4 semaines consécutives.

Aucun logiciel de supervision de l'application n'a été prévu à la conception du système. On s'assure de son fonctionnement correct grâce à une connexion ADSL jusqu'au PC situé dans la maison du passeur puis une liaison wifi vers le Bac. Ce mode de fonctionnement est suffisant pour un objectif de suivi d'événements hydrologiques choisis : crue ou étiage ; et on accepte de ne pas avoir de suivi permanent.

La gestion de l'ensemble du système s'est avérée plus lourde que prévue pour cause de problèmes récurrents, associés à des casses, de l'usure ou des dysfonctionnements. Une personne dédiée à 100% au système est probablement inutile, mais une surveillance constante et un entretien sont nécessaires et impliquent un personnel qualifié et disponible en cas de panne. Malgré ces problèmes, l'acquisition des données depuis 2011 est très importante et constitue une base unique, à notre connaissance, sur un fleuve français. L'interprétation de ces données est encore en cours, et une présentation des principaux résultats traités à ce jour est faite dans la partie qui suit.

3. FLUX LIQUIDES ESTIMÉS PAR L'ADCP

L'Adcp est un courantomètre à effet doppler qui mesure la vitesse de déplacement des MES dans la colonne d'eau, traduisant ainsi les vitesses des courants. Ce déploiement permet également d'évaluer, à partir de l'intensité acoustique rétrodiffusée, la répartition spatiale des matières en suspension dans la section étudiée. Cette étape passe toutefois par une calibration décrite plus loin. L'estimation du débit liquide sur l'ensemble de la section est faite à partir du logiciel Winriver II. Au début du projet, il était envisagé de réaliser un découpage automatique des données utilisables sur l'ensemble des mesures journalières pour pouvoir évaluer un débit par traversée du bateau. Ce découpage n'est finalement pas fonctionnel car il nécessite en fait une programmation complexe. Toutes les données enregistrées sont donc disponibles, mais le choix du profil à étudier reste pour l'instant manuel, et il appartient au chercheur de choisir l'heure de départ et d'arrêt de son profil pour le traitement. Nous avons opté pour deux possibilités : (i) le débit est calculé sur un seul transect et considéré comme étant représentatif de la journée ; (ii) le débit journalier est calculé à partir de la moyenne de trois classes horaires, qui pourraient être 6h-8h, 13h-15h, 19h-21h. Dans chacune de ces classes, un seul transect représentatif est choisi et le débit liquide journalier est calculé en faisant la moyenne des trois débits de ces classes horaires. Le choix de l'une ou l'autre de ces possibilités est à faire en fonction de la question traitée.

Il faut noter qu'il existe deux zones « aveugles » en surface (environ 88 cm) et à proximité du fond dans lesquelles l'Adcp ne peut pas faire de mesure. Ces zones sont prises en compte par des corrections dans les calculs de débits liquides par le logiciel.

Une comparaison a été faite entre les débits calculés par Adcp et ceux mesurés à la station SORA à Arles par la CNR. Les débits obtenus par les mesures Adcp étaient dans un premier temps sous-estimés d'environ $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, du au fait que le bateau et l'Adcp s'arrêtent à environ 10 m avant la berge réelle. Ce volume d'eau non mesuré est maintenant intégré dans le calcul du logiciel, et les débits sont corrigés de ce volume (utilisation de la fonction *Edge Estimation* sur Winriver).

La comparaison entre ces deux jeux de débits a été faite sur des données de mai 2012 et octobre 2012, pour des débits de 500 à presque $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les données de débits de la station de Sora sont des valeurs journalières, celles de l'ADCP sont moyennées sur trois transects. Le temps de

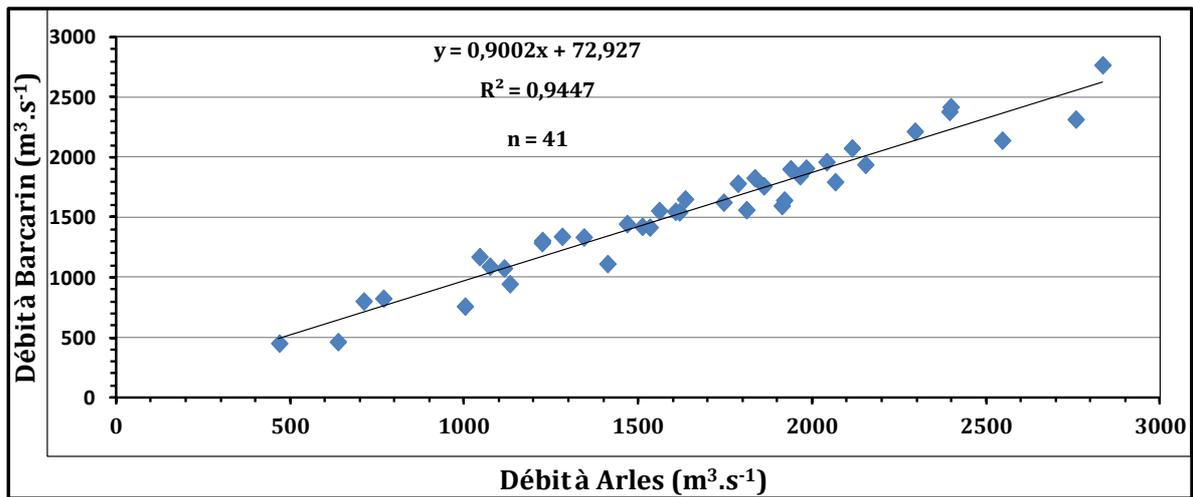


Figure 17. Corrélation des débits liquides journaliers entre Arles et Barcarin (Mai 2012 - Octobre 2012)

transit entre Arles et Barcarin est inférieur à la journée et, par simplification, aucun décalage n'a été pris en compte pour cette comparaison.

Les flux liquides mesurés à Arles et à Barcarin sont très significativement corrélés (Figure 17), mais les débits à Arles sont en moyenne plus élevés. Dans certains cas la différence entre les deux est importante et peut monter jusqu'à $200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Cette différence n'a pas de rapport direct avec le débit mais la très bonne pente de la régression indique qu'elle augmente avec celui-ci. Elle est peut être associée à des problèmes dus à la turbulence générée par les moteurs du bateau. De manière générale, nous avons considéré que les données de débits liquides issues de l'Adcp sont correctes et utilisables pour les calculs de débit solides.

i. Evolution saisonnière des débits et champs de vitesse des courants

Les variations hydrologiques contrôlent les vitesses d'écoulement et pour partie les concentrations en MES dans la colonne d'eau. La figure 18 présente une comparaison inter-saisonnière de ces vitesses d'écoulement, faite sur des périodes de débits « normaux » inférieurs au module du Rhône ($1700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). La répartition spatiale montre deux cas principaux avec (i) les basses eaux estivales pour des débits autour de $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et (ii) les débits proches du module ($1700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Lors des basses eaux, on observe une structuration verticale nette avec des vitesses plus élevées dans les 4 premiers mètres de la colonne d'eau (sur 12 m de verticale) et essentiellement au centre du chenal. Les berges et le fond du chenal sont caractérisés par des valeurs relativement plus faibles, en

accord avec le schéma classique des écoulements dans les systèmes fluviaux. Ce site étant soumis aux effets de la marée, cette structuration verticale est aussi influencée par la présence du coin salé due aux remontées d'eau de mer plus dense et qui s'écoulent au fond.

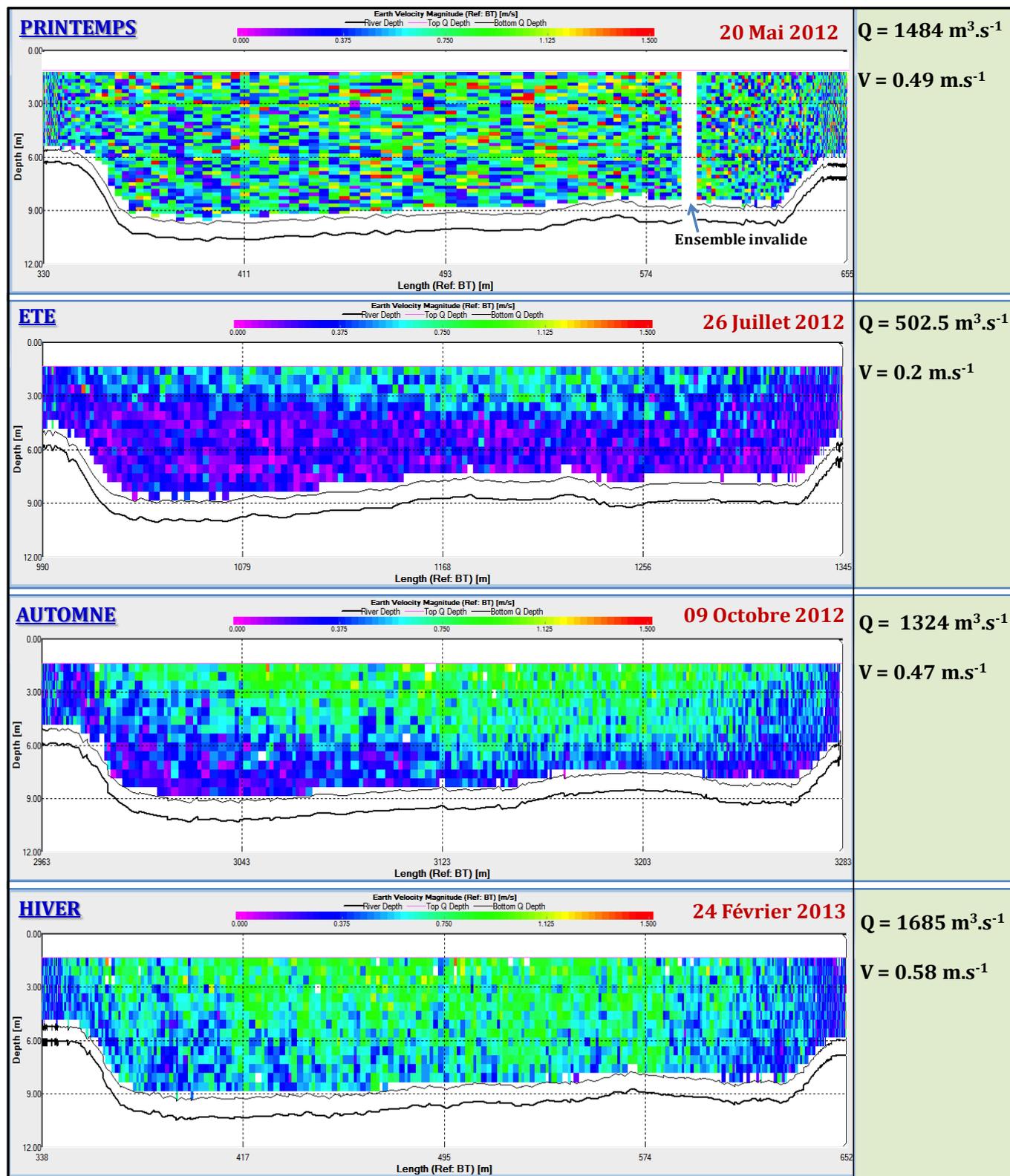


Figure 18. Evolution saisonnière du débit et des vitesses de courant du Rhône au niveau de Barcarin (hors crue). L'échelle en couler des vitesses est en m/s.

Cette structuration peut être observée jusqu'au début de l'automne mais avec une plus faible hauteur d'influence. Dès que le débit du Rhône dépasse $1500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, cette structuration verticale disparaît et les plus faibles vitesses sont observées principalement au niveau des berges (Figure 18_hiver et printemps).

Quelle que soit la répartition spatiale, la corrélation entre débit et vitesse moyenne du courant est excellente (Figure 19). Ces vitesses moyennes varient de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ à $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ des basses eaux estivales ($500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) jusqu'au module ($1700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Les vitesses d' 1 m.s^{-1} sont atteintes lorsque le débit du Rhône dépasse $3000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et les vitesses maximales que nous avons enregistrées pendant les périodes de crues sont de $1,4 \text{ m.s}^{-1}$.

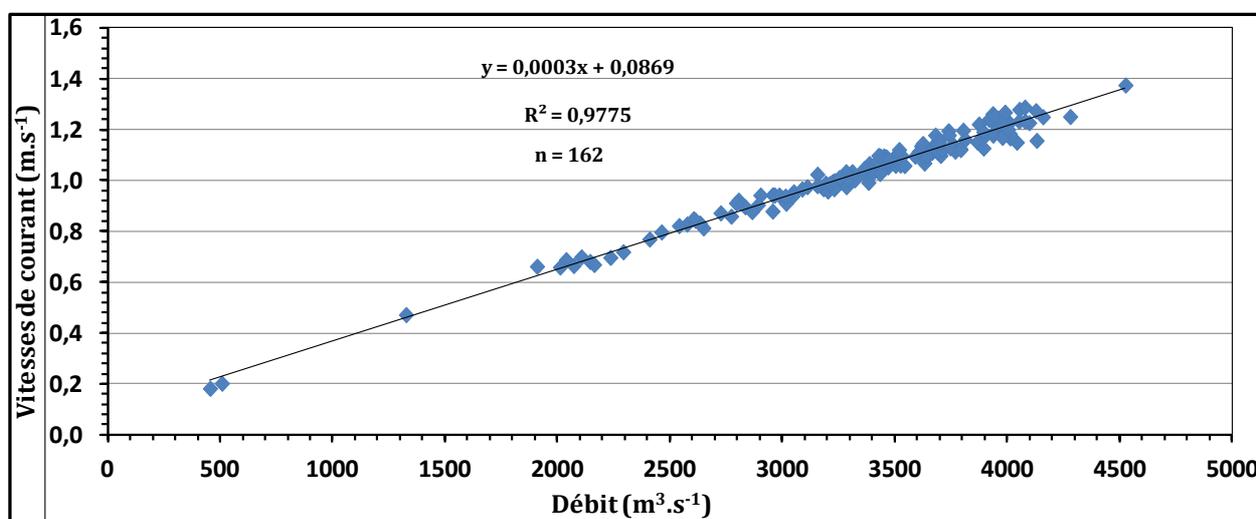


Figure 19. Relation débits liquides et vitesses de courants mesurés par l'ADCP à Barcarin

4. FLUX DE MATIÈRE EN SUSPENSION ESTIMÉS PAR L'ADCP

j. Variabilité spatiale des matières en suspension

Les Adcp sont de plus en plus utilisés aujourd'hui pour déterminer les concentrations en matières en suspension et estimer des flux solides en transit dans les cours d'eau et/ou dans les environnements côtiers estuariens, lagunaires ou deltaïques. Le principe repose sur la rétrodiffusion ntité de matières en suspensacoustique dont l'intensité dépend des propriétés physico-chimiques de l'eau mais aussi de la nature, de la taille et de la quaison présentes dans la

section de la colonne d'eau étudiée. Sur ce principe, l'utilisation du signal rétrodiffusé de l'Adcp pour quantifier des flux de MES nécessite une calibration à partir de concentrations réelles.

A Barcarin, un protocole d'échantillonnage de MES a été mis en place et des campagnes de prélèvements ont été organisées régulièrement depuis octobre 2012 jusqu'à aujourd'hui. Ces prélèvements sont faits à partir du bac à l'aide d'une bouteille de prélèvement de type Niskin équipée d'une sonde CTD (conductivity, Temperature, Depth) afin de connaître avec précision les profondeurs de prélèvements dans l'eau. Les concentrations de MES sont déterminées par la méthode de filtration classique (filtre 0,45 μm), et l'analyse granulométrique est faite à l'aide du granulomètre laser Beckman Coulter de type LS 13320 du laboratoire de sédimentologie du CEREGE.

Une étude fine de la variabilité spatiale des MES a été faite durant deux crues particulièrement suivies de Novembre 2012 afin de valider la représentativité des mesures, quel que soit l'endroit de prélèvement dans la colonne d'eau. Ces prélèvements ont été faits à plusieurs profondeurs et sur 3 verticales (rive droite, rive gauche et au centre du chenal). La figure 20 reproduit l'évolution des débits liquides sur ces deux crues et la figure 21 montre la distribution des MES mesurées aux mêmes moments.

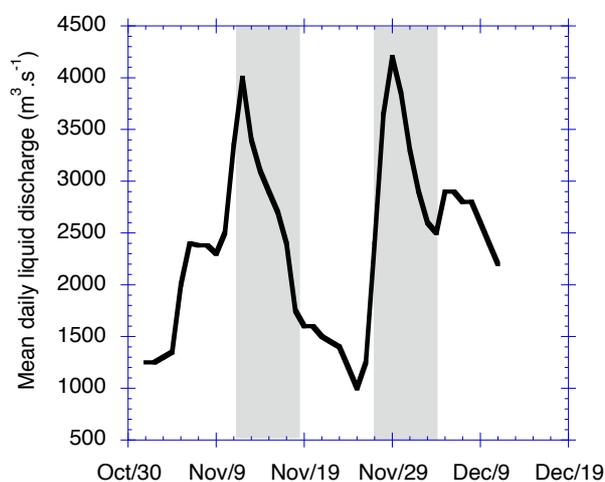


Figure 20 : évolution des débits liquides (enregistrés à Arles par la CNR) lors des deux crues échantillonnées de Novembre 2012. Les périodes d'échantillonnages sont indiquées par les rectangles grisés.

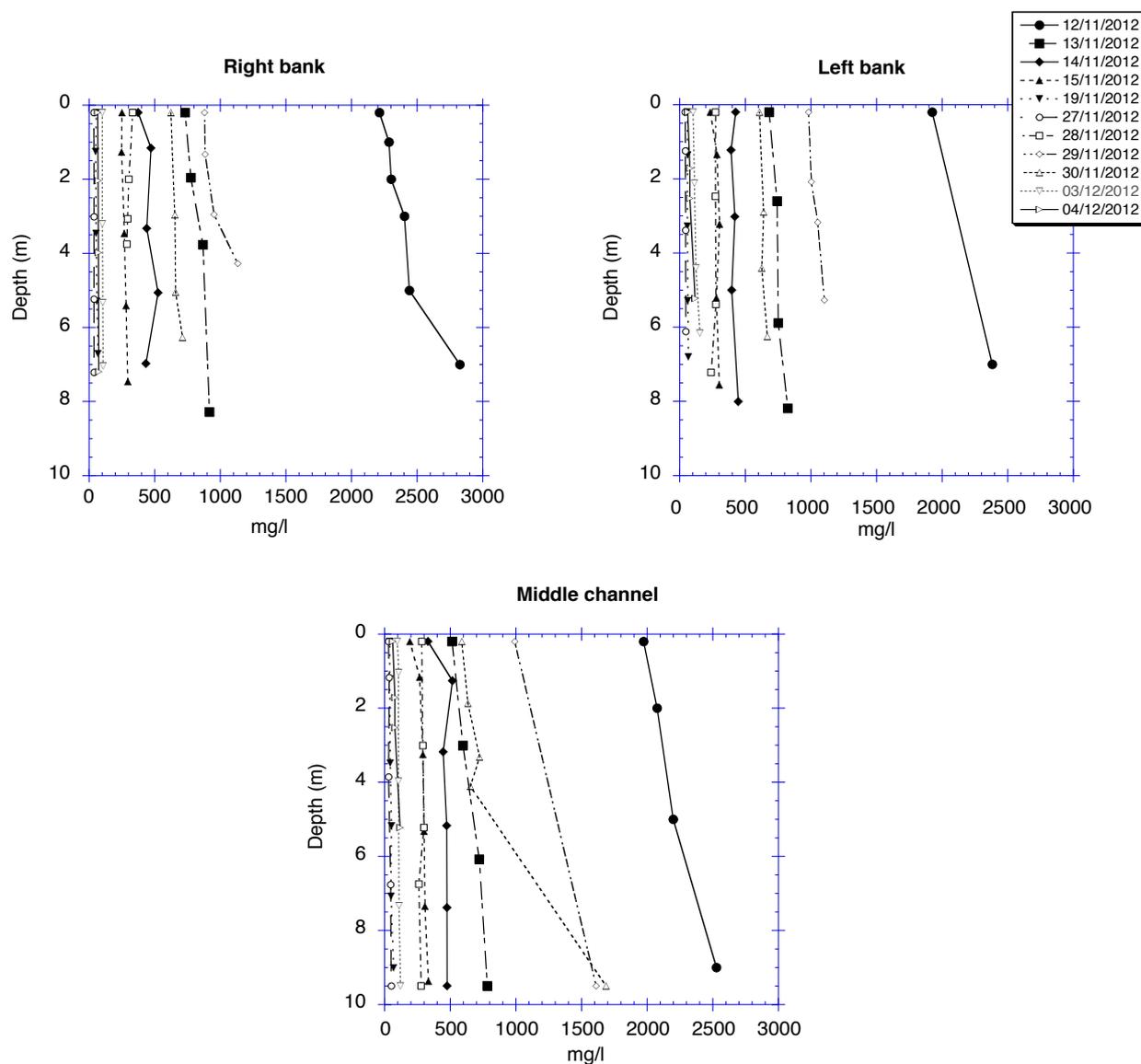


Figure 21 : Variations des concentrations en MES entre les rives gauche, droite et le centre du chenal à Barcarin, lors des crues de novembre 2012.

Le maximum de concentration est observé classiquement lors du premier pic de crue (jusqu'à 2800 mg/l le 12/11), mais le résultat important est une très faible différence spatiale pour une date donnée. On constate aussi une très faible variation sur une verticale, exceptée le 3/12 au centre et surtout le 12/11 où du transport par charriage près du fond apparaît sur le point le plus profond pour les 3 verticales.

Sur ce constat, on peut considérer qu'un prélèvement proche de la surface est suffisant pour assurer une calibration correcte entre concentrations réelles, mesures de turbidité et intensité rétrodiffusée. Cependant, un tel échantillonnage ne permet pas d'avoir une idée sur la variation verticale de la taille des particules qui a aussi une influence sur le signal et doit être prise en compte.

La procédure de calibration du signal rétrodiffusé de l'Adcp se fait par le logiciel Plume Detection Toolbox (AquaVision) et comprend trois étapes. Les données de concentration de MES en mg/l, correspondant à chaque profondeur de prélèvement sont introduites pour la conversion de l'intensité acoustique rétrodiffusée en concentration massique (mg/l) pour toutes les cellules de mesures. L'atténuation du signal acoustique due aux propriétés physico-chimiques de l'eau est également prise en compte. La deuxième étape consiste à corriger la part du signal acoustique atténuée par les particules en suspension dans l'eau. Le signal acoustique étant plus sensible aux particules les plus fines : plus le sédiment est fin, plus l'atténuation du signal augmente. Cette étape est fondamentale, surtout quand on s'intéresse au transport sédimentaire en suspension dans le Rhône en période de crue où plus de 90% des MES sont constitués par la fraction fine, silto-argileuse. L'onglet « Environmental » du logiciel PDT permet de prendre en compte les différentes tailles des particules afin de corriger ces pertes et d'améliorer ainsi le signal reçu. La troisième et dernière étape permet d'itérer sur la relation de la calibration afin de mieux estimer les flux totaux de matières en suspension exprimés en kg/s.

k. Transferts solides lors des périodes de crue

Il a largement été démontré que l'essentiel du transport solide dans le Rhône se produit lors des crues qui peuvent transporter entre 80 et 90% du flux annuel solide. Plus les crues sont importantes ou nombreuses sur une année, plus ce pourcentage augmente. Il est donc important de se concentrer sur les données obtenues sur ces événements. Sur la période traitée ici, trois crues ont pu être suivies en Mai et Novembre 2012.

k.1) Crue de Mai 2012

Une crue printanière de faible intensité a eu lieu en Mai 2012 (pic de crue à $2850 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) et 3 journées d'échantillonnages ont pu être réalisées (figure 22). Les figures 23 et 24 montrent l'évolution des vitesses d'écoulement et l'intensité rétrodiffusée (associée aux MES) lors de la montée de crue, le segment de crête et la courbe de décrue (figure 24).

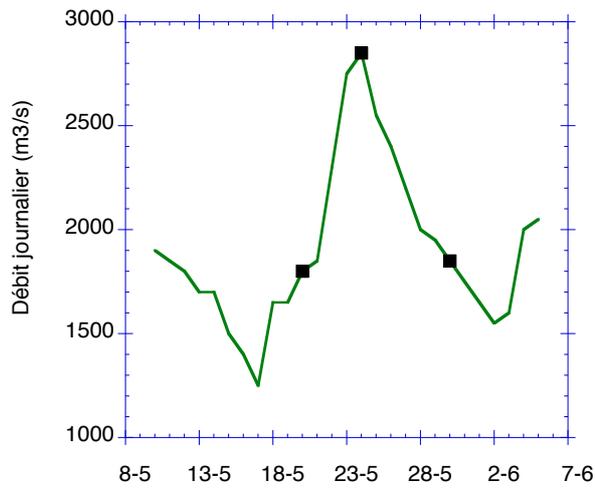


Figure 22. Hydrogramme de crue, station d'Arles (10 mai - 5 juin 2012). Données débit CNR. Les carrés indiquent les journées de prélèvements d'échantillons.

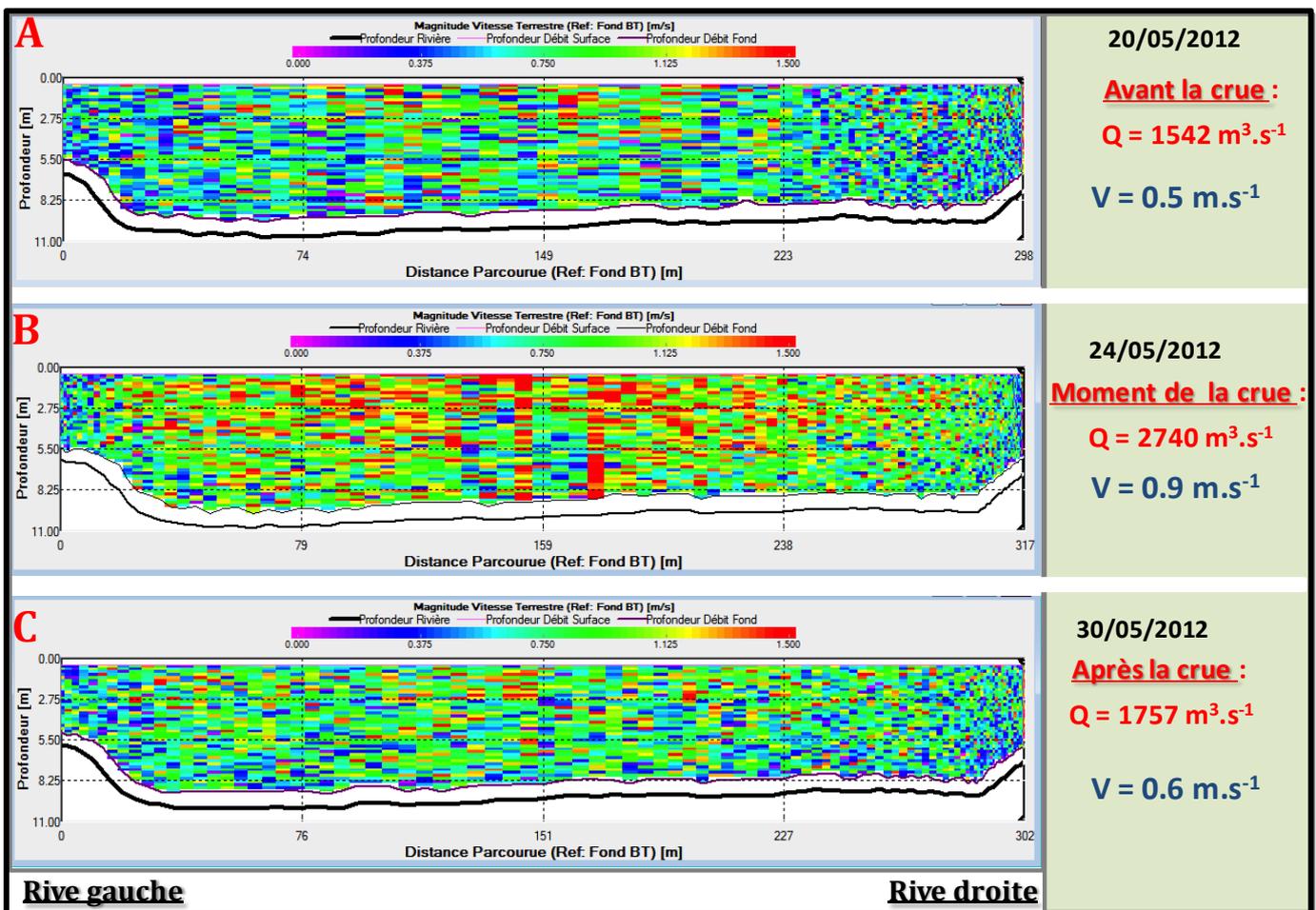


Figure 23. Vitesses des courants mesurées au niveau de Barcarin (crue du 24 mai 2012)

Les vitesses moyennes de courant sont de 0,5, 0,9 et 0,6 m.s⁻¹ pour des débits journaliers à Arles de 1800, 2850 et 1800 m³.s⁻¹ (données CNR). Les profils ne montrent pas de structuration verticale ou horizontale, à l'exception des rives gauche et droite qui semblent présenter des vitesses relativement plus faibles. Cette homogénéité des vitesses a une influence directe sur les processus de décantation et de transport des matières en suspension.

L'intensité du signal rétrodiffusé évolue avec les débits. Elle est globalement homogène en début de crue (fig 24 A & B) sur l'ensemble du profil avec des valeurs comprises entre 100 et 110 dB. Lorsque le débit augmente et dépasse le module (1700 m³.s⁻¹), un gradient vertical et horizontal apparaît (Figure 24C&D&E), et les plus fortes intensités sont observées lors du pic de crue avec des valeurs entre 110 et 120 dB (Figure 6C&D). Le signal semble traduire une suspension graduée avec un gradient de concentration qui augmente avec la profondeur et qui, dans le même temps, décroît de la rive gauche vers la rive droite (Figure 24C&D&E). Lors de la descente de crue (Figure 24E), la structuration horizontale disparaît progressivement et une différence nette de concentration des MES apparaît entre le milieu du chenal et chacune des rives. L'intensité du signal rétrodiffusé est plus forte dans la zone la plus profonde du chenal et sur la rive gauche, ce qui doit correspondre à des concentrations en MES plus fortes. A la fin de la crue (Figure 24F), l'intensité rétrodiffusée diminue pour retomber entre 105 et 115 dB, et la suspension graduée observée durant le pic de crue disparaît. Les profils semblent également indiquer une zone continue à mi-hauteur comprise entre 2 et 5 m de profondeur où les concentrations en MES sont plus élevées.

Il est important de noter que les prélèvements lors de cette crue n'ont pas été faits en plusieurs points de la colonne d'eau et n'ont pas été mesurés pour la granulométrie. Ces intensités traduisent donc des valeurs de MES non corrigées de ce dernier facteur, à la différence des crues suivantes.

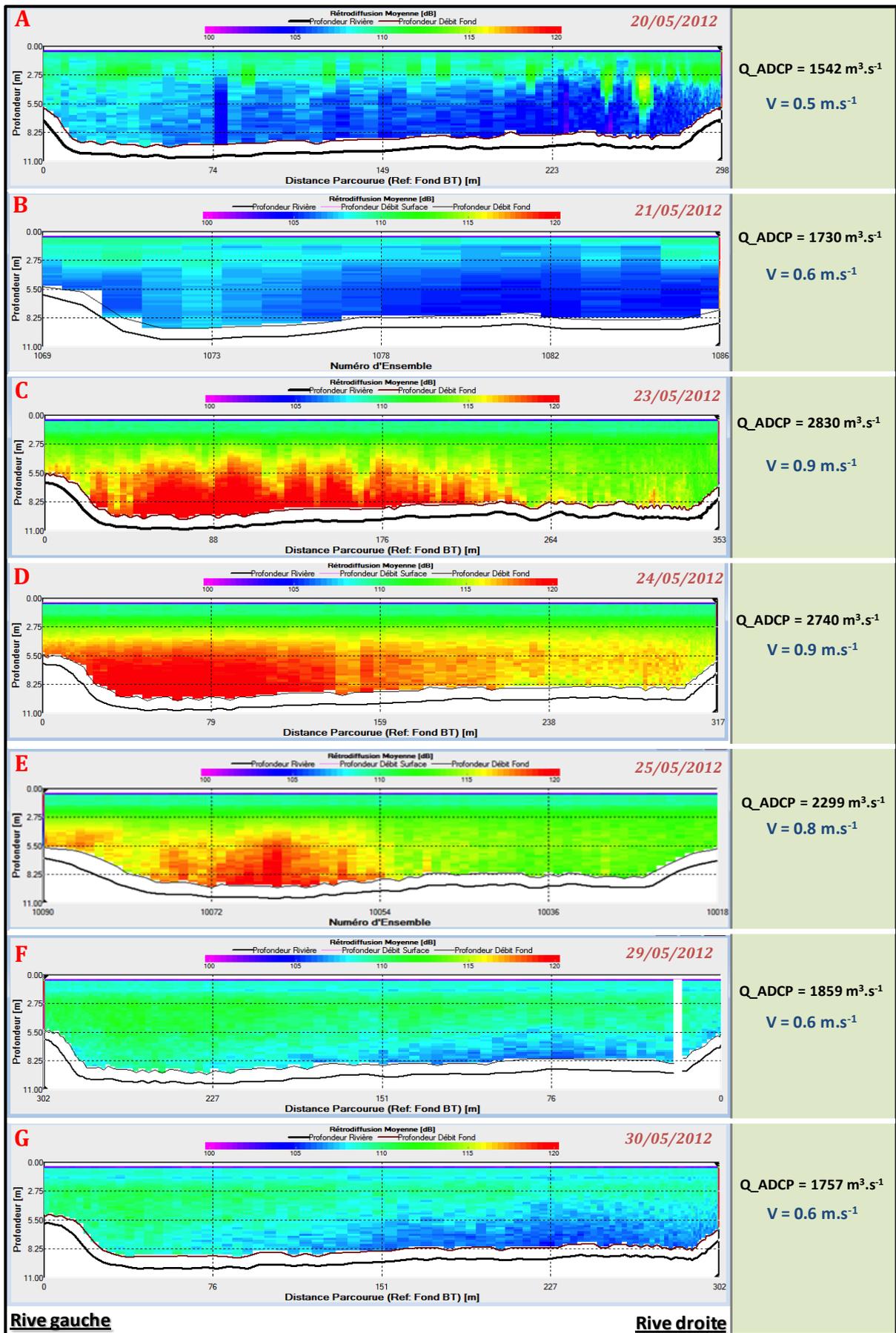


Figure 24. Répartition des matières en suspension (mg/l) selon l'analyse du signal rétrodiffusé (en dB, non corrigé de la taille des particules)

k.2) Crues de Novembre 2012

Deux crues de fréquence annuelle se sont produites du 5 au 18 Novembre 2012 puis du 27/11 au 6/12/2012 (Figure 20). Les figures 25 et 26 présentent l'évolution des vitesses et la figure 27 compare les vitesses de courant (à gauche) avec l'intensité acoustique rétrodiffusée par les MES dans la colonne d'eau (à droite). La crue de mai 2012 a été ajoutée sur cette dernière figure pour comparaison.

Alors que la crue de Mai 2012 montrait des vitesses de courant homogènes (vitesse moyenne $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; débit de $2850 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), celles de Novembre montrent une structuration verticale et horizontale plus nette avec des vitesses plus faibles au fond et sur les bords (vitesses moyennes de $1,2$ et $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour débits respectifs de 4000 et $4500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Ces résultats mettent en évidence le rôle du débit dans la structuration et l'évolution des champs de vitesses de courant, mais le débit correspondant à ce changement de structure est encore à spécifier. La durée de la montée a peut être elle aussi une influence.

Un point majeur est que l'intensité rétrodiffusée montre des distributions verticales et horizontales différentes entre ces 3 crues (Figure 27). La crue de Mai est caractérisée par des intensités rétrodiffusées plus élevées que celles de Novembre, alors que ces dernières ont des débits et surtout des teneurs en MES beaucoup plus importantes selon les valeurs mesurées à la station SORA en Arles (Figure 28, MES de novembre 20 fois plus élevées). Ceci est en désaccord avec la relation attendue entre ces deux variables. Par ailleurs, c'est aussi durant cette crue de Mai qu'un gradient d'intensité qui augmente avec la profondeur est clairement observé (figure 27), comme associé à un effet de suspension gradué. Sur les crues de Novembre 2012 par contre, ce gradient est quasiment inverse, décroissant avec la profondeur. Le maximum de concentration semble d'ailleurs se situer en sub-surface, entre 2 et 3 m de profondeur.

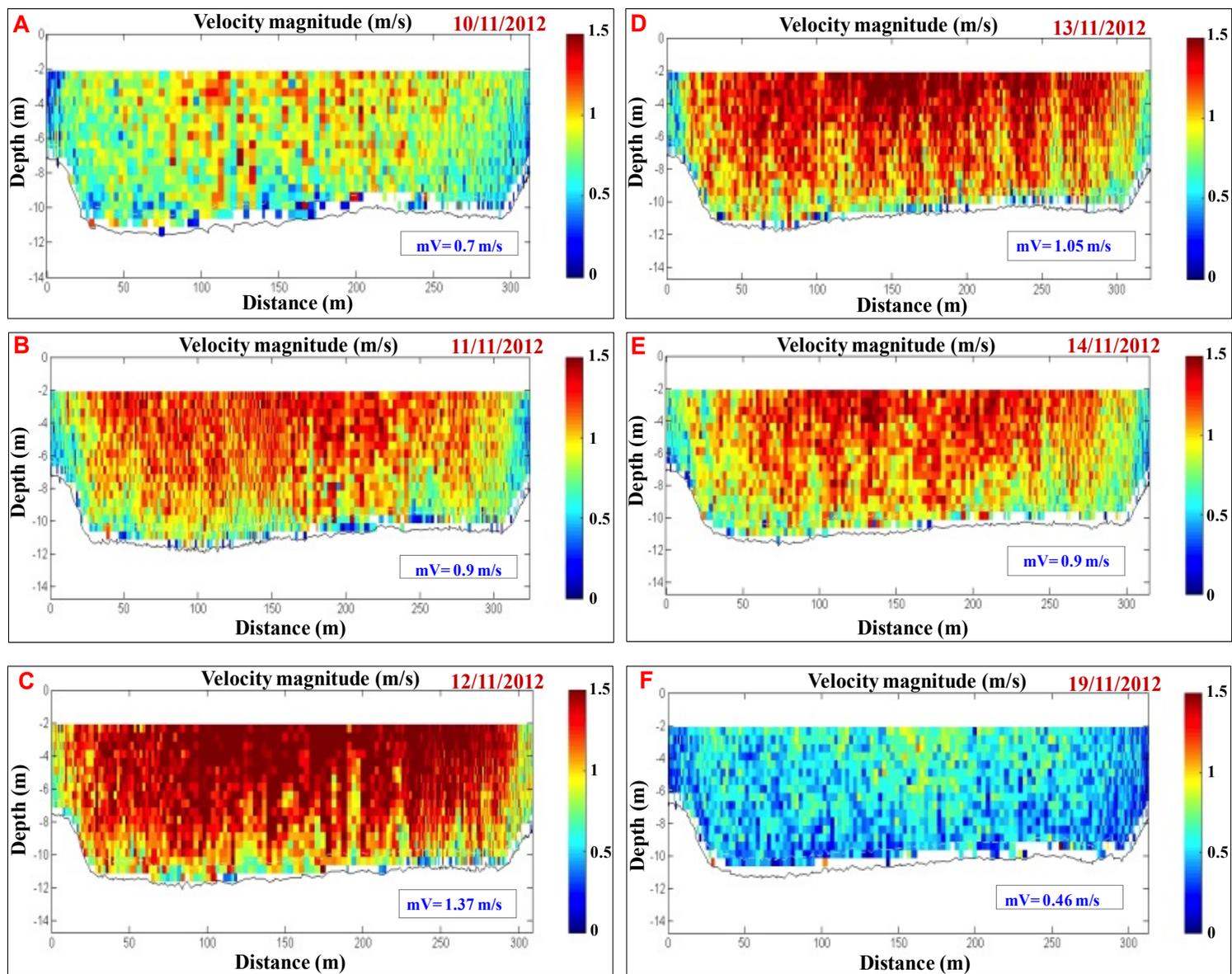


Figure 25 : évolution des vitesses de courant dans le chenal lors de la crue du 12 novembre 2012. mV=vitesse moyenne

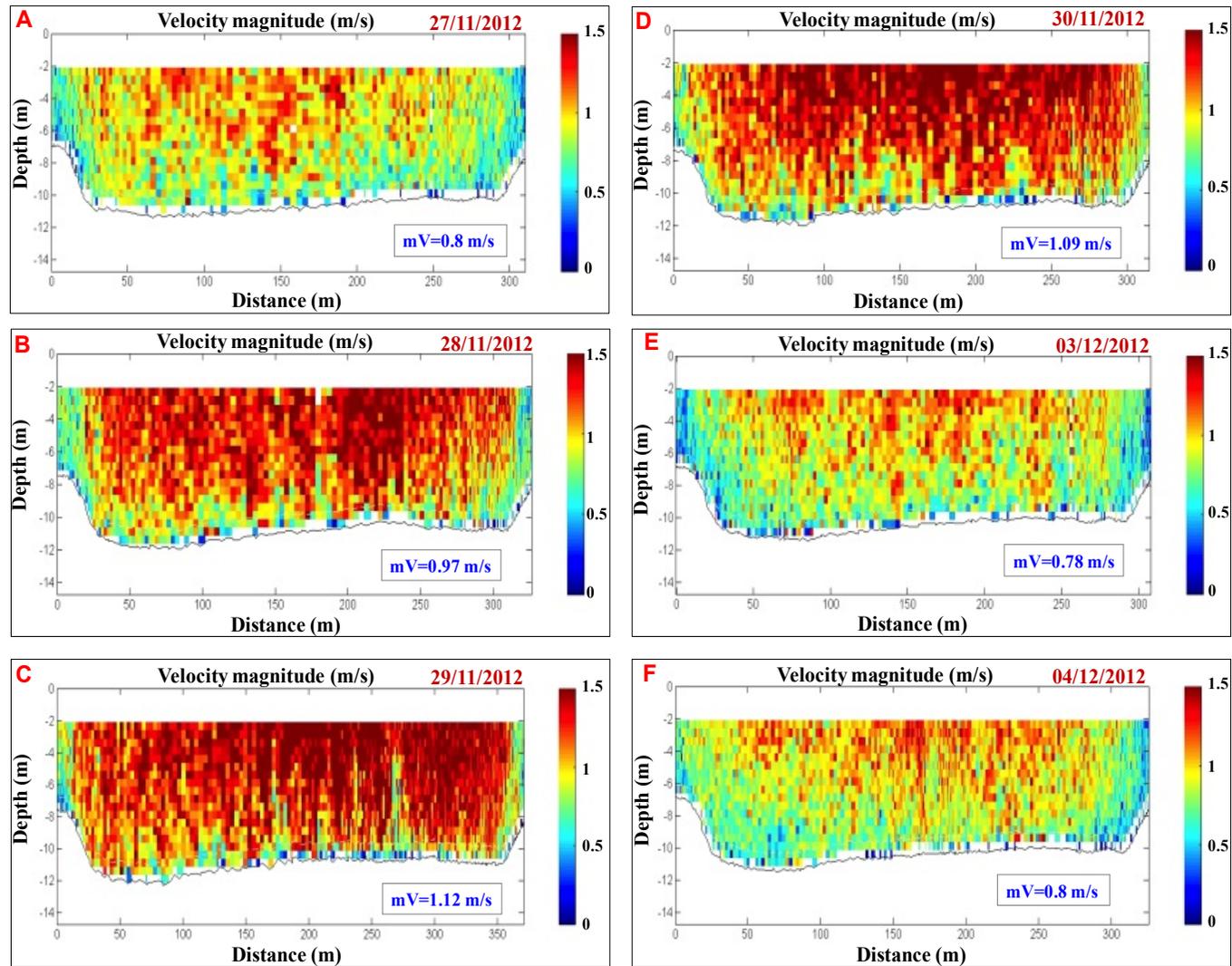


Figure 26 : évolution des vitesses de courant dans le chenal lors de la crue du 29 Novembre 2012. mV=vitesse moyenne

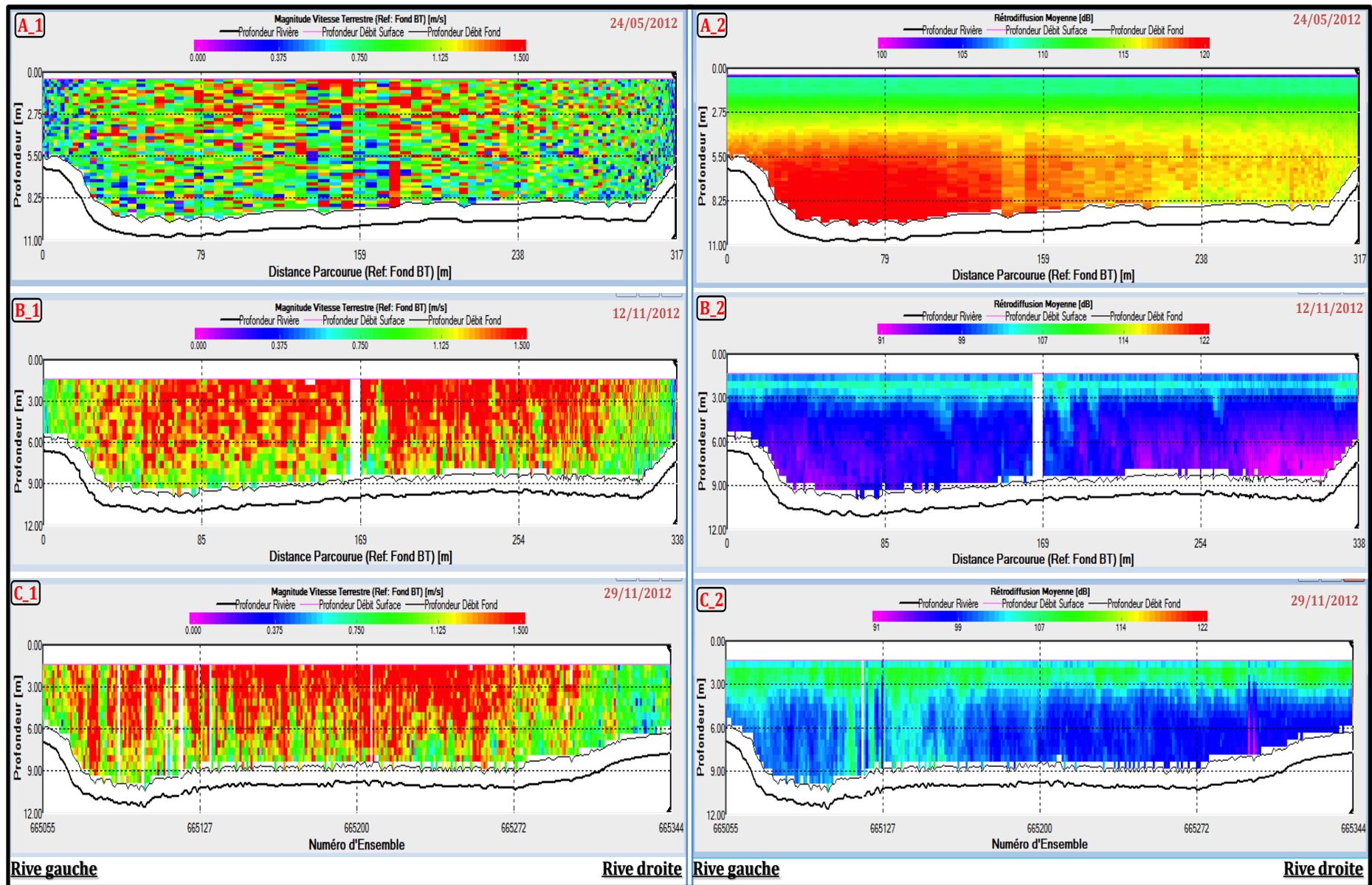


Figure 27 Vitesses de courant (m/s) et intensité acoustique rétrodiffusée (dB) lors de trois crues d'amplitudes différentes : A_1 & A_2 = vitesses de courant et rétrodiffusion au pic de la crue du 24/05/2012 (2850 m³.s⁻¹) ; B_1 & B_2 = vitesses de courant et rétrodiffusion au pic de la crue du 12/11/2012 (4000 m³.s⁻¹) ; C_1 & C_2 = vitesses de courant et rétrodiffusion au pic de la crue du 29/11/2012 (4500 m³.s⁻¹).

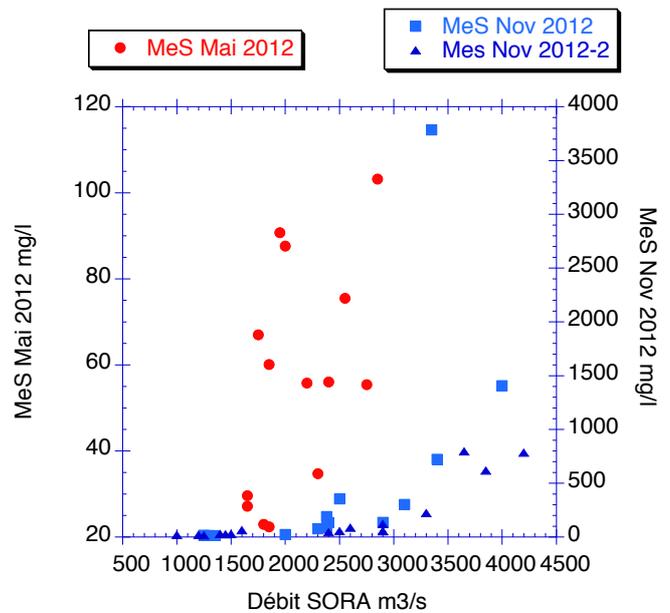


Figure 28 : Teneurs en MES (mg/l) enregistrées durant la crue de Mai et les deux crues de station SORA (données P. Raimbault). Attention aux deux échelles verticales très différentes

L'hypothèse pour expliquer la divergence sur ces 3 crues entre les valeurs d'intensité et les concentrations en Arles ainsi que les variations de gradient observées est en effet de granulométrie. Des travaux récents indiquent en effet que l'intensité de rétrodiffusion de MES peut être sensible à la taille des particules (J. Lecoq, comm. perso) : les particules fines ont une tendance à atténuer le signal (faible rétrodiffusion et donc concentrations apparentes plus faibles) que les particules grossières pourraient augmenter la rétrodiffusion, donnant des concentrations de MES apparemment plus fortes. Dans notre cas, l'analyse granulométrique de novembre montre une prédominance de la fraction limoneuse à plus de 80 %, ce qui peut jouer sur ce signal. Nous ne disposons pas de la granulométrie au mois de mai pour comparer les données mesurées à SORA par l'OSR au cours de ces mêmes crues (les données ne sont cependant pas forcément au pic de crue). Le diamètre moyen au pic de la crue de mai est effectivement supérieur à ceux de novembre, et le volume des silts grossiers est plus important (figure 29). Il faut noter par ailleurs que le prélèvement à SORA est fait au pic de la crue de mai montre un gradient vertical fort et donc sans doute des tailles de particules plus élevées vers le fond.

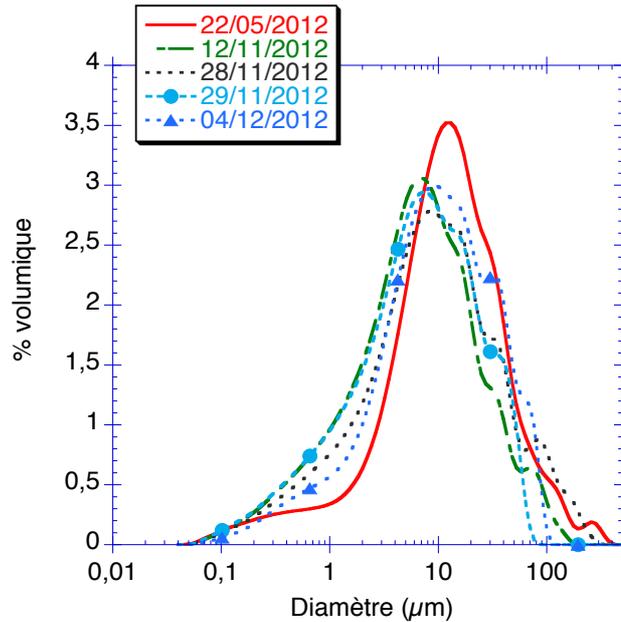
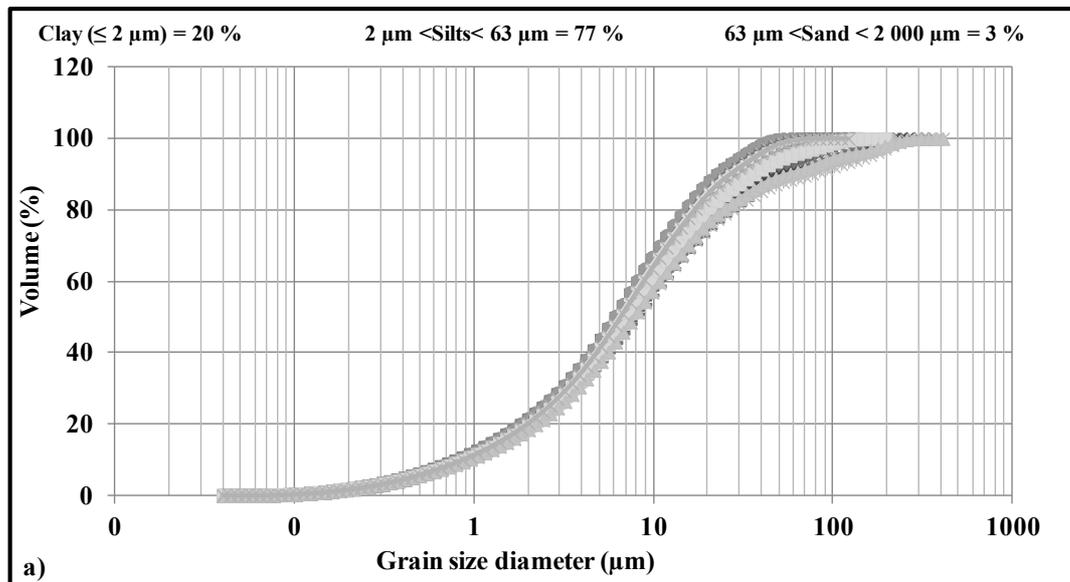


Figure 29 : spectres granulométriques des MES prélevées à la station SORA Arles lors des crues de Mai et Novembre 2012. Analyse par granulomètre Laser Beckman Coulter, CEREGE, données OSR. Les dates de prélèvement sont indiquées par la légende (année-mois-jour).

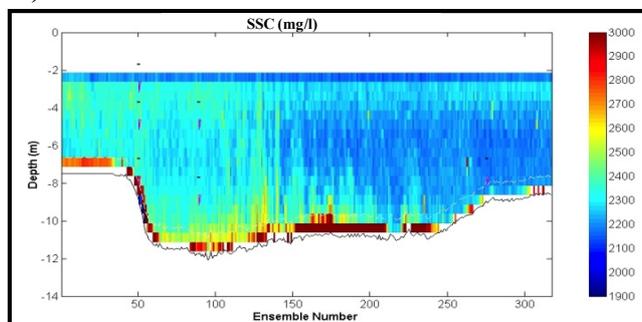
Cette différence de granulométrie entre Novembre et Mai pourrait aussi expliquer la variation verticale observée. Si des particules plus grossières ont effectivement été transportées en Mai, la suspension graduée pourrait être plus marquée et donc mieux expliquer le signal observé.

Le problème est de comprendre pourquoi les débits peu élevés en Mai arriveraient à transporter des particules plus grossières qu'en Novembre. Une explication possible résulte dans un effet de dilution : les crues de Novembre transportant beaucoup de matériel fin (issu d'apport Durancien notamment), celui-ci diluerait le signal du matériel grossier qui deviendrait en quelque sorte « invisible » pour l'Adcp.

Même si les techniques de corrections de l'effet granulométrique restent à étudier et préciser, les mesures granulométriques réalisées en Novembre et le module PDT du logiciel Aqua Vision permettent d'ores et déjà de corriger les données de rétrodiffusion en concentration en mg/L de MES pour ces crues. Une idée de l'influence de cette correction est donnée par la figure 30 sur un des transects de Novembre. Les échantillons de ces crues montraient une granulométrie très proche avec 80% de silts en moyenne (en volume), et une fraction d'argile autour de 15%, montant à 20% lors des pics. Le sable ne constituait que 10% maximum de la population granulométrique. Le transect en bas à gauche correspond aux estimations de MES à partir de l'Adcp après calibration uniquement sur les valeurs de concentrations (mg/l), celui de droite donne le résultat après la deuxième étape de calibration prenant en compte une granulométrie. Les concentrations estimées apparaissent plus fortes et le gradient vertical plus marqué.



b) Conversion of absolute backscatter to SSC



c) Signal correction with grain size

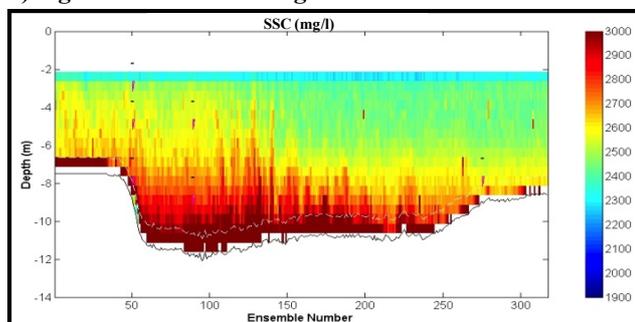


Figure 30 : Répartition granulométrique de tous les échantillons de MES récoltés durant les crues de Novembre 2012. En bas à gauche : résultat brut de la conversion du signal rétrodiffusé en MES (mg/l). En bas à droite : résultats de la transformation en MES après correction par la granulométrie. Les échelles de couleur sont en mg/l.

Les figures 31 et 32 présentent les valeurs de MES calculées à partir du signal Adcp et de l'application des corrections granulométriques pour chacune des journées de crue. Pour information, un seul transect représentatif est choisi pour chaque journée. Il a été fixé pour correspondre à la même plage horaire que celle des prélèvements (ou bien entre 11h et 14h les journées sans prélèvement) et il correspond à celui ayant la meilleure qualité des données (pertes minimisées, cf partie 1).

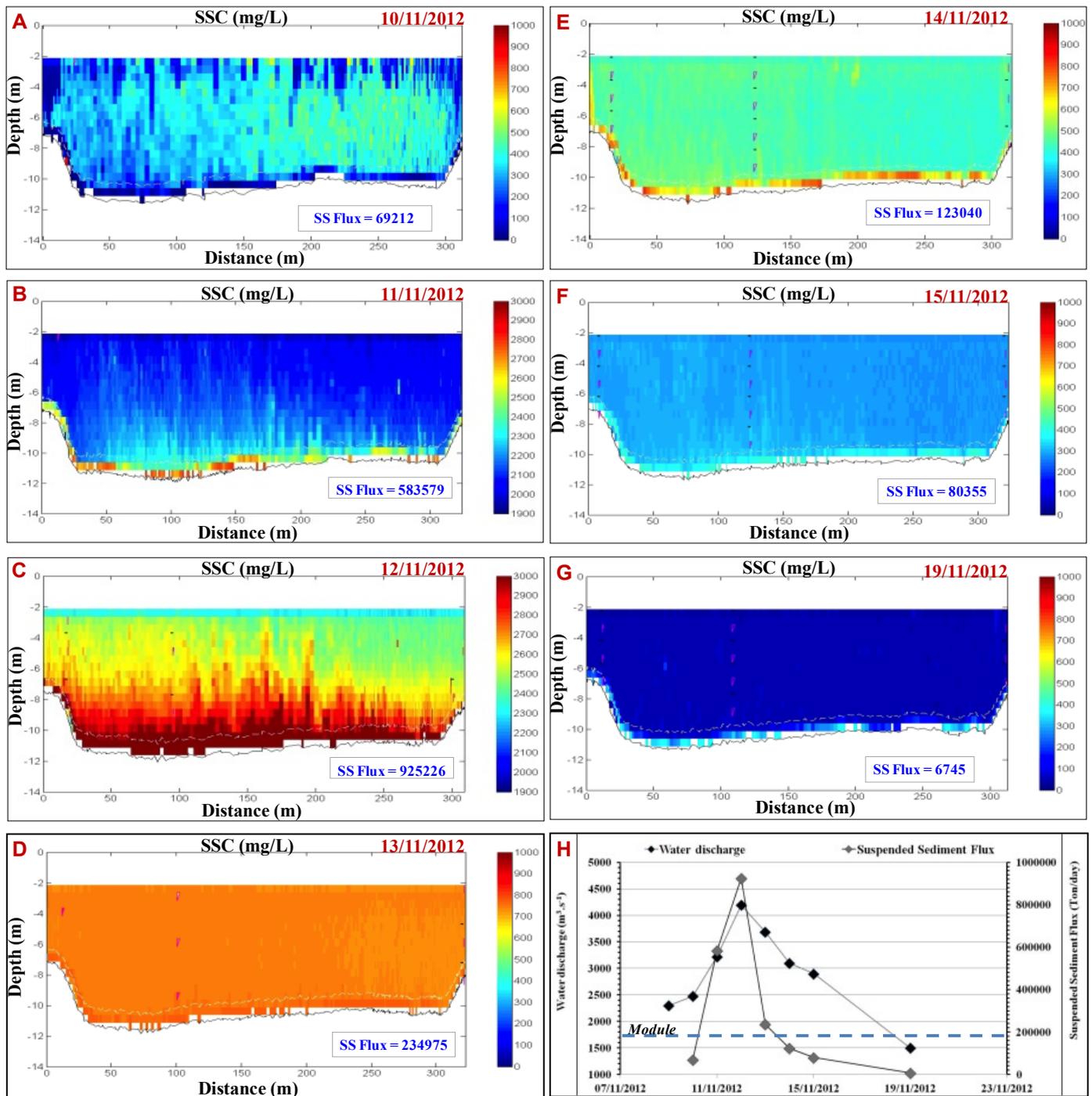


Figure 31 : Teneurs de MES (mg/l) estimées à partir du signal rétrodiffusé par l'Adcp pour la crue du 10 au 19 novembre 2012. Le flux total instantané « SS flux » est indiqué dans les rectangles en kg/s.

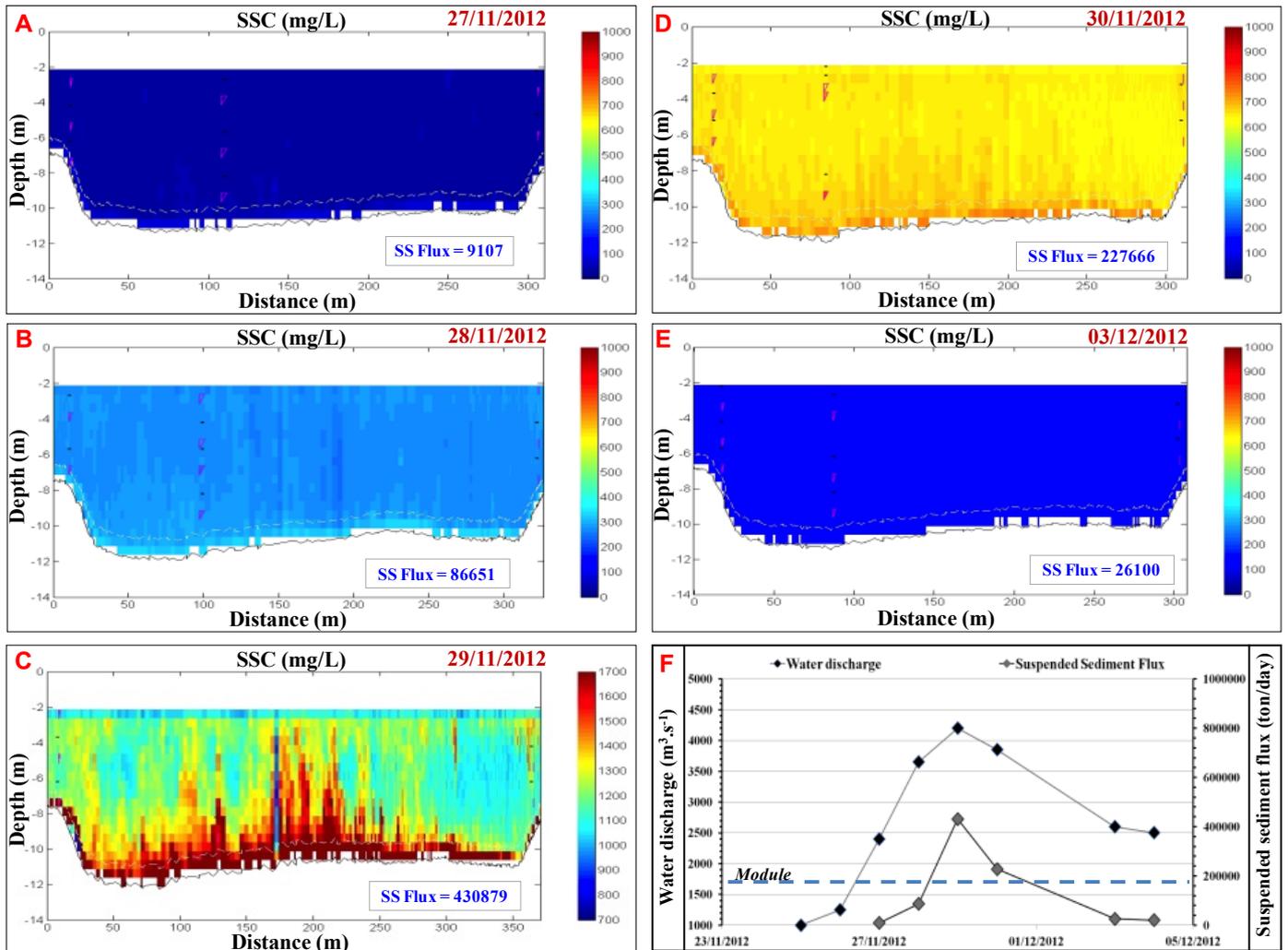


Figure 32 : Teneurs de MES (mg/l) estimées à partir du signal rétrodiffusé par l'Adcp pour la crue du 27/11 au 3/12/2012. Le flux total instantané est indiqué dans les rectangles en kg/s

Pour chacune de ces crues, le maximum de transport solide se produit de manière habituelle avec le débit liquide. On observe sur la première crue un transport en suspension gradué caractéristique qui démarre le jour précédent le pic, mais ce type de transport ne dépasse pas la journée. On retrouve cette même suspension graduée lors du pic de la crue du 29/11.

Le flux solide lors des pics est deux fois plus important sur la première crue qu'à la deuxième, ce qui peut s'expliquer par un premier « lessivage » du matériel pouvant être facilement resuspendu dans le lit du fleuve.

k.3) Comparaison des calculs de flux Arles-Barcarin

La station de prélèvement SORA en Arles permet, depuis 2005, d'estimer les flux solides du Rhône à partir d'un prélèvement réalisé à 50 cm sous la surface et extrapolé sur l'ensemble de la colonne d'eau. Ce prélèvement est journalier en temps normal et passe à une fréquence de 4h lors des crues. Une des questions associées à cette station est celle de la représentativité du prélèvement de surface lors des crues, la supposition étant que le transport près du fond doit être plus important et mal pris en compte par cette station. Nous avons réalisé une comparaison des flux journaliers estimés à partir de l'Adcp et de la station SORA sur les crues de Novembre 2012 (figure 33). Les données de MES à SORA ont été fournies par P. Raimbault (MIO). Il faut rappeler que le flux par Adcp est extrapolé sur la journée à partir d'un seul profil.

Des différences importantes apparaissent sur les deux journées du 11 et 12 novembre, mais la valeur de 1 Million de tonnes/jour estimée le 11/11 à SORA est proche de celle évaluée le 12/11 à Barcarin. Les concentrations en MES les plus fortes ont été atteintes sur ces deux jours avec respectivement 3700 et 1400 mg/l à SORA, alors qu'elles ne sont que 900 mg/l au pic de la deuxième crue. La valeur moyenne mesurée à Barcarin le 12/11 est elle de 2100 mg/l. La différence de calcul sur ces deux journées s'explique par deux choses : 1) la grande variabilité des débits liquides et solides qui doivent être mal représentés par les valeurs moyennes ou instantanées utilisées ici ; et 2) le décalage temporel. La figure 34 montre avec les débits enregistrés à Beaucaire (en vert) que la montée de crue a été extrêmement rapide et concentrée sur la journée du 11. La courbe bleu reproduit l'évolution de ces débits à Barcarin en les propageant dans le temps (le temps de transfert est estimé par la distance et la vitesse de l'eau calculée à partir des débits). Avec des débits entre 3500 et 5000 m³s⁻¹, le temps de transit entre Beaucaire et le bac est de 10 à 14h, et de 7 à 10h entre Arles et le bac. Ce décalage explique que le transport massif qui s'est produit le 11 sur Beaucaire et Arles est enregistré le 12 seulement sur le Bac. Ainsi, le flux total transporté du 10 au 14 inclus est de 1,81 Millions de tonnes selon l'Adcp et de 1,87 Millions selon les données de SORA, deux estimations très proches. Pour information, le flux total estimé pour l'année 2012 a été de 5,6 Mt/an (données OSR). Il s'agit d'une année de transfert importante, la médiane décennale (2001-2011) étant maintenant estimée à 3,1 Mt/an (donnée OSR).

L'Adcp devrait cependant permettre de calculer un flux beaucoup plus précis sur cette période en prenant en compte la forte variabilité des journées du 11 et 12 novembre plutôt qu'une seule valeur journalière tirée d'un seul transect. Ce travail reste à effectuer pour évaluer la précision que peut donner cet équipement. Une étude comparative du signal acoustique rétro-diffusé lors de

crues chargées en particules fines avec des événements mobilisant des sables (fig 27 et 29) devrait permettre d'affiner les flux associés aux différentes réponses du signal en rétro-diffusion.

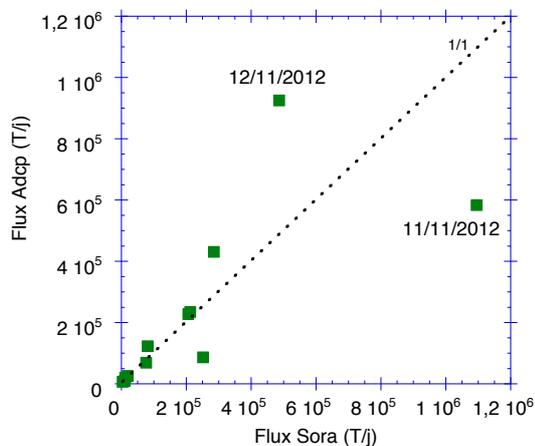


Figure 33 : comparaison des flux journaliers en T/j estimés à partir de l'Adcp ou des prélèvements de la station SORA en Arles.

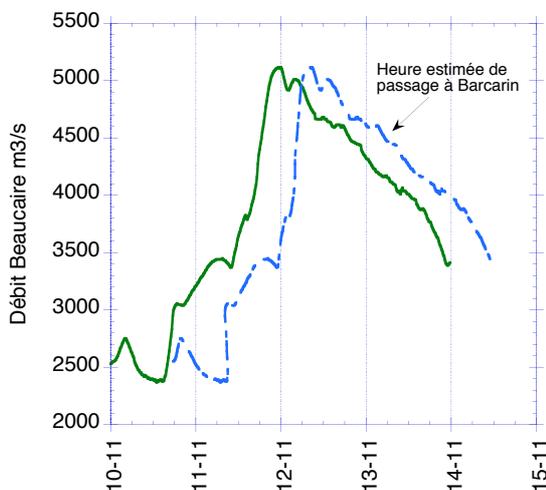


Figure 34 : Évolution des débits liquides à Beaucaire (en vert) du 10 au 14 novembre. Données du site vigicrue.fr. En bleu : estimation des débits de passage de crue à Barcarin sur la base d'un décalage temporel associé aux vitesses de courants.

5. DYNAMIQUE DU COIN SALÉ

Le coin salé est une structure hydrodynamique typique de l'embouchure du Rhône. Il correspond à la remontée d'eau de mer au fond vers l'amont, sous l'effet combiné du niveau marin, d'un faible débit du fleuve et de vents de terre en surface capables de pousser plus ou moins rapidement les eaux douces vers la mer. Il y a quelques années, une importante remontée de cette eau salée a posé des problèmes pour les prélèvements d'eau destinés à l'agriculture, que ce soit pour la riziculture ou les jardins potagers des habitants de Salin-de-Giraud.

Ce phénomène a fait l'objet de quelques études déjà anciennes par la CNR mais n'a jamais été vraiment analysé. Lors de la mise en route de l'Adcp, le constat a été fait que cet équipement permettait de visualiser ce phénomène par la structuration des vitesses et des directions des courants. En effet, cette remontée d'eau salée en profondeur s'accompagne de vitesses faibles au fond, avec des directions totalement inversées de l'aval vers l'amont. Des exemples de profils de direction de courant obtenus à l'été 2012 mettent bien cette structuration verticale en évidence (figure 35). La figure reporte la direction selon 360° , les valeurs de 0 à 180° étant tournées vers le Nord. Pour les profils du 26 juillet au 13 septembre, les courants au fond (pixels les plus colorés) sont en plus inversés, c'est à dire remontant vers le Nord. Un exemple de la structuration des vitesses est donné en figure 18.

Plus le débit est bas, plus le coin salé est présent, ce qui est tout à fait normal. Mais le Mistral aide aussi au maintien de la structure, comme on l'observe en septembre alors que les débits sont 2 à 3 fois ceux de Juillet (vent très fort de 11 m/s). Il semble qu'au delà de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le coin salé n'atteigne pas la zone, même avec de vents supérieur à $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mais un véritable traitement statistique incluant aussi les données de 2013 permettra de préciser les conditions de mise en place et maintien du phénomène.

La sonde positionnée depuis Juin 2014 sur un des pontons du bac offrira aussi des informations complémentaires dans le but d'une modélisation en cours du système. Les premières données de la sonde sont données à titre d'exemple sur la figure 36. L'évolution de la salinité du 15 au 30 juin est associée à l'effet de marée, la chute après étant due à des fortes pluies sur l'amont d'Arles. L'étude de ces relations permettra d'affiner un modèle hydrodynamique qui se met actuellement en place au CEREGE à l'aide du logiciel DELFT3D.

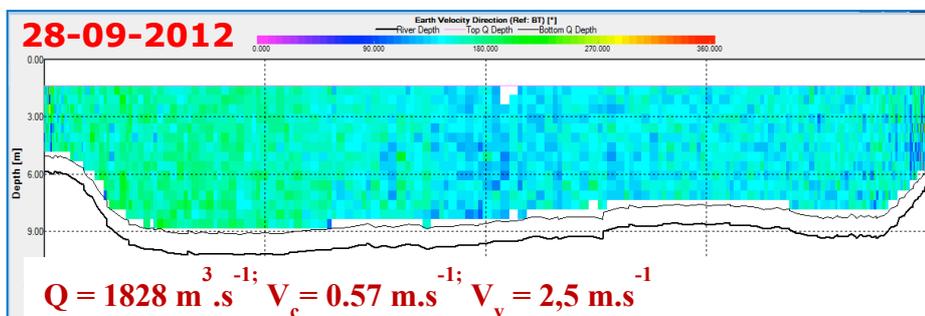
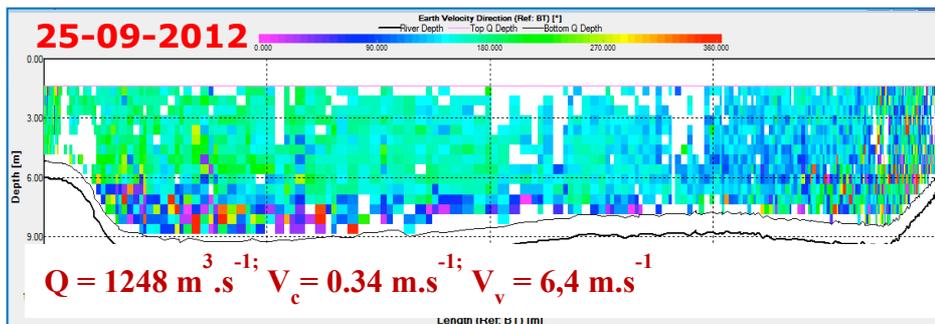
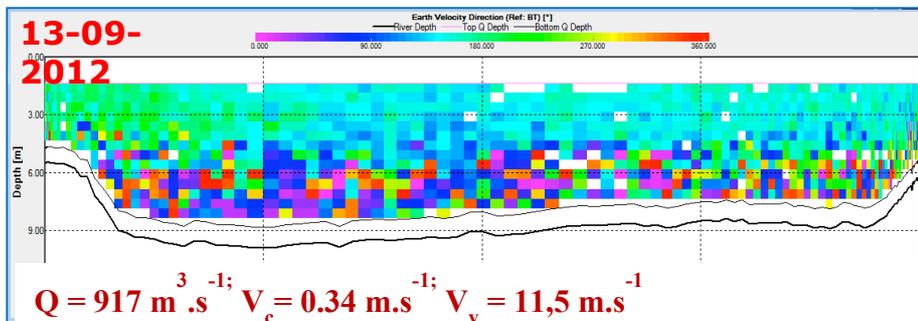
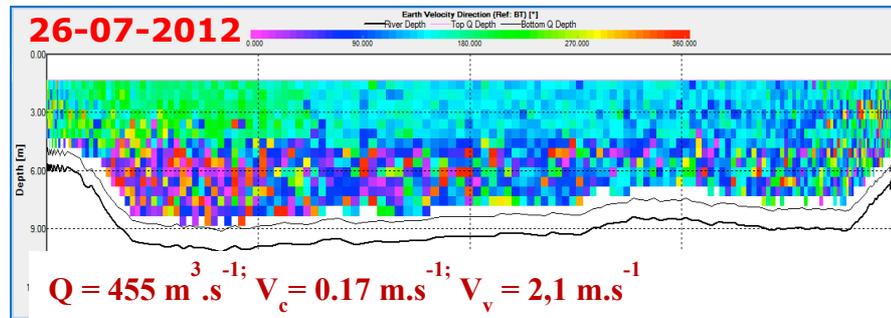
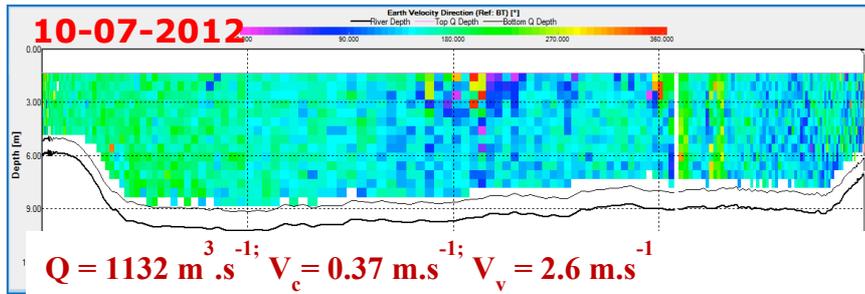


Figure 35: Profils de vitesses d'après l'Adcp sur la période estivale. L'échelle des vitesses varie de 0 (rose) à 38 cm/s (rouge).

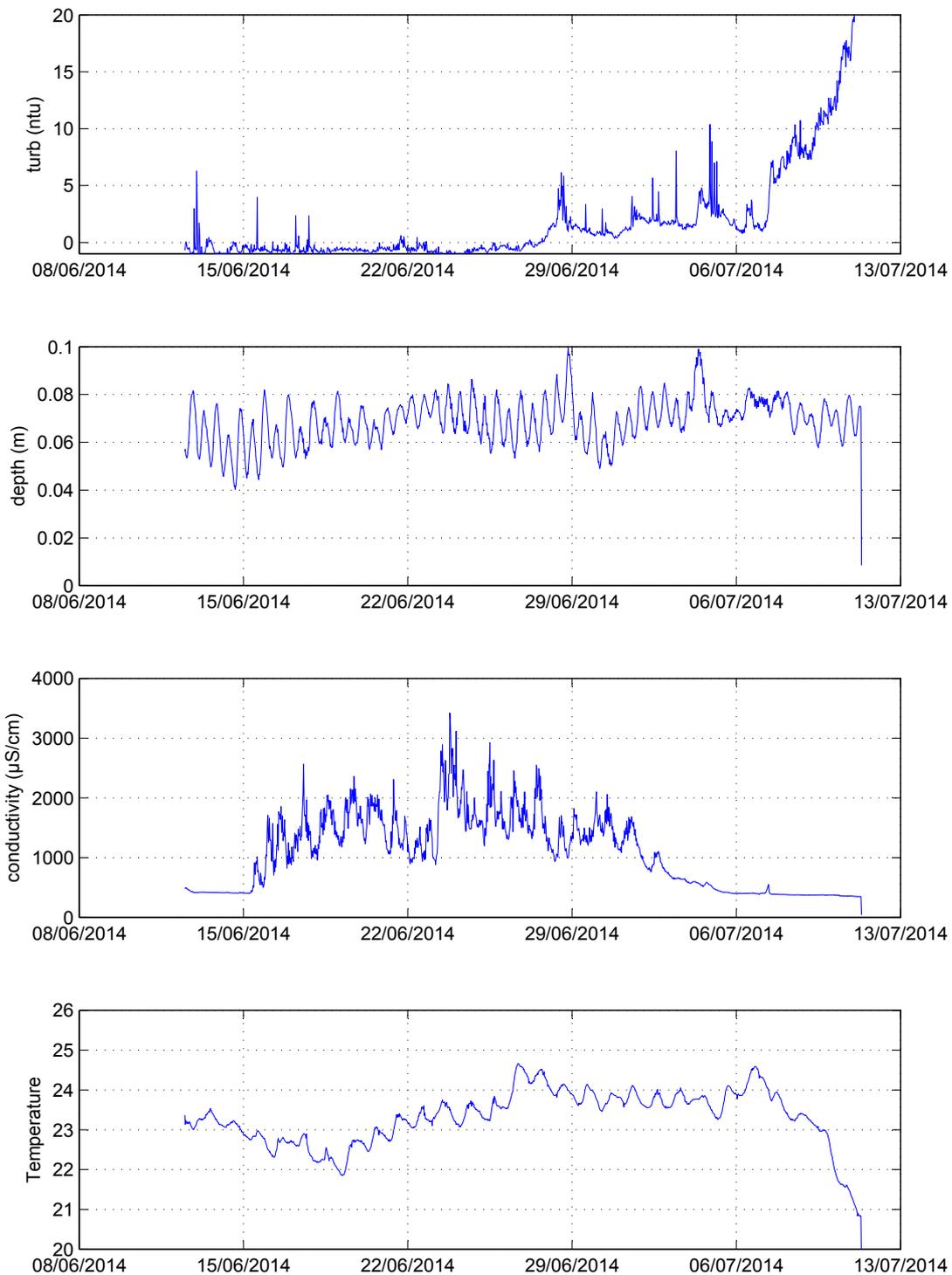


Figure 36 : premières données de la sonde EXO-2 positionnée au Bac de Barcarin, en surface. De haut en bas les graphiques reproduisent : a) la turbidité en NTU, b) le niveau d'eau au dessus de la sonde, c) la conductivité, d) la température.

6. CONCLUSION

Le fonctionnement de l'équipement scientifique monté sur le Bac de Barcarin est maintenant maîtrisé, hormis les problèmes liés à l'usure du matériel et de l'informatique. L'Adcp permet d'estimer correctement des débits liquides mais surtout des débits solides, qui peuvent être maintenant calculés rétrospectivement pour chaque traversée du fleuve, sous réserve que l'enregistrement comporte suffisamment de mesures. En cas de besoin, la demande sur ces données peut être adressée au CEREGE.

L'appareillage fonctionne maintenant en routine. Il demande toutefois un suivi difficile à assurer en termes de renouvellement d'appareil car le budget n'existe pas. De même, la disponibilité d'un personnel dédié sur poste permanent n'est pas assurée par le laboratoire, et ce temps est procuré au coup par coup.

Les comparaisons entre les flux solides estimés par Adcp et ceux de la station SORA sont très bonnes, mais il faut prendre en compte le temps de transit pour le décalage pendant les crues entre ces deux points. Des prélèvements de MES sont toujours à privilégier pour bien caler le signal, mais ils peuvent être fait de manière limitée. Cet équipement apparaît donc comme un complément très intéressant à la station SORA pour le calcul des flux sur au moins deux points : 1) il permet d'évaluer des flux à chaque traversée et donc d'avoir une meilleure précision que l'échelle journalière moyenne ; 2) il est opérationnel même lors des très forts débits (tant que le bac effectue des traversées), tandis que la station rencontre parfois des problèmes de colmatage de la pompe. Un traitement sera bientôt fait sur les données de la crue importante de Mai 2013 pour faire une étude des variations intra-journalières.

Cet appareil permet également de visualiser la distribution spatiale des vitesses de courant. Il met très bien en évidence le coin salé qui se produit pour de bas débits et montre l'existence d'un transport près du fond lors des crues qui, pour l'instant, n'est pas en rapport direct avec le seul débit liquide. Ces aspects hydrodynamiques et hydrosédimentaires n'ont malheureusement pas pu être pleinement traités lors de contrat, pour lequel l'essentiel du travail a permis d'assurer le suivi et la mise en routine des traitements. Ils vont être approfondis dans les mois qui viennent dans le cadre d'une thèse (modélisation hydrosédimentaire de l'embouchure) et d'un CDD demandé pour la prochaine programmation triennale de l'OSR.