*Cette opération est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional.*

# MAITRISE D'OEUVRE POUR LE PROGRAMME DE RÉÉQUILIBRAGE DU LIT DE LA LOIRE ENTRE LES PONTS-DE-CÉ ET NANTES

## LOT 1 AMÉNAGEMENT DE BELLEVUE

## LIVRABLE 22 : MESURES DE TRANSPORT SOLIDE

## MODIFICATIONS ET MISES À JOUR

| Indice d'évolution | Date de version | Modification / commentaires | Faite par |
|---|---|---|---|
| 0a | 20/02/2017 | Protocole de mesure réalisé lors de la campagne 1 (17-19/01/2017) – document provisoire | Fretaud / Alliau / Flohr |
| 0b | 15/05/2017 | Mesures réalisées lors de la campagne 2 (4-6/04/2017) – document provisoire | Fretaud / Alliau / Camenen / Flohr |
| 1a | 20/06/2017 | Version complète | Fretaud / Alliau / Camenen / Flohr |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

# Informations qualité

| | |
|---|---|
| **Opération** | Marché de maîtrise d'œuvre pour la mise en œuvre du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes |
| **Mission** | Maitrise d'œuvre |
| **Titre du document** | Livrable 22 : Mesures de transport solide |
| **Date** | Juin 2017 |
| **N° SCORE** | WAMC013FLG |

## Contrôle qualité

| Version | Date | Rédigé par | Visé par : |
|---|---|---|---|
| 0a | 20/02/2017 | FRETAUD / ALLIAU | FLOHR |
| 0b | 15/05/2017 | FRETAUD / ALLIAU / CAMENEN | FLOHR |
| 1a | 20/06/2017 | FRETAUD / ALLIAU / CAMENEN | FLOHR |

## Destinataires

| Envoyé à : | | |
|---|---|---|
| **Nom** | **Organisme** | **Commentaires / Envoyé le :** |
| Mme PERARD M PICHON | VNF | 20/06/2017, déposé dans l'onglet livrable sous serveur ftp |
| M PEETERS M CORTIER | HYDRATEC | |
| | | |
| | | |

## Sommaire


1. OBJET 6

1.1. CONTEXTE 6
1.2. MOTIVATION DU BESOIN 6
1.3. PRINCIPES DE LA COURBE DE TARAGE SÉDIMENTAIRE 8
1.4. PÉRIODES D'INTERVENTION 8
1.5. INTERVENANTS 9

2. STATION DE MESURE : LOIRE AU PK73 11

3. PROTOCOLE DE MESURES SEDIMENTAIRES 13

3.1. EMBARCATIONS 13
3.2. MESURE DU CHARRIAGE 14
3.1. MESURE DE LA SUSPENSION SABLEUSE 15
3.2. PRÉLÈVEMENT DE MATÉRIAUX EN PLACE 18
3.3. COMPTE RENDU D'INTERVENTION (JANVIER 2017) 19
3.4. COMPTE RENDU D'INTERVENTION (AVRIL 2017) 23

4. ANALYSES DE LABORATOIRE 27

4.1. FLUX DE CHARRIAGE DE SABLE 27
4.2. DISTRIBUTION SPATIALE DES DIAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DES SÉDIMENTS EN PLACE 29
4.1. DISTRIBUTION SPATIALE DES DIAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DES SÉDIMENTS CHARRIÉS 30
4.2. CARACTÉRISTIQUES DES SÉDIMENTS EN SUSPENSION 31
4.3. ANALYSE COMPARATIVE DES DIAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES PENDANT LES MESURES IN SITU 32

5. COURBE DE TARAGE SÉDIMENTAIRE 33

5.1. SITE DE MESURE 33
5.2. MODÈLE DE COURBE DE TARAGE HAUTEUR-DÉNIVELÉE-DÉBIT 33
5.2.1. COURBE DE TARAGE BASÉE SUR LA LOI DE MANNING-STRICKLER 33
5.2.2. APPLICATION À MAUVES SUR LOIRE 34
5.3. MODÈLE DE COURBE DE TARAGE SÉDIMENTAIRE 35
5.3.1. ESTIMATION DES CONTRAINTES DE CISAILLEMENT 35
5.3.2. COURBE DE TARAGE SÉDIMENTAIRE 36
5.4. APPLICATION POUR L'ESTIMATION DU CHARRIAGE À MAUVES SUR LOIRE 37
5.5. SENSIBILITÉ DES RÉSULTATS 38
5.6. APPLICATION POUR L'ESTIMATION DE LA SUSPENSION GRADUÉE À MAUVES SUR LOIRE 40
5.7. APPLICATION AU CALCUL D'UN FLUX MOYEN ANNUEL 40

6. RÉFÉRENCES 43

7. ANNEXES 44

## Figures

Figure 1 : Exemple de confrontation entre lois théoriques et mesures expérimentales (source : CNR/IRSTEA)..... 7
Figure 2 : Données hydrologiques de synthèse (1863 - 2016) à la station de Montjean-sur-Loire..... 8
Figure 3 : Prévision de marée à la station du Pellerin en Loire en janvier et avril 2017 (source : Météoconsult Marine) ..... 9
Figure 4 : Vue en plan du transect sédimentaire retenu au PK67.500 .....11
Figure 5 : Profil en travers et position des verticales de mesure au PK72.7.....12
Figure 6 : Préleveur de type Helley-Smith (charriage) .....14
Figure 7 : Capture d'écran de vidéo de contrôle sur préleveur Helley-Smith (CHE 7m de tirant d'eau) .....15
Figure 8 : Bouteille Niskin (gauche).....16
Figure 9 : Protocole de prélèvement avec une bouteille Niskin (a : correct ; b : incorrect). ...16
Figure 10 : bouteille de Delft sur son support .....17
Figure 11 : phase de nettoyage de la bouteille de Delft .....17
Figure 12 : Localisation des types de mesures réalisées au PK72.7 et l'environnement proche. .....19
Figure 13 : Localisation des mesures ADCP et exemple de restitution au PK 72.5.....21
Figure 14 : Récapitulatif des conditions hydrauliques au PK72.5 du 17 au 19 janvier 2017 (mesures par jaugeages ADCP). .....23
Figure 15 : Récapitulatif des conditions hydrauliques au PK72.5 du 17 au 19 janvier 2017 (mesures par jaugeages ADCP). .....25
Figure 16 : débits solides unitaires par échantillon et moyen par site – a) janvier 2017, b) avril 2017 .....27
Figure 17 : débits solides par transect – a) janvier 2017, b) avril 2017 .....28
Figure 18 : Relation débit solide / débit liquide – a) janvier 2017, b) avril 2017.....29
Figure 19 : Évolution des diamètres caractéristiques des sédiments en place au fond du lit par site de prélèvement.....29
Figure 20 : Concentration des matières en suspension sur la campagne de Janvier 2017 ...31
Figure 21: Site de mesure à Mauves-sur-Loire. .....33
Figure 22: Section transversale où ont été réalisées les mesures de transport solide à Mauves-sur-Loire (a, les 3 verticales se situent dans le chenal principal, soit pour $300 < y < 600$m) et section mouillée en fonction du niveau d'eau (b, les données ADCP correspondent à la campagne de janvier 2017). .....34
Figure 23: Débits modélisés à l'aide de l'équation (2) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b). .....35

Figure 24: Débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005) à partir d'un calcul des contraintes distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b). .....38
Figure 25: Débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005) à partir d'un calcul des contraintes moyennes (Eq. 9) ou distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b). .....38
Figure 26: Sensibilité au diamètre sur les débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005) à partir d'un calcul des contraintes moyennes (Eq. 9) ou distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b). .....39
Figure 27: Débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005), de Meyer-Peter & Müller (1948) dans sa version original et sans distribution des contraintes et dans sa version modifiée par Artelia (de Linares, 2007) à partir d'un calcul des contraintes moyennes (Eq. 9) ou distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b). .....39
Figure 28: Granulométrie des sédiments échantillonées avec la bouteille de Delft (a) et débits solide par suspension graduée modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2008) à partir d'un calcul des contraintes distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure d'avril 2017 (b).....40
Figure 29 : Débit liquide(a) et solide (b) issus des courbes de tarage hydro-sédimentaire calées sur le Loire à Mauves-sur-Loire sur la période de 2009 à 2013. .....41
Figure 30 : Courbes de tarage sédimentaire et sensibilité à la formulation .....41

## Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des mesures de charriage par Helley-Smith (janvier) .....20
Tableau 2 : Récapitulatif des mesures de vitesses par ADCP. .....22
Tableau 3 : Récapitulatif des mesures de charriage par Helley-Smith (avril) .....25
Tableau 4 : Récapitulatif des mesures par bouteille de Delft (avril) .....26
Tableau 5 : Diamètre moyen médian des sédiments en place.....30
Tableau 6 : Diamètre moyen médian des sédiments charriés (janvier 2017) .....30
Tableau 7 : Diamètre moyen médian des sédiments charriés (avril 2017) .....31
Tableau 8 : Diamètres moyens des sables observés.....32
Tableau 9 : Débits solide moyens annuels estimés pour différentes formules de capacité à partir des résultats de modélisation hydraulique 1D sur la période de 2009 à 2013.....42

# 1. OBJET

## 1.1. Contexte

Le groupement EGIS – CNR a en charge la mission de Maitrise d'œuvre pour le lot 1 de l'opération « Rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes, sous Maitrise d'Ouvrage VNF (marché n° 16 21 I 072.0 du 23/08/2016).

L'aménagement de Bellevue en amont de Nantes est l'opération n°1 du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre Ponts-de-Cé et Nantes. Il doit permettre de créer une perte de charge suffisante pour favoriser le dépôt des sédiments en amont, dans la gamme des débits mobilisant les matériaux du fond du lit. La configuration de cette perte de charge devra satisfaire les usages et enjeux existants, en particulier les enjeux de continuité migratoire et de navigation. L'emprise exacte de cet aménagement devra être précisée en phase de conception. Il devra néanmoins s'inscrire entre le débouché du bras de Thouaré-sur-Loire en amont (PK 64) et le bras de l'île Héron en aval (PK61).

Une première phase d'Études Préliminaires (élément de mission EM1) a été lancée le 31/08/2016 au cours de laquelle le groupement a conseillé VNF de réaliser des investigations complémentaires (*LIV4 - Programme des investigations à mener pour acquérir les données complémentaires nécessaires*). Lors de la réunion de projet mensuelle du 3 novembre 2016, VNF a demandé au groupement d'élaborer une Proposition Technique et Financière, pour la réalisation de mesures de transport solide en Loire. L'avenant n°1 au marché, relatif à ces mesures, a été engagé le 3 janvier 2017, et repose sur 2 campagnes de mesures, dans un délai compatible avec le planning détaillé des tâches du lot 1, soit avant fin avril 2017.

Ce document, LIV22, est le rapport de mesures de transport solide incluant les 2 campagnes de mesure, ainsi que la courbe de tarage sédimentaire au PK73.

## 1.2. Motivation du besoin

La seule approche théorique du transport solide ne suffit pas pour comprendre le fonctionnement morphologique actuel de la Loire en amont de Nantes, le risque majeur étant de proposer un projet d'aménagement qui n'atteint pas les objectifs du programme, c'est-à-dire qui ne résout pas les problèmes constatés (mécanismes physiques de transport à l'œuvre en situation actuelle).

Le phénomène de transport solide est par nature complexe et amène un florilège de questionnements :

- Quelle est la contribution relative du charriage et de la suspension par rapport au flux total ?
    - Quel(s) modèle(s) de transport solide à favoriser pour la conception du projet ?
    - Quelle stratégie privilégier pour provoquer la décantation et le piégeage ?
    - Quel délai pour atteindre l'objectif fixé ?
- Quelle est la variation des apports solides en fonction du débit de la Loire ?
    - Situation actuelle / état de référence ?
    - Dispersion et incertitude induite pour un débit donné ?

  - Implications en termes d'analyses de sensibilité et de conception ?
  - Évolutions saisonnières (et origine le cas échéant) ?
  - Indicateur de l'efficacité des travaux projetés par rapport à la référence actuelle ?
- Comment définir une loi de transport solide adaptée ?
  - Équilibre sédimentaire actuel ?
    - Capacité de transport *versus* fourniture sédimentaire
    - Lois théoriques *versus* courbe de tarage sédimentaire spécifique
  - Représentativité des données anciennes collectées *in-situ*
  - Représentativité des données récentes collectées au droit de sites éloignés ?

Le groupement se propose donc de réaliser des mesures de flux solides à proximité de la zone d'étude de Bellevue sur un créneau temporel compatible avec les délais de l'opération de maitrise d'œuvre (lot1).

L'approche proposée repose sur le principe pragmatique suivant :

- Des mesures *in-situ* fiables sont-elles réalisables en tenant compte de l'effet de la marée ?
- Le cas échéant, ces mesures (au nombre de 2 campagnes) doivent conduire le choix des hypothèses pour la conception du projet, par confrontation aux lois théoriques disponibles.

Le groupement se propose donc d'initier la connaissance du transport solide au niveau de Bellevue par initiation d'une courbe de tarage sédimentaire, avec quelques points de mesure. L'expérience de CNR/IRSTEA est illustrée dans la figure 1 (échelle logarithmique) : 1 seul point de mesure a permis de privilégier la meilleure formule théorique à appliquer.

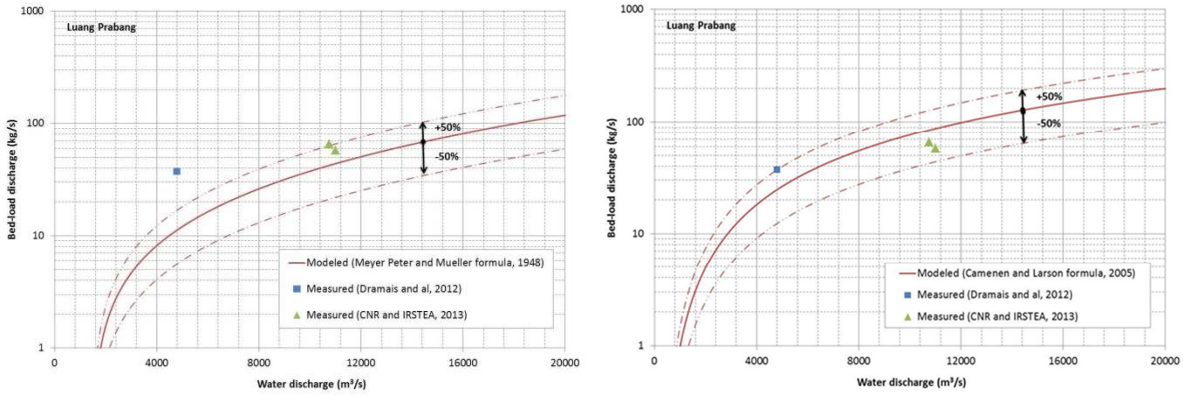



**Figure 1 : Exemple de confrontation entre lois théoriques et mesures expérimentales (source : CNR/IRSTEA)**

Bien évidemment, comme toute courbe de tarage, il est conseillé de poursuivre régulièrement ces mesures jusqu'à la mise en service de l'aménagement, et au-delà pour

évaluer l'efficacité à long terme de l'ouvrage.

Rappelons utilement les conclusions de M. Lefort en 2009 *(Annexe 2)* : ***« L'appréciation des potentialités de dépôt est, pour la section fluvio-maritime, mais aussi peut être pour l'estuaire, un élément essentiel de l'économie du projet de restauration : une campagne de mesures du charriage et de la suspension est absolument indispensable et urgente ».***

## 1.3. Principes de la courbe de tarage sédimentaire

Afin de réaliser des estimations cohérentes du transport solide au travers d'une section sur une période plus ou moins longue, il est nécessaire d'établir une courbe de tarage sédimentaire. À partir de ces éléments, et d'une courbe de débits classés (avec une attention particulière à données aux débits de crue), le transport solide moyen annuel est ainsi évaluable.

La méthodologie repose donc sur la réalisation de mesures *in-situ* qui permettra d'ajuster sur toute une gamme de débit la relation [débit liquide – débit solide]. À court terme, faute de mesures nombreuses, une formule théorique permettra de réaliser cet ajustement (extrapolation par rapport aux mesures existantes).

Les mesures réalisées seront ici probablement peu nombreuses et ne permettront pas une vue complète de la dynamique sédimentaire de la Loire, mais cela permettra de faire une extrapolation plus intelligente qu'une simple régression en prenant en compte la physique du système.

La méthodologie proposée repose sur le guide édité par l'IRSTEA « *Mesures in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau, outils et méthodes* ». Rappelons que ce guide a été rédigé, entre autres, par Benoit CAMENEN (IRSTEA), Christophe PETEUIL (CNR) et Stéphane RODRIGUES (Université de Tours).

## 1.4. Périodes d'intervention

Compte tenu que les éléments de mission spécifiques à la modélisation aborderont la question du calage hydro-sédimentaire à partir de fin avril – début mai 2017, il est nécessaire d'utiliser le créneau temporel disponible autour d'un débit moyen de 1400 $m^3/s$ (cf. débit moyens mensuels sur la période 1863-2016 à la station de Montjean-sur-Loire).

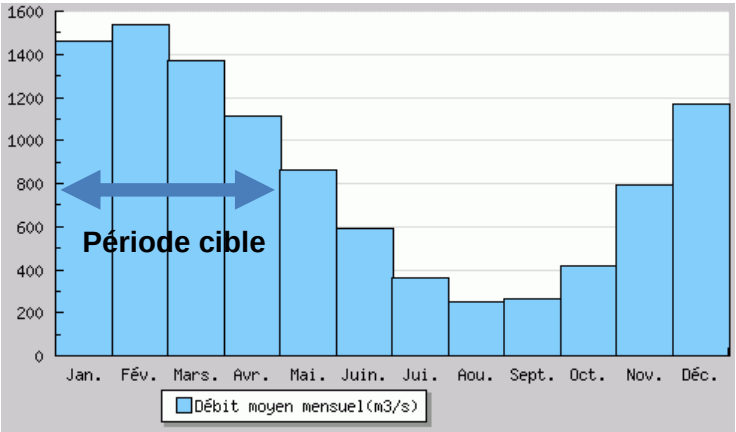



**Figure 2 : Données hydrologiques de synthèse (1863 - 2016) à la station de Montjean-sur-Loire**

Le groupement a proposé de réaliser 2 campagnes :

- 1ère campagne entre le 17 et 19 janvier 2017 : le débit à Montjean-sur-Loire fût régulièrement croissant de **450 $m^3$/s à 510 $m^3$/s** et variait au PK73 entre 714 et -82 $m^3$/s sur les périodes des jaugeages réalisés
- 2ème campagne entre le 4 et 6 avril 2017 : le débit à Montjean-sur-Loire fût décroissant de **800 $m^3$/s à 760 $m^3$/s** et variait au PK73 entre 870 $m^3$/s et 680 $m^3$/s

Les graphiques suivants illustrent les conditions de marée à la station du Pellerin en janvier et avril 2017. A ces horaires, il faut inclure un temps de propagation aval-amont de l'ordre de 2h en pleine mer et 2h30 à basse mer pour un débit de l'ordre de 500 $m^3$/s.

Le choix des campagnes s'est effectué selon deux principes : possibilité de réaliser des mesures à pleine mer et basse mer dans la même journée (en évitant les mesures nocturnes) et à moyen ou faible coefficient de marée. Le débit en Loire est subi, idéalement il serait préférable d'avoir plusieurs mesures sur plusieurs jours à conditions hydrauliques équivalentes.

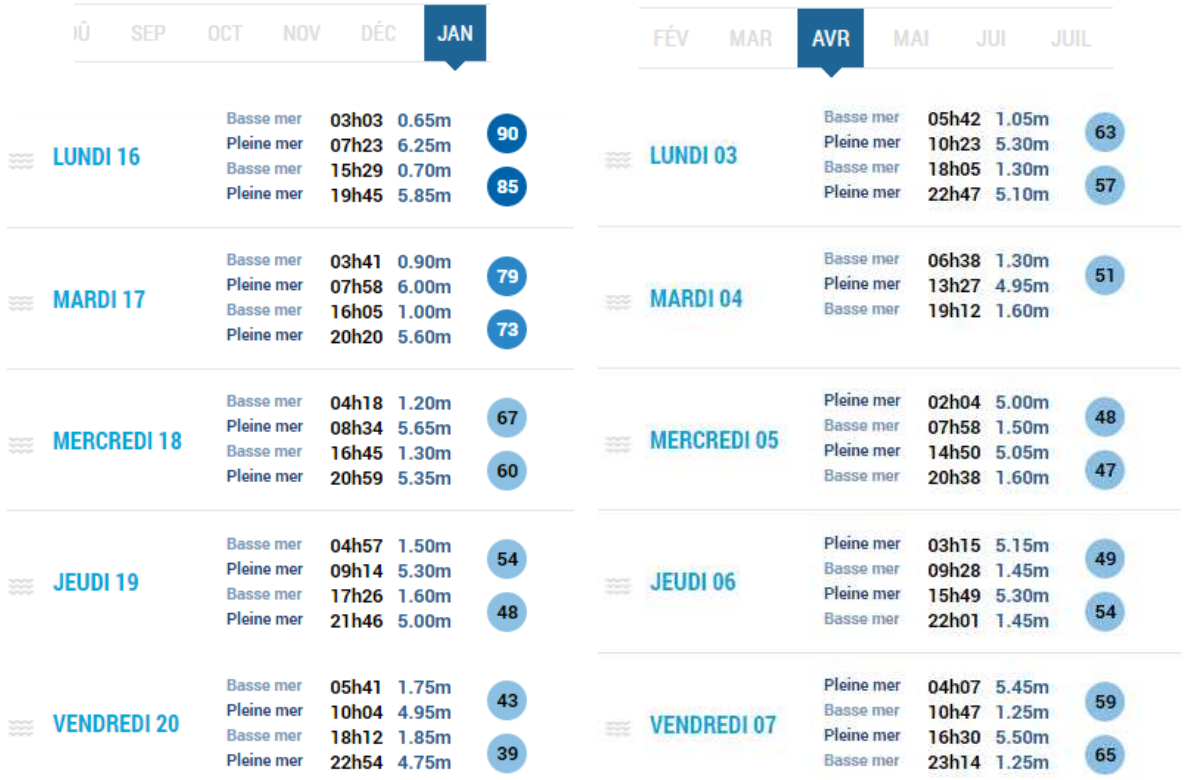



**Figure 3 : Prévision de marée à la station du Pellerin en Loire en janvier et avril 2017 (source : Météoconsult Marine)**

## 1.5. Intervenants

Concernant CNR, les intervenants ont été les suivants :

- Thierry Frétaud, ingénieur mesure de transport solide, responsable des campagnes de mesure,
- Christophe Mora et Lionel Meric, technicien de mesure environnement et transport solide,

- Serge Françon et Jérôme Laurent, techniciens en mesure hydrométrique,
- Damien Alliau, coordinateur entre la présente mission et la maitrise d'œuvre en cours.

Concernant IRSTEA, les intervenants ont été les suivants :

- Benoit Camenen et Guillaume Dramais, experts techniques.

## 2. STATION DE MESURE : LOIRE AU PK73

Le choix de ce site d'étude a été réalisé afin d'alimenter les conditions solides aux limites amont des modèles numériques et physiques réalisés par ailleurs par la CNR dans le cadre de ce programme d'étude.

Le site de mesure se situe donc à Mauves-sur-Loire en amont du secteur d'étude sur un tronçon rectiligne et unique (pas de chenaux secondaires ni îles) : **PK 72.7** soit 44 km en aval de la station de Montjean-sur-Loire (PK117) et 9 km en amont du site de Bellevue (Figure 4).

Il est important de noter que cette station de mesure est influencée par la marée, complexifiant notamment les périodes d'intervention.

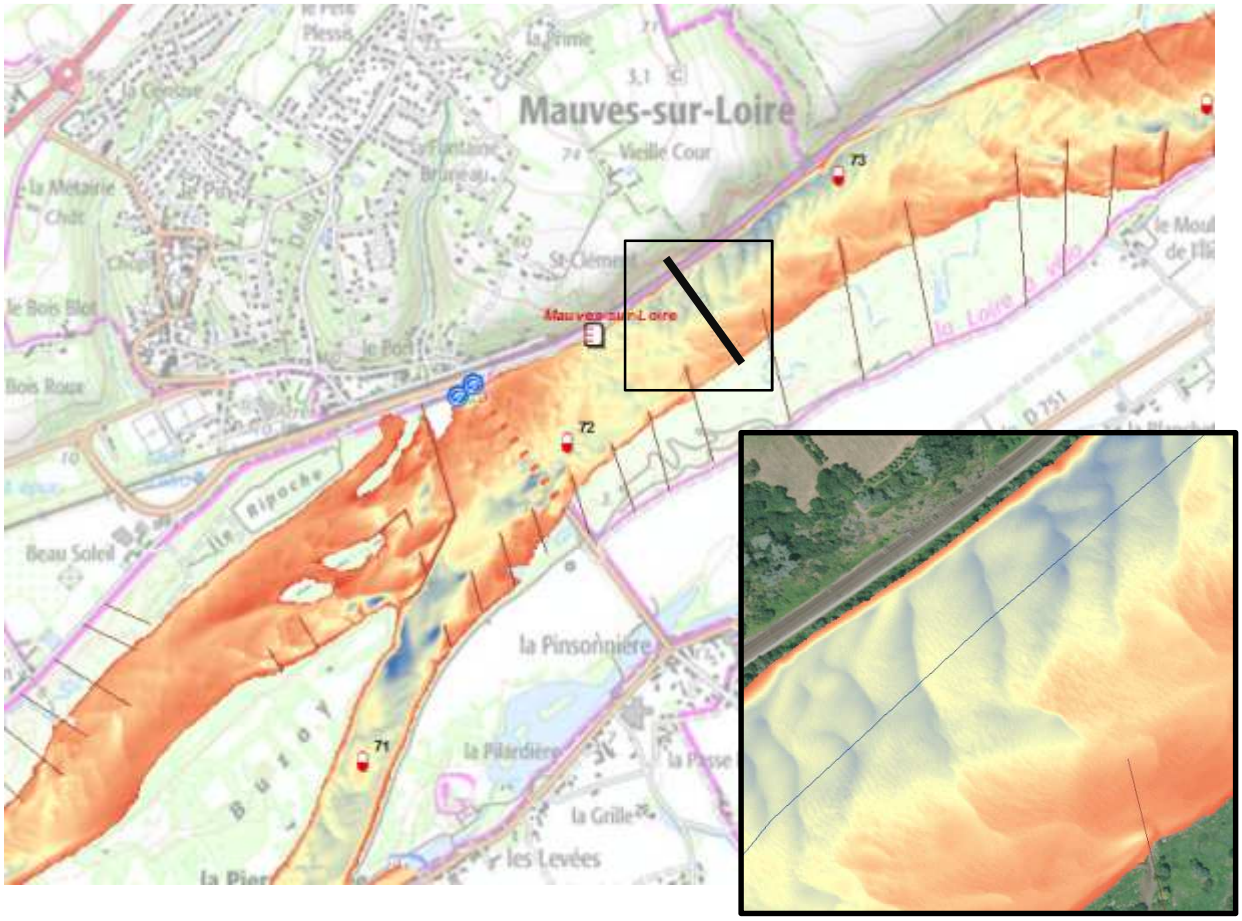



**Figure 4 : Vue en plan du transect sédimentaire retenu au PK67.500**

Le profil en travers défini sur le secteur d'étude est présenté en Figure 5.

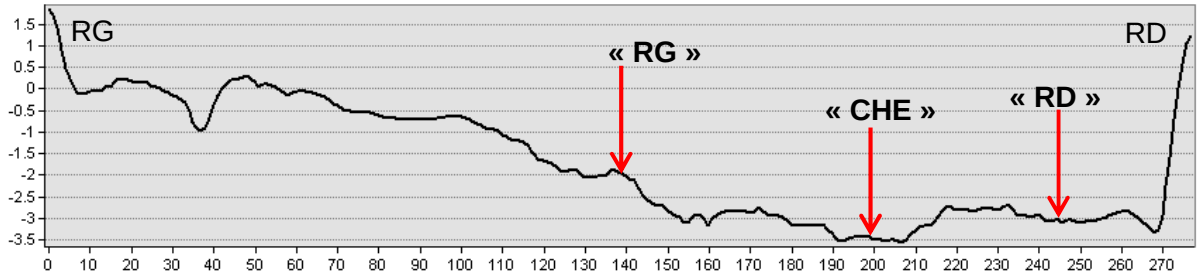



**Figure 5 : Profil en travers et position des verticales de mesure au PK72.7**

L'emplacement a été défini afin de limiter les perturbations que pourraient engendrer la présence des îles en amont et en aval du secteur. Il est toutefois à noter que la présence d'épis peut affecter la courantologie et le transport solide ; il n'existe cependant aucune section permettant d'éviter ces contraintes. **3 verticales de prélèvement** ont été implantées le long de cette section en travers pour quantifier le transport solide (charriage et suspension). Il a été nécessaire de faire une première bathymétrie (sonar, ADCP) afin de valider ces positions de mesure.

# 3. PROTOCOLE DE MESURES SEDIMENTAIRES

Ce chapitre décrit les moyens mis en œuvre lors des deux campagnes de mesure de janvier et avril 2017, moyens et protocole qui se sont avérés pertinents.

## 3.1. Embarcations

Trois embarcations ont été utilisées :

1. Le bateau de CNR Ingénierie avec treuil ; l'embarcation a donc principalement été utilisée pour la mesure à partir du préleveur Helley-Smith avec en parallèle une mesure du profil de vitesse au droit du prélèvement (ADCP).

2. Le Bateau de l'UTI VNF a été principalement utilisé pour la mesure de débit (ADCP) et les prélèvements avec la bouteille Niskin.

Les deux premières embarcations étaient donc munies d'un ADCP et d'un sonar (échosondeur).

3. Le Bateau de l'UTI VNF « la Toue » a été utilisé pour les prélèvements à la bouteille de Delft sur la seconde campagne.

## 3.2. Mesure du charriage

Le principe d'estimation du charriage est de prélever un échantillon de fond pendant un temps donné, appareil placé dans le sens du courant. La mise en œuvre ne peut s'effectuer que sur des vitesses d'écoulements maximales de 2 à 3 m/s. Un **préleveur de type Helley-Smith,** fonctionnant par différence de pression, est adapté à la mesure du charriage en Loire, avec une efficacité attendue de 100 % pour les particules entre 0.5 et 16 mm. Afin d'encadrer l'incertitude sur ce coefficient d'efficacité, intrinsèque à l'appareil, le nombre de 3 échantillons par verticale est préconisé.

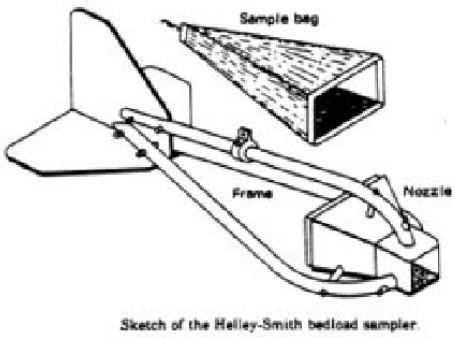



**Figure 6 : Préleveur de type Helley-Smith (charriage)**

Ces mesures ont été réalisées sur le bateau de CNR Ingénierie munie d'une potence en arrière, entre les moteurs. Le bateau a été ancré afin de maintenir la position sur chaque verticale (cf. Figure 12). Le câble de longueur environ 10 à 20 m a permis d'ajuster la profondeur souhaitée.

Les 3 verticales ont été repérées par GPS mais également à l'aide de bouées sur site. Une caméra GoPro a été installée sur le préleveur afin de s'assurer que le préleveur n'était pas trainé. La visualisation pour chaque prélèvement de la vidéo associée a permis de classifier les prélèvements par leur qualité d'exécution.

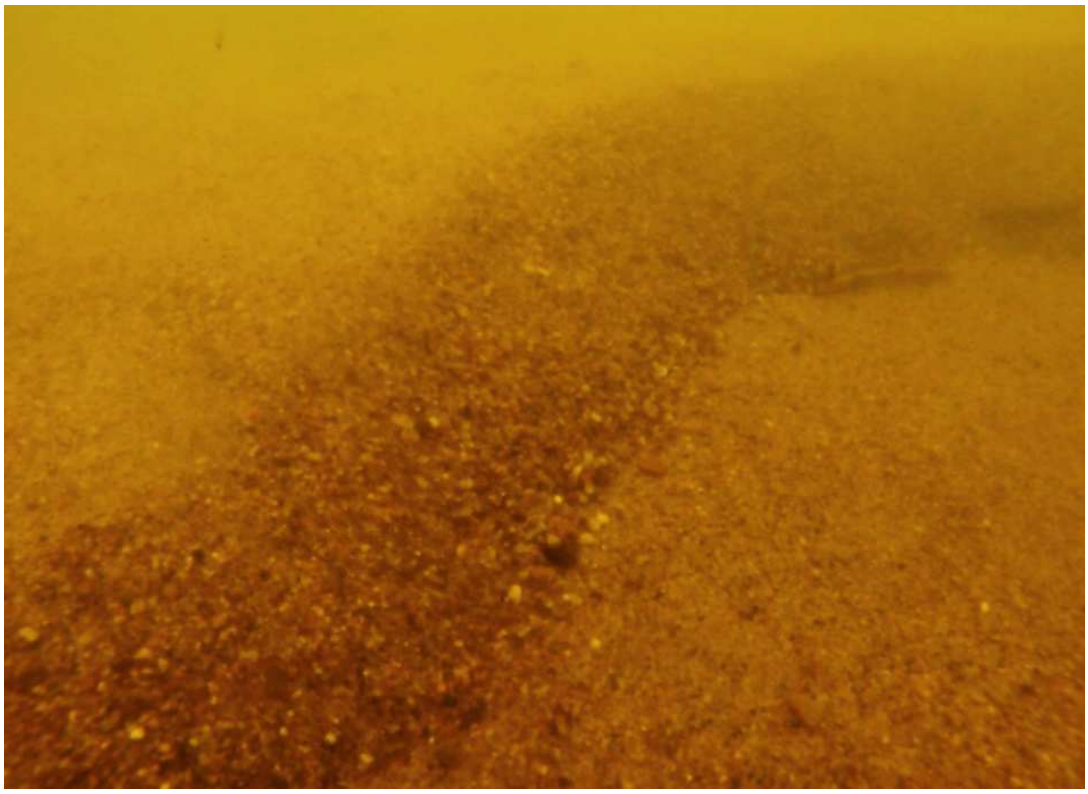


**Figure 7 : Capture d'écran de vidéo de contrôle sur préleveur Helley-Smith (CHE 7m de tirant d'eau)**

Les images de la caméra Gopro permettent d'analyser le charriage en fonction des vitesses observées sur l'ensemble de la section.

On constate très clairement un mode de charriage bien distinct en fonction des vitesses des fonds mesurées :

- Vitesse faible (inférieure à 0.5 m/s) pas de mouvement observé ou des déplacements de grains minimes.
- Vitesse modérée (0.7 à 1.5 m/s) on constate un charriage uniforme, avec un déplacement des grains homogène et régulier.
- Vitesse forte (1.5 m/s), le charriage est perturbé par des vortex locaux, le charriage n'est pas homogène et on constate un déplacement irrégulier des grains.

## 3.1. Mesure de la suspension sableuse

Plusieurs outils ont été utilisés pour estimer la concentration et le flux de sable en suspension en fonction des débits observés:

1. **Mesure de la concentration en Matières En Suspension** (MES) et granulométrie des particules en suspension à différentes profondeurs sur plusieurs verticales d'un profil en travers. Cette mesure qui se fait typiquement avec une **bouteille de Niskin** (Figure 68) a été mise en œuvre lors de la première campagne de janvier compte tenu des débits observés.

**Figure 8 : Bouteille Niskin (gauche)**

La mesure à l'aide de la bouteille de Niskin a été réalisée par la seconde embarcation réalisant par ailleurs les jaugeages. Une première difficulté liée à la bouteille Niskin est de correctement estimer la profondeur de mesure.

La méthode présentée en Figure 9 a été appliquée lors de la campagne et permet de réaliser des mesures à profondeur voulue à partir d'une embarcation sur un cours d'eau navigable.

- Avant de jeter la bouteille à l'eau, il faut mettre le moteur du bateau au point mort et se laisser dériver.
- Ensuite, après avoir mesuré la longueur de corde correspondant à la profondeur de mesure voulue (de la surface de l'eau au centre de la bouteille), la bouteille est mise à l'eau lorsque la vitesse du bateau est équivalente à la vitesse du courant, de préférence à l'amont du bateau.
- Juste avant que la corde devienne tendue et verticale, il faut lancer le messager afin de fermer la bouteille.

Si le bateau a une vitesse relative par rapport à la surface du cours d'eau différente de zéro (ou si l'on tente de faire une mesure d'un pont), un angle plus ou moins important entre la corde et la verticale va apparaître, biaisant fortement le choix de la profondeur (Figure 9a) et rendant très difficile la fermeture de la bouteille à l'aide du messager.

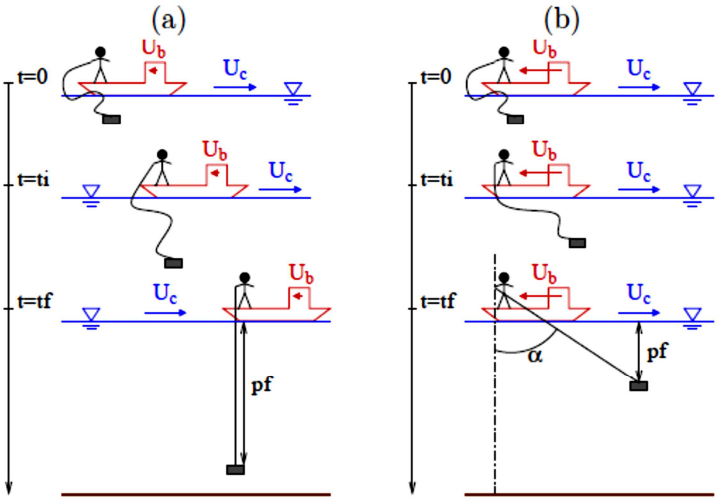



**Figure 9 : Protocole de prélèvement avec une bouteille Niskin (a : correct ; b : incorrect).**

Les mesures avec la Niskin ont été réalisées sur chacune des 3 verticales choisies selon différentes profondeurs d'eau : un échantillon de surface et un échantillon à mi- profondeur

pour vérifier si suspension dominante ou non, puis un à 1 m au-dessus du fond et un à 50 cm au-dessus du fond. Étant donné l'absence visible de suspension, les échantillons se sont donc concentrés sur le fond des verticales.

2. La **bouteille de Delft** qui mesure directement un flux solide (en kg/s) pour les matériaux sableux, à différentes profondeurs (Figure 10) a été mise en œuvre uniquement sur la seconde campagne d'avril. Les plus fortes concentrations observées sur cette période ont permis de réaliser des mesures.

**Figure 10 : bouteille de Delft sur son support**

La bouteille de Delft est un préleveur-décanteur iso-cinétique. La structure de soutien de la Delft permet de poser le système au fond de l'eau avec une grande stabilité. L'immobilisme du système permet alors de réaliser des prélèvements à des hauteurs constantes et très proches du fond (5, 10 et 20 cm).

L'intérieur de la bouteille de Delft est constitué de trois chambres permettant un ralentissement des vitesses et la décantation des sables. Elle ne piège que les sables à partir de 50 µm.

La qualité de la mesure est fonction de temps de prélèvement, un prélèvement de 10 minutes a été choisi afin de limiter les erreurs liées au temps de descente et remontée de l'appareil (la bouteille n'est pas munie d'une fermeture automatisée de l'échantillonnage).

La phase de nettoyage de la bouteille doit être également réalisée avec rigueur compte tenu de la difficulté à accéder aux différents compartiments de la bouteille.

Les mesures avec la Delft ont été réalisées sur chacune des 3 verticales choisies selon différentes profondeurs d'eau (5,10 et 20 cm)

**Figure 11 : phase de nettoyage de la bouteille de Delft**

3. La puissance de **rétro-diffusion du signal acoustique de l'ADCP** est grossièrement proportionnelle à la concentration en sédiments en suspension. Il est toutefois nécessaire de réaliser simultanément des mesures de concentrations et granulométrie afin de caler une relation entre la rétrodiffusion mesurée et la concentration en sable. Ces mesures ont été réalisées sur les deux campagnes mais non exploitées à ce stade.

## 3.2. Prélèvement de matériaux en place

Au-delà des prélèvements dynamiques (flux) par le préleveur Helley-Smith et bouteille de Niskin, d'autres prélèvements de fonds ont été réalisés par une drague, déposée au fond du lit et qui est tractée par le bateau sur quelques mètres.

Ces prélèvements sont analysés en laboratoire pour définir la granulométrie du fond et confirmer les observations de terrain : à l'œil nu il semblerait (à vérifier après analyse) que l'on puisse observer une légère variation de la granulométrie des sables au fond du lit en fonction de la position sur la section.

## 3.3. Compte rendu d'intervention (janvier 2017)

Le programme du 16 au 20 janvier a été réalisé conformément aux prévisions. 5 jeux de mesures été réalisés, malgré des températures observées très basses dans la journée :

- 3 en basse mer (BM)
- 2 en pleine mer (PM)

Lors de la phase de reconnaissance le mardi matin (17/01), deux capteurs de pression encadrant le site avec une distance d'environ 500 m ont été installés afin de permettre une mesure temporelle du niveau d'eau et de la pente locale d'écoulement.

Cette mesure de pente a également été complétée par des mesures de la ligne d'eau par GPS sur un linéaire plus important afin de s'affranchir des problèmes potentiels de précisions de l'appareillage compte tenu de la faible pente observée (pour mémoire la pente de Loire est d'environ 0.2 m/km).

Il a été préalablement défini lors de la reconnaissance (mardi matin) la section de mesure, ainsi que la partie amont et aval en utilisant le sonar pour vérifier la présence ou non de forme de fond et choisir précisément les 3 verticales (marquage GPS sur le sonar de chacune des embarcations et mise en place de bouée). Pour l'embarcation 1 (bateau CNR), le protocole proposé et respecté a été le suivant :

- Faire une mesure du charriage avec le préleveur Helley-Smith sur chacune des verticales avec 2 répétitions (3 échantillons au total) ;
- Faire en parallèle une mesure de la vitesse de l'écoulement en fixe (ADCP).

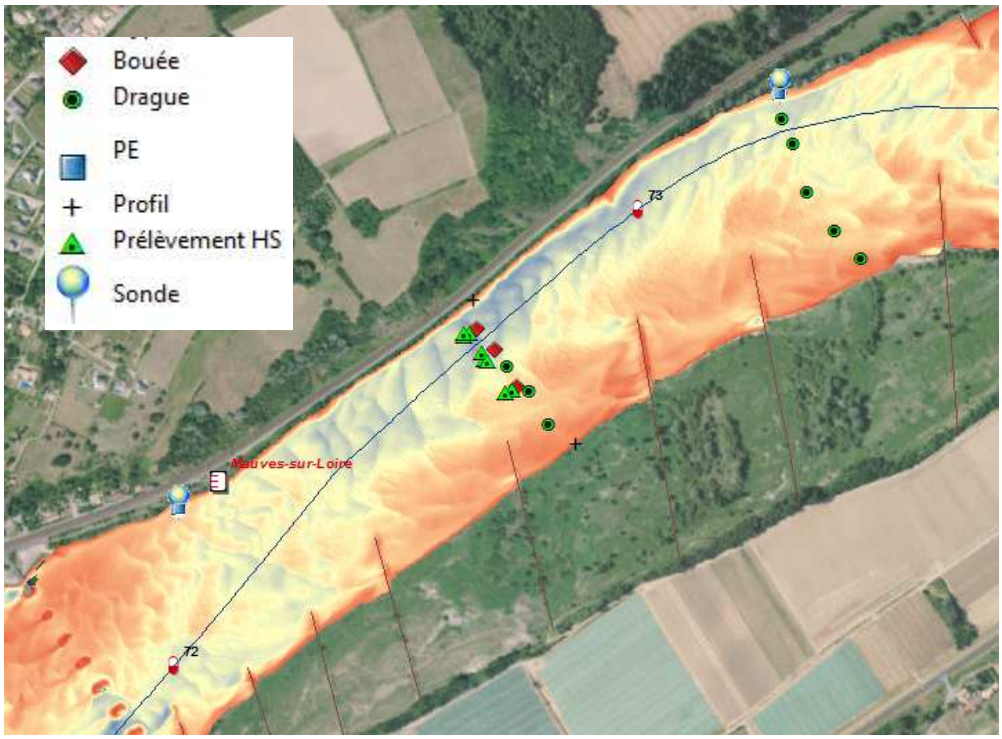



**Figure 12 : Localisation des types de mesures réalisées au PK72.7 et l'environnement proche.**

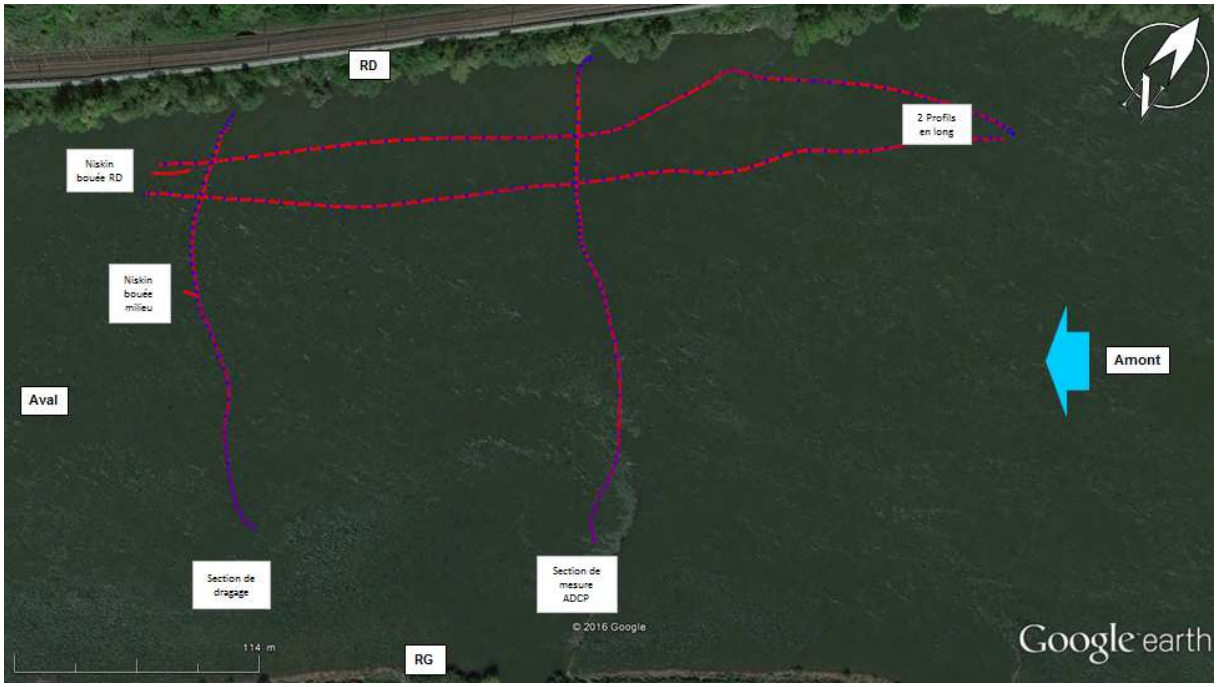
| nom | JJ/MM/AAAA | heure | observations générales |
|---|---|---|---|
| **RG1_GOPR0053** | 1/17/2017 | 13h46 | charriage faible, avec ride mobile<br>charriage parfois pas dans le même sens que l'écoulement 7'36" |
| **RG2_GOPR0054** | 1/17/2017 | 14h06 | charriage faible par bouffées, ride mobile |
| **RG3_GOPR0055** | 1/17/2017 | 14h36 | très belle rides observées - charriage faible |
| **CHE1_GOPR0056** | 1/17/2017 | 15h06 | attention refoulement de sable au retrait de l'eau 17'04"<br>pas de présence de dune |
| **CHE2_GOPR0057** | 1/17/2017 | 15h21 | charriage important vitesse écoulement importante, passage d'une dune importante |
| **CHE3_GOPR0058** | 1/17/2017 | 15h37 | charriage important, HS se vide un peu à la remontée 11"32'<br>pas de visuel de dune |
| **RD1_GOPR0059** | 1/17/2017 | 16h02 | léger refoulement de sable à 12'53" à la remontée |
| **RD2_GOPR0060** | 1/17/2017 | 16h27 | prélèvement moyen |
| **RD3_GOPR0060** | 1/17/2017 | 16h41 | vision dune avec charriage important |
| **CHE1_GOPR0064** | 1/18/2017 | 10h09 | pas de flux et pas de charriage pas de mouvement |
| **RG1_GOPR0065** | 1/18/2017 | 10h24 | belle ride en visuelle |
| **RG2_GOPR0066** | 1/18/2017 | 10h34 | vitesse faible peu de transport |
| **RG3_GOPR0067** | 1/18/2017 | 10h44 | vitesse faible peu de transport<br>bonne visualisation de rides |
| **RG4_GOPR0068** | 1/18/2017 | 13h09 | ride présente *- le mouvement de panier<br>ne semble pas avoir arraché des sédiments |
| **CHE4_GOPR0073** | 1/18/2017 | 14h03 | vitesse importante charriage importante, dune présente |
| **CHE5_GOPR0074** | 1/18/2017 | 14h11 | bon prélèvement avec charriage |
| **CHE6_GOPR0075** | 1/18/2017 | 14h21 | bon prélèvement avec charriage passage d'une dune |
| **CHE7_GOPR0076** | 1/18/2017 | 14h31 | bon prélèvement avec charriage passage d'une dune |
| **RD5_GOPR0078** | 1/18/2017 | 14h58 | ride qui bouge charriage important |
| **RD6_GOPR0079** | 1/18/2017 | 15h09 | prélèvement correct |
| **RD7_GOPR0080** | 1/18/2017 | 15h19 | prélèvement moyen |
| **RD8_GOPR0086** | 1/19/2017 | 13h40 | bon prélèvement |
| **RD9_GOPR0087** | 1/19/2017 | 13h53 | bon prélèvement |
| **RD10_GOPR0088** | 1/19/2017 | 14h02 | bon prélèvement |
| **CHE8_GOPR0089** | 1/19/2017 | 14h16 | bon prélèvement sans charriage important |
| **CHE9_GOPR0090** | 1/19/2017 | 14h25 | attention inverse au charriage mais sens écoulement correct<br>prélèvement sans sens |
| **CHE10_GOPR0091** | 1/19/2017 | 14h31 | prélèvement très moyen |
| **RG8_GOPR0092** | 1/19/2017 | 14h44 | prélèvement moyen charriage faible |
| **RG9_GOPR0093** | 1/19/2017 | 14h53 | prélèvement bon charriage faible et pas de dune |
| **RG10_GOPR0094** | 1/19/2017 | 15h01 | bon prélèvement avec un petit passage de dune |

**Tableau 1 : Récapitulatif des mesures de charriage par Helley-Smith (janvier)**

Pour l'embarcation 2 (bateau VNF), le protocole a été le suivant :

- Faire un jaugeage complet de la section (4 traversées) ;
- Réalisation d'un profil longitudinal avec ADCP et sonar passant par une des verticales choisies ;

- Faire l'exploration des concentrations sur la section (3 même verticales que pour le charriage) avec la bouteille Niskin ;
- Faire un jaugeage complet de la section (4 traversées) au bout de 1h30 de manipulation.



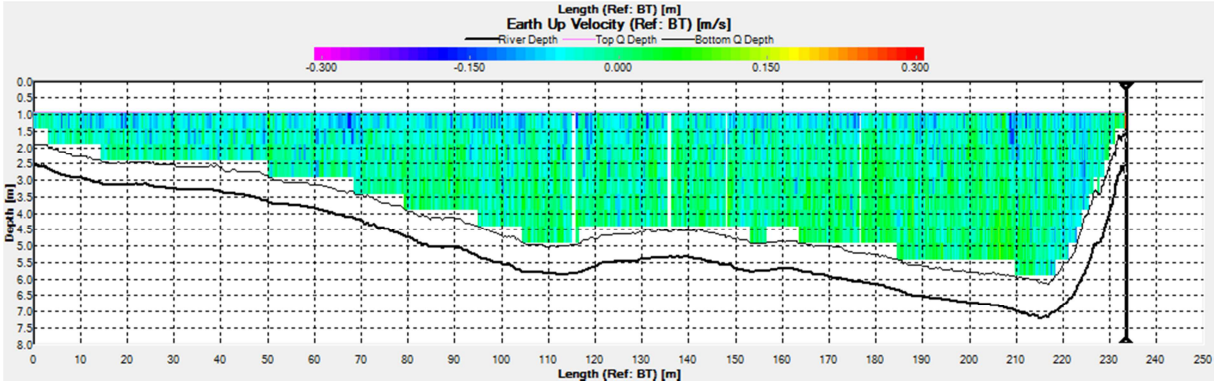




**Figure 13 : Localisation des mesures ADCP et exemple de restitution au PK 72.5.**

| Nom de fichier | Num. fichier | | |
|---|---|---|---|
| | de … | à … | |
| **LOIRE170117SF6W2** | 000 | - | jaugeage sur section de dragage. Visuel ds onglet PK 72.5-1 |
| | 002 | 004 | jaugeage sur section de mesure ADCP. Fichier 003 : 2A/R non-stop. |
| | 005 | - | test sur bouée RD. |
| | 006 | - | Point fixe 5min pour vérifier la présence de fond mobile : vit du fond estimée à 0.005 m/s. |
| | 007 | - | Niskin bouée RD à 4m de prof. |
| | 008 | - | Niskin bouée RD à 5.5m de prof. |
| | 009 | 014 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 015 | - | Niskin bouée RD au fond : grattée. |
| | 016 | - | Niskin bouée RD à 6m de prof. |
| | 017 | 022 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 023 | - | profil en long amt => avl (bouée rouge du chenal) |
| | 024 | - | profil en long avl => amt (bouée rouge du chenal) |
| | 025 | 030 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| **LOIRE180117SF6W2** | 000 | 016 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| **LOIRE180117pmSF6W2** | 000 | 005 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 007 | - | Niskin bouée RD à 4m de prof. |
| | 008 | - | Niskin bouée RD à 5m de prof. : grattée |
| | 009 | - | Niskin bouée RD à 5m de prof. |
| | 011 | - | Niskin bouée RD à 5.5m de prof. |
| | 012 | - | Point fixe 5min pour vérifier la présence de fond mobile : vit du fond estimée à 0.009 m/s. |
| | 013 | 019 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 020 | - | Niskin bouée Milieu : grattée |
| | 021 | - | Niskin bouée Milieu à 4m de prof. |
| | 023 | - | Niskin bouée Milieu à 4.25m de prof. |
| | 024 | 029 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| **LOIRE190117SF6W2** | 000 | 020 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| **LOIRE190117pmSF6W2** | 000 | 005 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 006 | - | Niskin bouée RD à 5m de prof. |
| | 007 | - | Niskin bouée RD à 5.5m de prof. : grattée ? |
| | 008 | - | Niskin bouée RD à 5.5m de prof. |
| | 009 | - | Point fixe 5min pour vérifier la présence de fond mobile : vit du fond estimée à 0.008 m/s. |
| | 010 | 013 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 014 | - | Niskin bouée Milieu à 4m de prof. |
| | 015 | - | Niskin bouée Milieu à 4.30m: grattée ? |
| | 016 | - | Niskin bouée Milieu à 4.15m de prof. |
| | 018 | 021 | jaugeage sur section de mesure ADCP. |
| | 022 | 023 | jaugeage sur section de dragage. Visuel ds onglet PK 72.5-2 et PK 72.5-2bis |

**Tableau 2 : Récapitulatif des mesures de vitesses par ADCP.**

La figure suivante présente les points de jaugeages réalisés sur 3 jours, avec le débit de la station de Montjean-sur-Loire sur la même période (Banque hydro). Les constats sont les suivants :

- Pour un débit de Loire de 450 $m^3/s$ à Montjean et coefficient de marée d'environ 70,

le débit oscille localement entre +650 $m^3/s$ et -100 $m^3/s$, certaines mesures ont donc été réalisées lors de l'inversion du flux.

- Les périodes à marée basse (pics de débits) sont 4 à 5 fois plus longues que les périodes à marée haute.

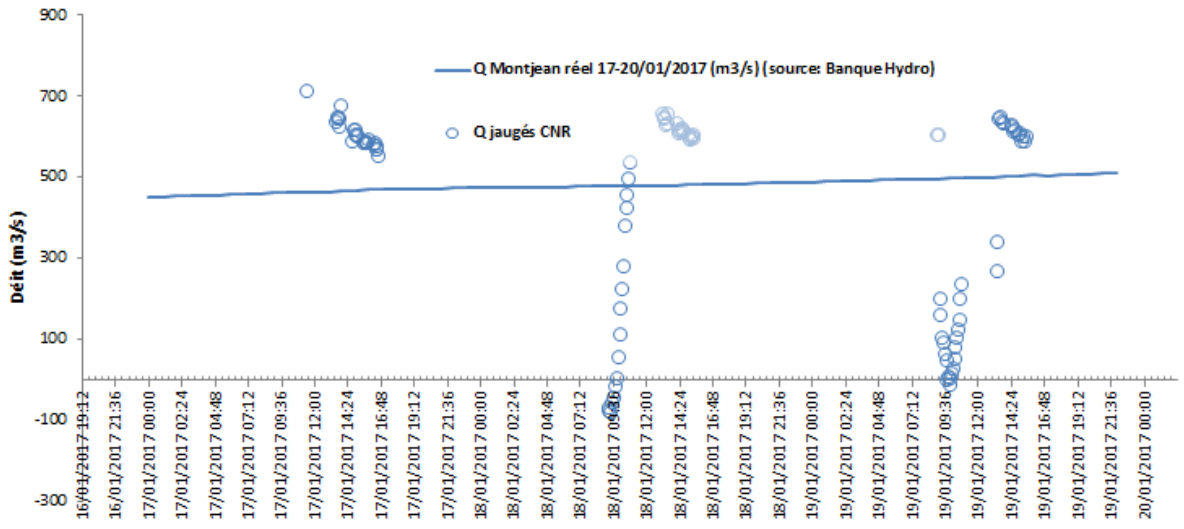



**Figure 14 : Récapitulatif des conditions hydrauliques au PK72.5 du 17 au 19 janvier 2017 (mesures par jaugeages ADCP).**

Les conditions hydrauliques continues pendant les 3 jours de mesure peuvent être déterminées par simulation 1D Hydrariv des valeurs Q(t) et Z(t) aux PK73 et PK58.

## 3.4. Compte rendu d'intervention (Avril 2017)

Le programme du 4 au 6 avril a également été réalisé conformément aux prévisions. 4 jeux de mesures ont été réalisés:

- 1 en basse mer (BM) : les BM principalement observées la nuit sur cette période. Une seule mesure possible
- 3 en pleine mer (PM) : les mesures ont permis également de prendre la phase de descente de la marée.

La méthodologie appliquée sur cette campagne est similaire à celle du mois de Janvier.

Lors de la phase de reconnaissance le mardi matin (04/04), deux capteurs de pression encadrant le site avec une distance d'environ 500 m ont été installés afin de permettre une mesure temporelle du niveau d'eau et de la pente locale d'écoulement.

La section de mesure est la même que celle choisie en janvier. Des bouées de repérage ont été installées le mardi matin suite aux marquages des trois points de mesures réalisés en janvier.

Pour l'embarcation 1 (bateau CNR), le protocole proposé et respecté a été le suivant pour les trois verticales:

- Faire une mesure du charriage avec le préleveur Helley-Smith sur chacune des verticales avec 2 répétitions (3 échantillons au total) ;

- Chaque prélèvement est accompagné d'une vidéo pour valider la mesure.
- Faire en parallèle une mesure de la vitesse de l'écoulement en fixe (ADCP).

Le tableau ci-après est un récapitulatif des mesures par Helley smith.

| nom | JJ/MM/AAAA | heure | observations générales |
|---|---|---|---|
| **RD1_GOPR0186** | 04/04/2017 | 13H27 | vidéo mauvaise qualité peu de mouvement |
| **RD2_GOPR0187** | 04/04/2017 | 13h34 | qualité mauvaise pas utilisable |
| **RD3_GOPR0188** | 04/04/2017 | 13h50 | qualité mauvaise pas utilisable |
| **CHE1_GOPR0189** | 04/04/2017 | 14h25 | vidéo très mauvaise |
| **CHE2_GOPR0190** | 04/04/2017 | 14h41 | vidéo mauvaise mais transport visible |
| **CHE3_GOPR0191** | 04/04/2017 | 14h59 | panier levé juste avant passage de ride |
| **CHE4_GOPR0192** | 04/04/2017 | 15h15 | passage d'une ride captée |
| **RG1_GOPR0193** | 04/04/2017 | 15h31 | charriage très faible |
| **RG2_GOPR0194** | 04/04/2017 | 15h46 | charriage très faible |
| **RG3_GOPR0195** | 04/04/2017 | 15h57 | charriage très faible |
| **RD4_GOPR0196** | 04/04/2017 | 16h19 | qualité vidéo mauvaise pas utilisable |
| **RD4BIS _GOPR0196** | 04/04/2017 | 16h19 | qualité vidéo mauvaise pas utilisable |
| **RD1_GOPR0197** | 05/04/2017 | 10h21 | Inversion charriage |
| **RD2_GOPR0198** | 05/04/2017 | 10h37 | charriage un peu multidirectionnel |
| **RD3_GOPR0199** | 05/04/2017 | 10h54 | charriage avec toujours un peu du multidirectionnel |
| **CHE1_GOPR0200** | 05/04/2017 | 11h32 | charriage multidirectionnel |
| **CHE2_GOPR0201** | 42830 | 12h04 | charriage par bouffé mais prélèvement parait bon |
| **CHE3_GOPR0202** | 42830 | 12h17 | charriage bon prélèvement |
| **RG1_GOPR0203** | 05/04/2017 | 12h41 | panier bouge beaucoup |
| **RG2_GOPR0204** | 42830 | 12h53 | charriage avec ride bon prélèvement |
| **RG3_GOPR0205** | 42830 | 13h01 | charriage bon prélèvement |
| **RD4_GOPR0206** | 42830 | 15h18 | qualité image moyenne mais prélèvement parait ok |
| **RD5_GOPR0207** | 42830 | 15h30 | qualité image moyenne mais prélèvement parait ok |
| **RD6_GOPR0208** | 42830 | 15h41 | charriage bon prélèvement |
| **CHE4_GOPR0209** | 42830 | 15h58 | charriage bon prélèvement |
| **CHE5_GOPR0210** | 42830 | 16h07 | charriage bon prélèvement |
| **CHE6_GOPR0211** | 42830 | 16h17 | charriage bon prélèvement |
| **RG4_GOPR0212** | 42830 | 16h37 | bon prélèvement pas de charriage |
| **RG5_GOPR0213** | 05/04/2017 | 16h47 | HS TRAINE PAS DE CHARRIAGE |
| **RG6_GOPR0214** | 05/04/2017 | 16h58 | HS traine PAS DE CHARRIAGE |
| **RD1_GOPR0218** | 06/04/2017 | 8h56 | |
| **RD2_GOPR0219** | 06/04/2017 | 9h08 | image pas utilisable mais ne semble pas bouger |
| **RD3_GOPR0220** | 06/04/2017 | 9h19 | image pas utilisable mais ne semble pas bouger |
| **RG1_GOPR0222** | 06/04/2017 | 9h43 | prélèvement moyen panier bouge à priori sans racler |
| **RG2_GOPR0223** | 42831 | 9h54 | bon prélèvement |
| **RG3_GOPR0224** | 06/04/2017 | 10h04 | panier bouge |
| **CHE1_GOPR0225** | 42831 | 10h29 | bon prélèvement |
| **CHE2_GOPR0227** | 42831 | 10h41 | bon prélèvement charriage actif |
| **CHE3_GOPR0233** | 42831 | 10h58 | bon prélèvement charriage actif |
| **RG4_GOPR0234** | 42831 | 13h06 | prélèvement moyen panier bouge à priori sans racler au moment de relever |
| **RG5_GOPR0235** | 42831 | 13h18 | bon prélèvement charriage actif |
| **RG6_GOPR0236** | 06/04/2017 | 13h26 | panier bouge |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **RD4_GOPR0237** | 06/04/2017 | 13h47 | pas bonne qualité vidéo mais ne bouge pas |
| **RD5_GOPR0238** | 42831 | 13h57 | bon prélèvement |
| **RD6_GOPR0239** | 42831 | 14h07 | bon prélèvement |
| **CHE4_GOPR0240** | 06/04/2017 | 14h24 | pas forcément dans l'axe prélèvement moyen |
| **CHE5_GOPR0241** | 42831 | 14h33 | charriage présent prélèvement correct |
| **CHE6_GOPR0242** | 42831 | 14h42 | bon prélèvement |

**Tableau 3 : Récapitulatif des mesures de charriage par Helley-Smith (avril)**

Pour l'embarcation 2 (bateau CNR), le protocole a été le suivant :

- Faire un jaugeage complet de la section (4 traversées) ;
- Réalisation d'un profil longitudinal avec ADCP et sonar passant par une des verticales choisies ;
- Faire un jaugeage complet de la section (4 traversées) au bout de 1h30 de manipulation.

La figure suivante présente les points de jaugeages réalisés sur 3 jours, avec le débit de la station de Montjean-sur-Loire sur la même période (Banque hydro).

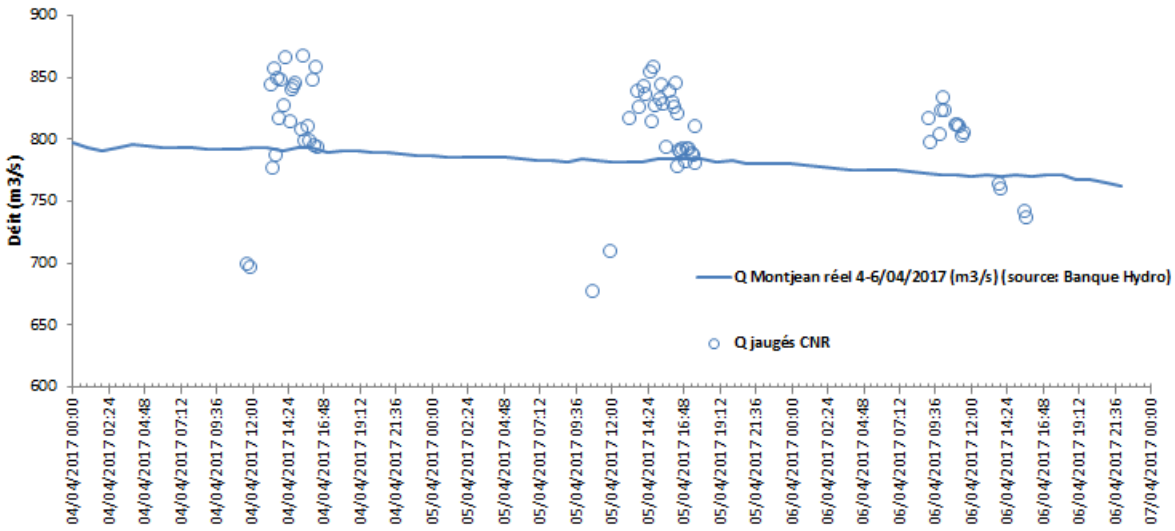



**Figure 15 : Récapitulatif des conditions hydrauliques au PK72.5 du 17 au 19 janvier 2017 (mesures par jaugeages ADCP).**

Pour l'embarcation 3 (bateau VNF), le protocole a été le suivant :

- Réaliser des mesures à la bouteille de Delft sur un temps de 10 minutes ;
- Réaliser des mesures sur les 3 verticales identifiées;
- Réaliser sur une même verticale, des mesures à différentes hauteurs par rapport au fond.

Le tableau ci-après est un récapitulatif des mesures par bouteille de Delft.

| nom | JJ/MM/AAAA | heure | hauteur |
|---|---|---|---|
| **DELFT CH1** | 05/04/2017 | 11h52 | 5cm |
| **DELFT CH2** | 05/04/2017 | 15h02 | 5cm |
| **DELFT CH3** | 05/04/2017 | 15h19 | 10cm |
| **DELFT CH4** | 05/04/2017 | 15h35 | 20cm |
| **DELFT RG1** | 05/04/2017 | 11h25 | 5cm |
| **DELFT RG2** | 05/04/2017 | 16h57 | 5cm |
| **DELFT RD1** | 05/04/2017 | 12h30 | 5cm |
| **DELFT RD2** | 05/04/2017 | 13h58 | 5cm |
| **DELFT RD3** | 05/04/2017 | 14h18 | 20cm |
| **DELFT RD4** | 05/04/2017 | 14h38 | 10cm |
| **DELFT CH5** | 06/04/2017 | 9h50 | 5cm |
| **DELFT CH6** | 06/04/2017 | 10h15 | 10cm |
| **DELFT CH7** | 06/04/2017 | 10h29 | 20cm |
| **DELFT CH8** | 06/04/2017 | 14h18 | 5cm |
| **DELFT CH9** | 06/04/2017 | 14h35 | 10cm |
| **DELFT RD5** | 06/04/2017 | 10h49 | 5cm |
| **DELFT RD6** | 06/04/2017 | 11h09 | 10cm |
| **DELFT RD7** | 06/04/2017 | 11h27 | 20cm |
| **DELFT RD8** | 06/04/2017 | 13h36 | 5cm |
| **DELFT RD9** | 06/04/2017 | 13h57 | 10cm |
| **DELFT RG3** | 06/04/2017 | 9h12 | 5cm |
| **DELFT RG4** | 06/04/2017 | 9h30 | 10cm |
| **DELFT RG5** | 06/04/2017 | 14h55 | 5cm |

**Tableau 4 : Récapitulatif des mesures par bouteille de Delft (avril)**

# 4. ANALYSES DE LABORATOIRE

Toutes les analyses (pesée à sec, granulométrie, etc.) ont été réalisées par le laboratoire CNR et sont disponibles en annexe.

## 4.1. Flux de charriage de sable

Le poids sec prélevé par échantillonnage Helley-Smith croisé au temps d'exposition au fond permet d'établir directement un débit solide unitaire en kg/s/m. Pour chaque verticale, une moyenne de débit solide est réalisé puis rattaché à la valeur locale de débit par jaugeage ADCP (Cf. Figure 16).

La transformation en débit solide total se fait par application de largeurs actives conformes aux 3 verticales, comme visible sur la Figure 17 avec application d'une incertitude de 50%.

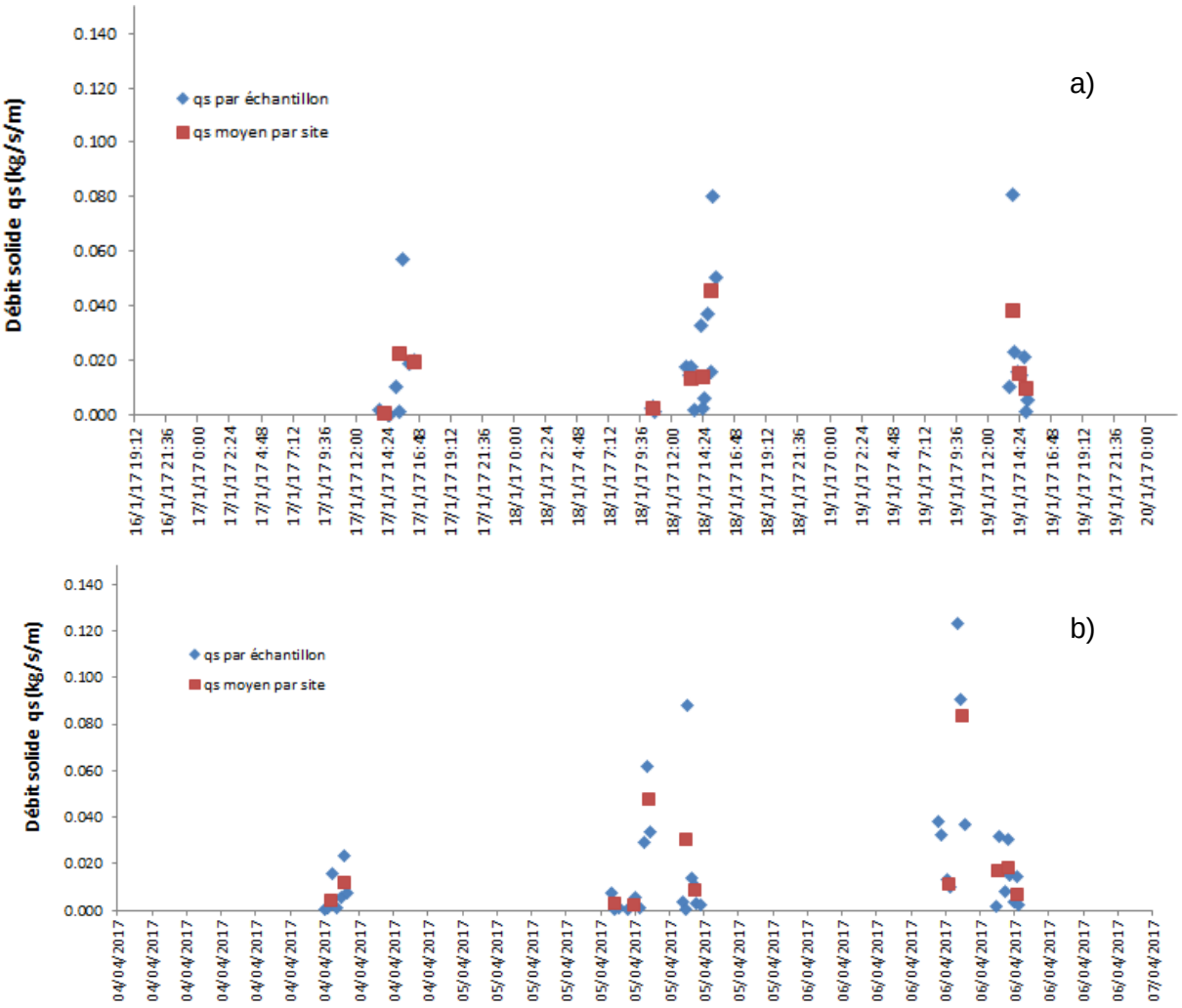



**Figure 16 : débits solides unitaires par échantillon et moyen par site – a) janvier 2017, b) avril 2017**

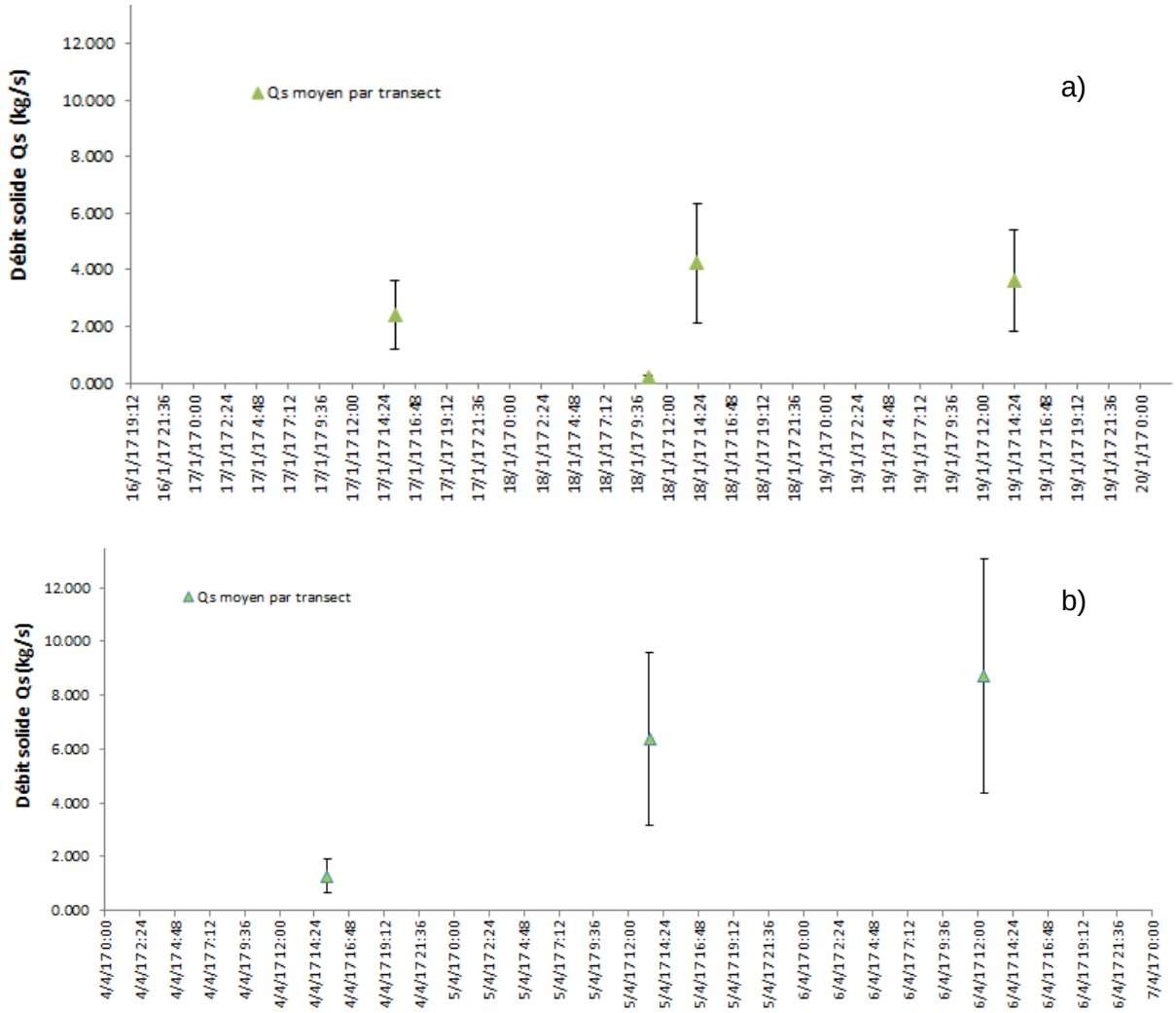
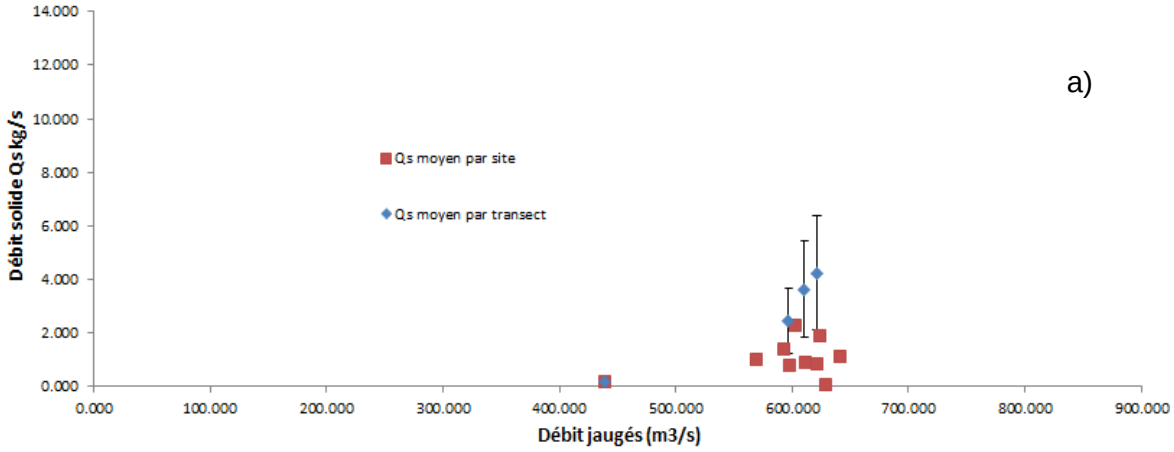



**Figure 17 : débits solides par transect – a) janvier 2017, b) avril 2017**

Le résultat des mesures de flux réalisées en janvier et avril 2017 peut être représenté en fonction du débit liquide de Loire à l'endroit des mesures (Figure 18).



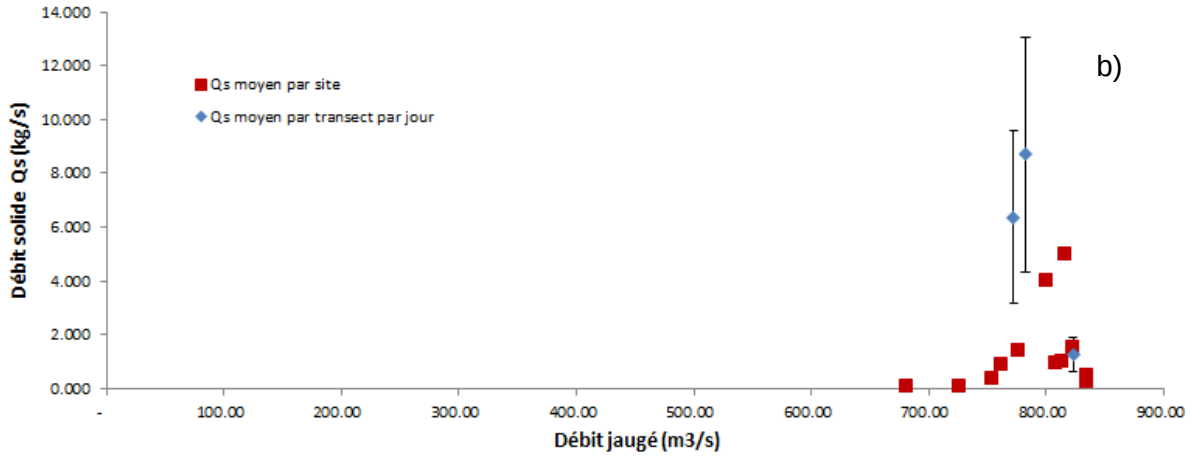



**Figure 18 : Relation débit solide / débit liquide – a) janvier 2017, b) avril 2017**

## 4.2. Distribution spatiale des diamètres caractéristiques des sédiments en place

L'évolution des diamètres caractéristiques des sédiments dragués au fond du lit sont présentés sur la Figure 19.

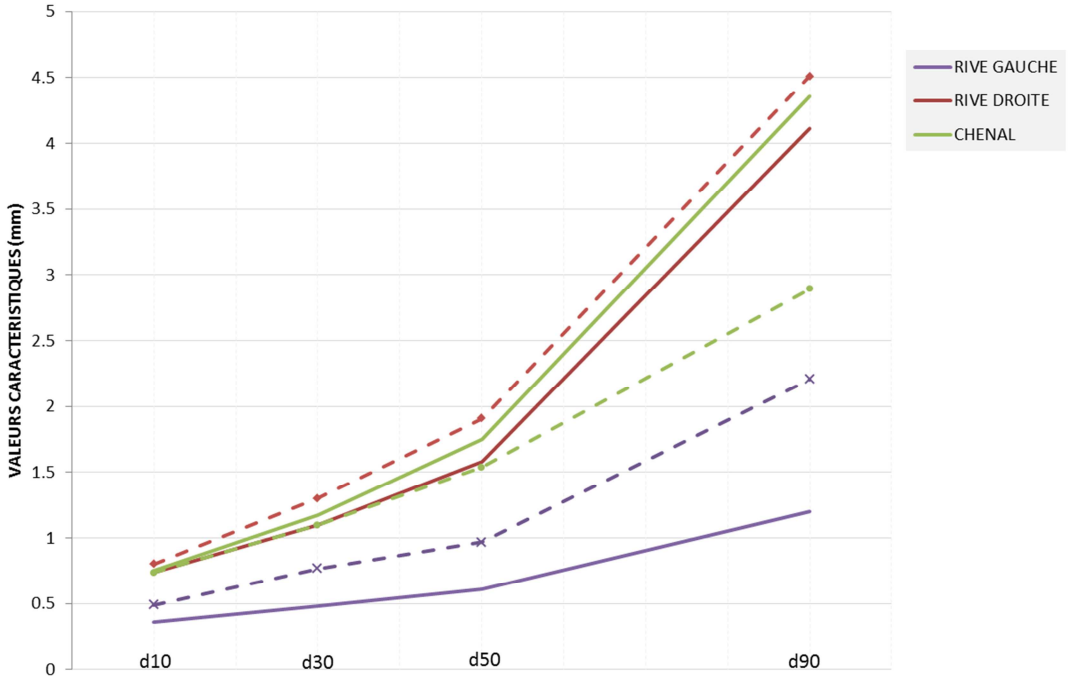



**Figure 19 : Évolution des diamètres caractéristiques des sédiments en place au fond du lit par site de prélèvement**

Le diamètre moyen (d50) des sédiments dragués varie spatialement dans la section. On constate un diamètre moyen très similaire proche de 1.6 mm sur le tronçon rive droite et chenal correspondant à la largeur active. Sur le tronçon rive gauche situé à proximité des épis, le sédiment en place est plus fin et proche de 1 mm. Les deux campagnes réalisées en janvier et avril permettent également d'observer une légère fluctuation des diamètres caractéristiques en fonction des débits observés sur la Loire.

L'ensemble des mesures sur les deux campagnes permettent d'évaluer un d50 moyen sur chaque verticale des sédiments en place :

| Rive gauche (d50) | Chenal (d50) | Rive droite (d50) |
|---|---|---|
| 0.788 mm | 1.644 mm | 1.744 mm |

**Tableau 5 : Diamètre moyen médian des sédiments en place**

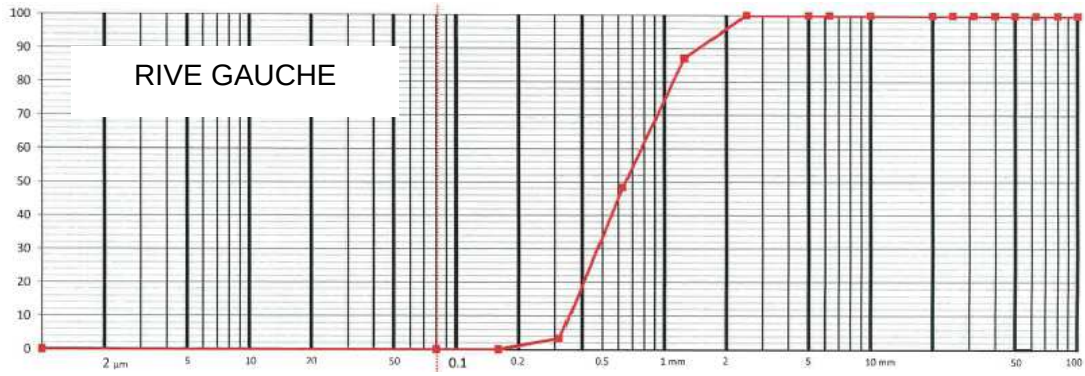
## 4.1. Distribution spatiale des diamètres caractéristiques des sédiments charriés

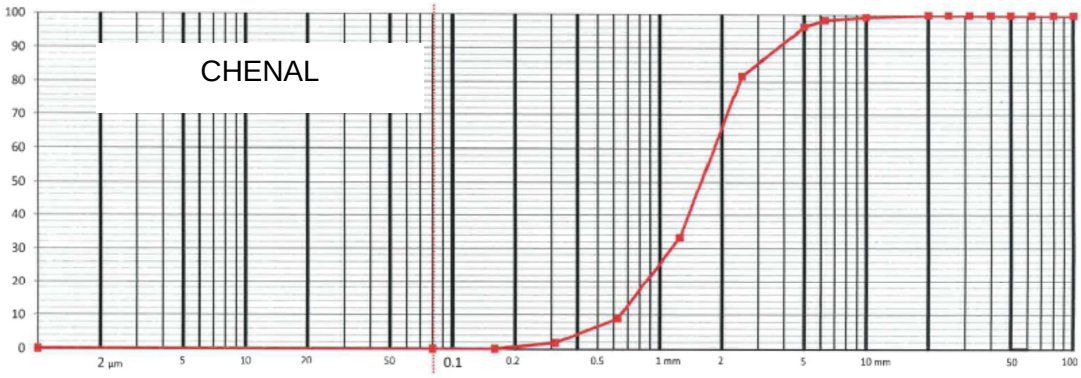
L'analyse des sédiments charriés et prélevés par le Helley-Smith a été effectuée sur l'ensemble des prélèvements des deux campagnes. Les caractéristiques des diamètres moyens pour chaque verticale (moyenne des d50) sont les suivantes :

| Rive gauche (d50) | Chenal (d50) | Rive droite (d50) |
|---|---|---|
| 0.679 mm | 1.331 mm | 1.823 mm |

**Tableau 6 : Diamètre moyen médian des sédiments charriés (janvier 2017)**

Les courbes ci-dessous présentent les résultats sur un échantillon sélectionné sur respectivement la rive gauche, le chenal et la rive droite lors de la seconde campagne.



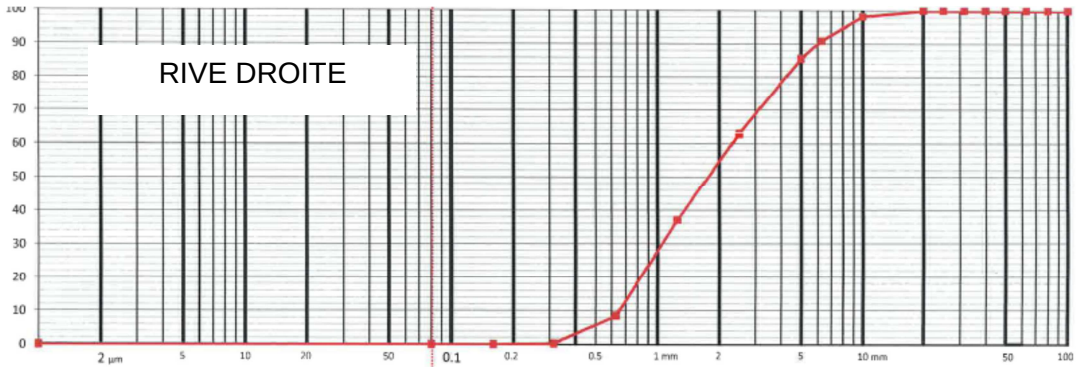



**Figure 21 : Courbe granulométrique en fonction de la position dans la section**

Les caractéristiques des diamètres moyens pour chaque verticale (moyenne des d50) sont les suivantes :

| Rive gauche (d50) | Chenal (d50) | Rive droite (d50) |
|---|---|---|
| 0.776 mm | 1.341 (1 jour)/0.968 (3jours) | 1.597 mm |

**Tableau 7 : Diamètre moyen médian des sédiments charriés (avril 2017)**

Les observations faites avec les dragages se confirment dans les prélèvements de sédiments charriés. Le diamètre moyen des sédiments charriés évolue en fonction de la position du prélèvement dans la section.

## 4.2. Caractéristiques des sédiments en suspension

Sur la première campagne de janvier 2017, l'utilisation de la Bouteille Niskin à proximité du fond a permis d'analyser 14 échantillons. La Figure 20 ci-après présente les concentrations observées en fonction du débit liquide.

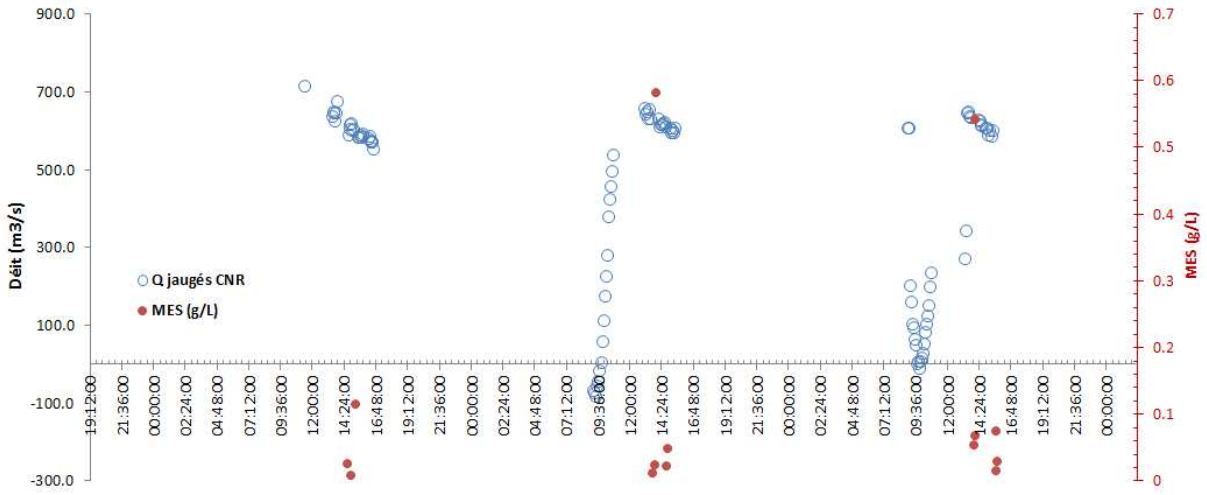



**Figure 20 : Concentration des matières en suspension sur la campagne de Janvier 2017**

Cette première campagne ne permet pas de mettre en évidence une forte concentration de matière en suspension sableuse. L'utilisation de la Bouteille de Delft lors de la campagne d'Avril s'est avérée nécessaire afin de réaliser des mesures plus précises et plus fiables.

Sur la seconde campagne, les conditions hydrauliques ont permis l'utilisation de la bouteille de Delft. Les masses de sable piégé dans la bouteille de Delft sont présentés en annexe mais les quantités présentes ne permettent pas une exploitation en débit solide. Les différentes mesures permettent d'affirmer que des sables suspendus sont observés sur 20 cm de hauteur au-dessus du fond pour un débit de 800 $m^3/s$.

Les caractéristiques granulométriques du sable en suspension sont légèrement plus faibles que celle mesurées sur le sable charrié.

| Chenal (d50) | Rive droite (d50) |
|---|---|
| 1.329 mm | 1.361 mm |

**Figure 24 : Granulométrie des sables suspendus**

## 4.3. Analyse comparative des diamètres caractéristiques pendant les mesures in situ

Le tableau ci-dessous synthétise les diamètres moyens observés des sédiments en place, des sédiments charriés et suspendus.

| | Rive gauche (d50) | Chenal (d50) | Rive droite (d50) | Moyenne |
|---|---|---|---|---|
| **Sédiments en place** | 0.788 mm | 1.644 mm | 1.744 mm | 1.392 |
| **Sédiments charriés (janvier 2017** | 0.679 mm | 1.331 mm | 1.823 mm | 1.277 |
| **Sédiments charriés (avril 2017)** | 0.776 mm | 1.341mm (1 jour)<br>0.968 mm (3jours) | 1.597 mm | 1.238 |
| **Sédiments suspendus** | - | 1.329 mm | 1.361 mm | 1.345 |

**Tableau 8 : Diamètres moyens des sables observés**

Il est important de rester vigilant sur ces résultats compte tenu du nombre restreint de mesures. Il serait intéressant à long terme de mettre en place un suivi afin de caractériser plus précisément les sédiments observés en place et en flux (distribution saisonnière par exemple). Ces premières mesures permettent tout de même de fixer une fourchette de diamètres moyens caractéristiques pour le modèle numérique compris entre 0.8 et 1.4 mm en moyenne sur la section.

# 5. COURBE DE TARAGE SÉDIMENTAIRE

## 5.1. Site de mesure

La Figure 21 résume les principales mesures réalisées sur le site de Mauves-sur-Loire lors des deux campagnes de mesures de janvier (16 au 20) et avril (4 au 6) 2017. Pour l'hydrodynamique, deux capteurs de pression ont été placés en amont et aval de la section de mesure (PK73) et des jaugeages réguliers avec un ADCP ont été acquis lors de ces campagnes. Concernant le transport solide, des mesures de charriage (à l'aide d'un Helley-Smith de largeur 7.6 cm) et de suspension sableuse (à l'aide d'une bouteille Niskin et d'une bouteille de Delft), ainsi que des tentatives de suivi de dune en amont de chacune des trois verticales de mesure. Par ailleurs des prélèvements ont été obtenus à l'aide d'une drague sur la même section de mesure ainsi que sur une section en amont (au niveau du capteur de pression amont).

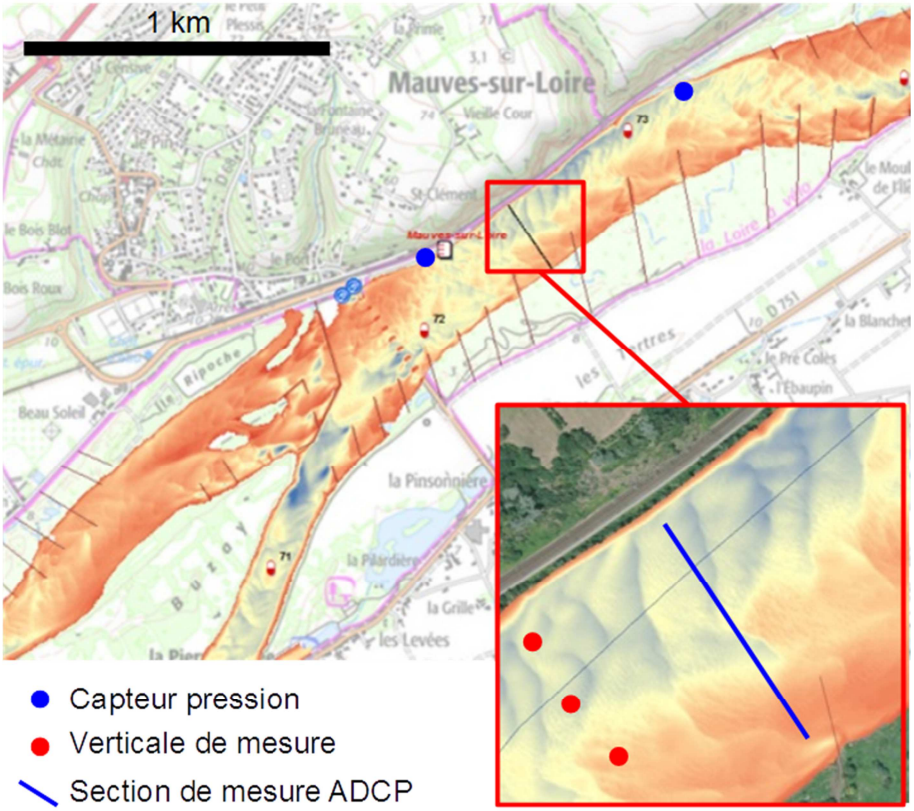



Figure 21: Site de mesure à Mauves-sur-Loire.

## 5.2. Modèle de courbe de tarage hauteur-dénivelée-débit

Une première étape pour la création d'une courbe de tarage sédimentaire dans une zone à influence tidale est de créer une courbe de tarage hauteur-dénivelée-débit. Cette dernière est réalisée sur la base des travaux de Camenen et al. (2017).

### 5.2.1. Courbe de tarage basée sur la loi de Manning-Strickler

En faisant l'hypothèse d'un écoulement uniforme sur un tronçon prismatique, il est possible d'appliquer la formule de Manning-Strickler, y compris pour une rivière influencée par la

marée si l'on suppose l'écoulement quasi-permanent.

$$Q = KA_w R_h^{2/3}\sqrt{S}, \qquad Eq.\ 1$$

où $Q$est le débit, $K$le coefficient de Strickler, $A_w$la section mouillée, $R_h$le rayon hydraulique, et $S$la pente de l'écoulement. En pratique, il est donc nécessaire pour estimer la pente de l'écoulement d'avoir deux points de mesure du niveau d'eau, $I_{am}$ et $I_{av}$, de cote respectives, $z_{am}$ et $z_{av}$, séparés d'une distance $L$ suffisamment grande pour que le dénivelé soit mesurable correctement. Dans le cas de nos deux campagnes de mesure, deux capteurs de pression ont été installés en amont et en aval (au niveau de la station hydrométrique de la DREAL) avec une distance $L = 1122$ m. La pente de l'écoulement peut aussi s'inverser, et donc, un écoulement remontant la rivière peut être observé (débit négatif, période de flot). Nous avons supposé la section de mesure représentative du tronçon; les valeurs de $A_w$ et $R_h$ ont donc été calculé sur cette section et $S = (z_{am} - z_{av})/L$.

Une difficulté apparait dans l'*Eq. 1* car la pente mesurée entre les deux points peut ne pas correspondre exactement à la pente sur le site de mesure. La prise en compte de ce décalage temporel peut être réalisée en première approximation en appliquant directement l'*Eq. 1* avec le décalage temporel. L'équation (a) peut aussi être modifiée telle que:

$$Q(t) = KA_w(t+\Delta t)R_h(t+\Delta t)^{2/3}\sqrt{S(t+\Delta t)}, \qquad Eq.\ 2$$

où $\Delta t$ est le décalage temporel observé entre les mesures de niveau et le débit.

### 5.2.2. Application à Mauves sur Loire

L'*Eq. 2* a été appliquée sur le site de Mauves-sur-Loire en utilisant les données de bathymétrie sur la section de mesure (Figure 22) et calée à l'aide des mesures de débits réalisés lors des deux campagnes de mesures.

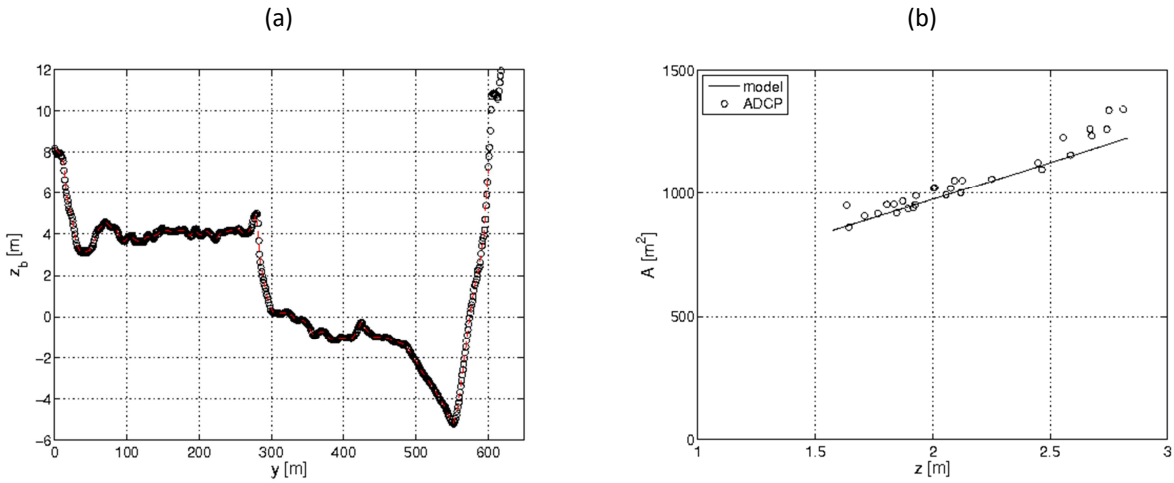



**Figure 22: Section transversale où ont été réalisées les mesures de transport solide à Mauves-sur-Loire (a, les 3 verticales se situent dans le chenal principal, soit pour $300 < y < 600$m) et section mouillée en fonction du niveau d'eau (b, les données ADCP correspondent à la campagne de janvier 2017).**

Le calage de l'équation (2) aux mesures expérimentales s'est fait principalement à partir du coefficient de Strickler mais aussi sur un possible $\Delta z$ entre les deux positions des capteurs de pression. Nous avons ainsi obtenu un coefficent de Strickler $K = 24\text{m}^{1/3}$/s. A priori, le décalage temporel $\Delta t$ devrait être égal à zéro pour notre cas du fait d'un positionnement des capteurs de pression proche et de part et d'autre de la section de mesure. Cependant, un

décalage $\Delta t = 2$h a dû être imposé pour la campagne de janvier pour un bon accord avec les données (Figure 23a); nous pensons que ce décalage serait lié à une erreur sur les temps (les temps sont exprimés à l'heure locale, soit en TU+1 en janvier et TU+2 en avril) mais cette dernière n'a pas été détectée.

Les résultats obtenus Figure 23 sont encourageants compte tenu des incertitudes dans la mesure de la hauteur d'eau (estimé à 5%) et des jaugeages ADCP (estimé à 10%). Il est à noter que le modèle ne donne pas de bons résultats lors de la marée basse pendant la campagne de janvier car les deux capteurs de pression étaient hors eau (Figure 23a). De manière similaire au problème de décalage horaire pour la campagne de janvier, les jaugeages du 6 avril indiquent une tendance opposée à celle du modèle difficilement explicable (Figure 23b).

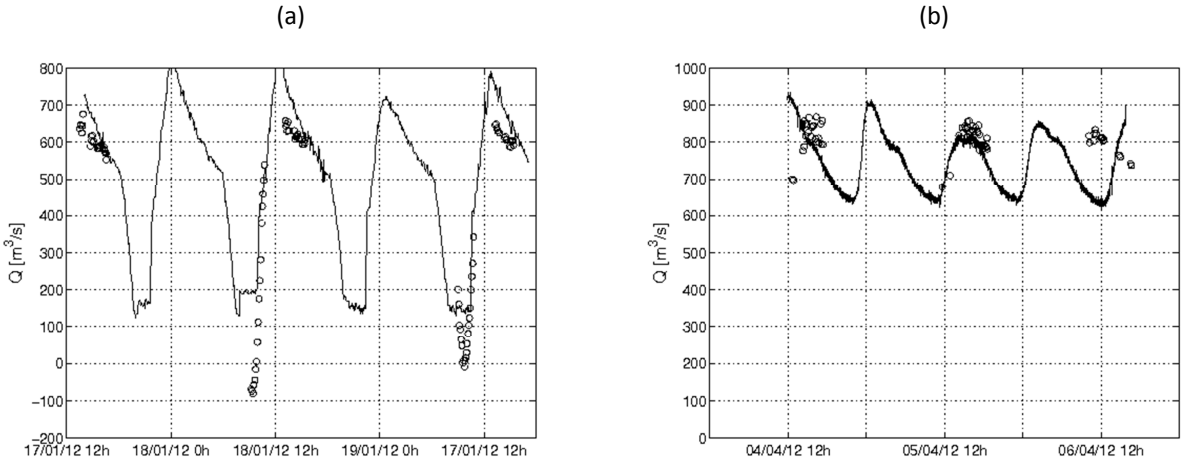



**Figure 23: Débits modélisés à l'aide de l'équation (2) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b).**

## 5.3. Modèle de courbe de tarage sédimentaire

Une fois le débit liquide calculé, il est possible d'estimer sur la même section de mesure les contraintes de cisaillement s'exerçant sur le fond de la rivière ainsi que le débit solide à partir d'une formulation de la capacité de transport adaptée.

### 5.3.1. Estimation des contraintes de cisaillement

À partir de l'*Eq. 2* et de la géométrie de la section au niveau de la station hydrométrique, il est possible d'estimer les paramètres hydrauliques moyennés sur la section :

rayon hydraulique $R_h = A_w/P_w$, avec $A_w$ la section mouillée et $P_w$ le périmètre mouillé ;

vitesse moyenne sur la section $V = Q/A_w$ ;

paramètre de Shields θestimé tel que :

$$\theta = \frac{{u_*}^2}{g(s-1)d_{50}} = \frac{C_D V^2}{g(s-1)d_{50}} \qquad \textit{Eq. 3}$$

où $u_*$ est la vitesse de frottement moyenne sur la section, $g = 9.81$ m/s$^2$ l'accélération de la pesanteur, $s \approx 2.65$ la densité du sable, $d_{50}$ la taille médiane des grains de sable, et $C_D$ un coefficient de frottement (ou coefficient de traînée) qui peut s'écrire en se basant sur l'hypothèse d'un profil de vitesse logarithmique :

$$C_D = (\frac{\kappa}{1 + \log(z_0/R_h)})$$ *Eq. 4*

avec $\kappa = 0{,}41$ la constante de Von Karman, $z_0 = k_s/30$ la longueur de rugosité, $k_s$la hauteur de rugosité et $R_h$ le rayon hydraulique. On distingue ainsi un paramètre de Shields de peau en prenant $k_s = \alpha d_{90}$ (où $d_{90}$est le diamètre pour lequel 90 % de la population de sédiment est plus fin). Le coefficient $\alpha$ est généralement pris égale à 2 (Yalin, 1977 ; Camenen et al. 2006). Cependant, les résultats de de Linares (2007) indique un meilleur accord pour les données de la Loire avec $\alpha = 3$. Le paramètre de Shields de forme est obtenus en prenant $k_s = H_d/2$ (où $H_d$est la hauteur des formes de fond, Van Rijn, 1993).

Les contraintes obtenues par cette méthode sont des contraintes moyennées sur la section. Il est cependant possible et souvent préférable de distribué les contraintes localement (proportionnellement à la hauteur d'eau comme première approximation) et de calculer le transport solide localement (Camenen et al, 2011).

### 5.3.2. Courbe de tarage sédimentaire

La courbe de tarage sédimentaire pour les sables est basée sur le papier de Camenen et al. (2014). Le transport solide par charriage et par suspension est calculé à l'aide des formules de Camenen & Larson (2005, 2008). Pour le transport solide par charriage, on a ainsi l'équation :

$$q_{sb,CL} = 12\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}\theta^{3/2}\exp(-4.5\frac{\theta_{cr}}{\theta})$$ *Eq. 5*

où $q_{sb}$ est le flux solide charrié unitaire (par unité de largeur) [m³/s/m], $\theta$ le paramètre de Shields de peau, et $\theta_{cr}$ est le paramètre de Shields critique.

Pour la suspension graduée, on utilise de même :

$$q_{ss} = Vc_R\frac{\epsilon_s}{W_s}[1 - \exp(\frac{-W_s}{\epsilon_s R_h})]$$ *Eq. 6*

où $q_{ss}$ est le flux solide par suspension unitaire [m³/s/m], $c_R$ la concentration de référence, $\epsilon_s$ la diffusion sédimentaire verticale, et $W_s$ la vitesse de chute du sédiment. La concentration de référence se calcule comme pour le charriage avec le paramètre de Shields de peau :

$$c_R = 1.5 \times 10^{-3}\exp(-0.2d_*)\exp\left(-4.5\frac{\theta_{cr}}{\theta}\right)$$ *Eq. 7*

avec $d_* = [(s-1)\,g/\nu^2]^{1/3}d_{50}$ le diamètre sédimentologique ($\nu \approx 10^{-6}$m²/s est la viscosité cinématique de l'eau). Le coefficient de diffusion sédimentaire vertical $\epsilon_s$ s'estime à partir du paramètre de Shields de forme ($\theta_t = {u_{*t}}^2/[g(s-1)d_{50}]$) :

$$\epsilon_s = \frac{\kappa}{6}u_{*t}R_h$$ *Eq. 8*

Une estimation du flux solide total de sable (en kg/s) au travers de la section est ainsi donnée d'après l'équation suivante :

$$Q_s = Q_{sb} + Q_{ss} = \rho_s(q_{sb} + q_{ss})L_a \qquad \textit{Eq. 9}$$

avec $\rho_s \approx 2650$ kg/m³ la masse volumique du sédiment, $L_a$ la largeur active de la rivière.

Il est bien sûr possible d'utiliser toute autre formule de capacité adaptée au site de la Loire. Les formulations utilisées dans le cadre de ce projet sont basées sur la formule de Meyer-Peter & Müller (1948) car le transport solide par charriage est *a priori* prépondérant (de Linares, 2007 ; Claude et al. 2012) :

$$q_{sb,MPM} = a\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}(\theta - \theta_{cr})^{3/2} \qquad \textit{Eq. 10}$$

Dans le cas de la formule originale de Meyer-Peter & Müller (1948), nous avons $a = 8$ et $\theta_{cr} = 0.047$. De Linares (2007) a recalé la formule de Meyer-Peter & Müller (1948) sur la Loire à Ingrandes en prenant $a = 8$ et $\theta_{cr} = 0.035$.

D'autres formulations comme celles d'Engelund & Hansen (1972) ou van Rijn (1984) peuvent être tout aussi adaptées même si la première est *a priori* adaptée pour des sables plus fins avec une suspension non-négligeable (Claude et al. 2012).

Comme indiqué précédemment, il est préférable de calculer les contraintes et le transport solide localement. Les équations précédentes sont toutes valables en remplaçant $R_h$ par $h$, la vitesse moyennée sur la section $V$ par la vitesse moyennée sur la hauteur d'eau $U$. Le transport solide sur la section s'estime alors différemment de *l'Eq. 9* :

$$Q_s = Q_{sb} + Q_{ss} = \rho_s \sum_i (q_{sb,yi} + q_{ss,yi})\, dy_i \qquad \textit{Eq. 11}$$

avec $q_{sb,yi}$et $q_{ss,yi}$le débits solides par charriage et suspension à l'abscisse $y_i$.

## 5.4. Application pour l'estimation du charriage à Mauves sur Loire

La Figure 24 présente les résultats obtenus à partir du modèle de courbe de tarage et de la courbe de tarage hauteur-dénivelé-débit. Pour les calculs présentés à suivre, nous avons utilisé une seule classe de sédiments basées sur les courbes granulométriques issues des dragages dans le lit. Nous avons ainsi pris un diamètre médian $d_{50} = 1.2$mm et un diamètre des plus grossiers $d_{90} = 2.5$mm. Si le modèle donne des résultats cohérents dans son ensemble, il semble cependant sous-estimer légèrement les flux en particulier pour la campagne de janvier (Figure 24a).

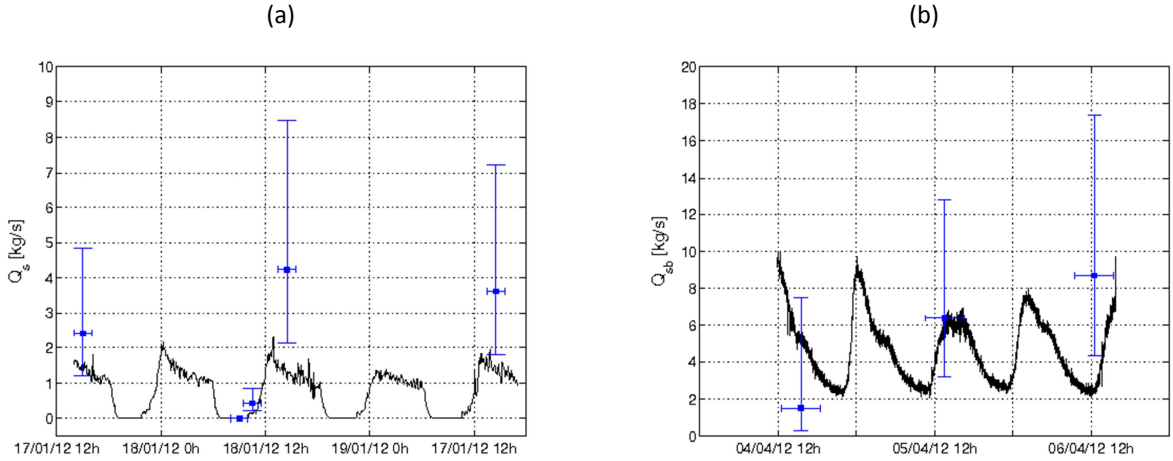



**Figure 24: Débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005) à partir d'un calcul des contraintes distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b).**

## 5.5. Sensibilité des résultats

La Figure 25 présente les mêmes résultats que pour la Figure 24 en mettant en avant l'impact de la prise en compte d'une distribution des contraintes sur la section (*Eq. 11*) au lieu d'un calcul du transport solide à partir de la contrainte moyenne sur la section (*Eq. 9*). Il apparait que les résultats sont très sensibles à ce choix de calcul en particulier pour des cas avec des contraintes relativement faibles et proches de la contrainte critique de mise en mouvement. On observe en effet une sous-estimation de près de 50% dans le cas de la campagne de janvier 2017 (Figure 25a); pour la campagne d'avril 2017 où les contraintes sont généralement plus élevées, cette sous-estimation reste d'environ 30%.

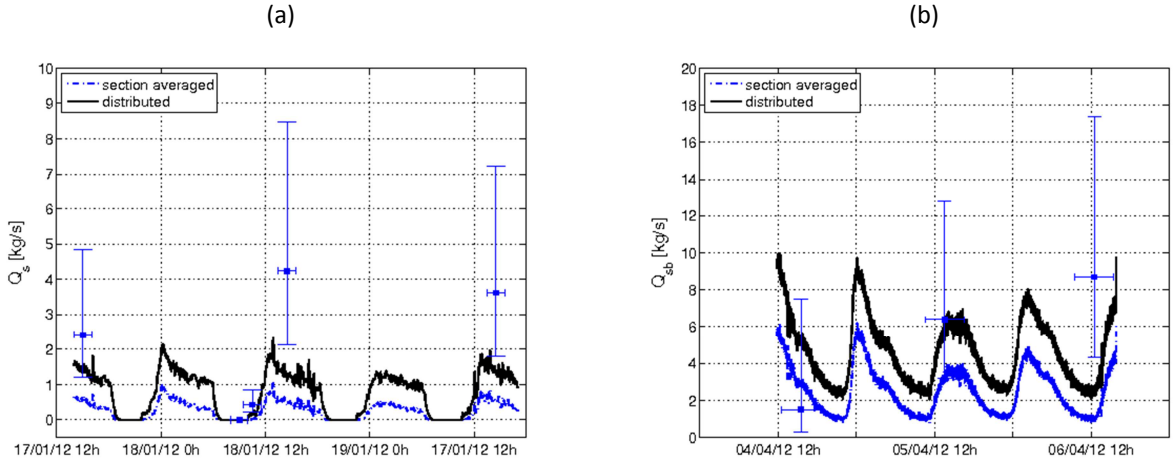



**Figure 25: Débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005) à partir d'un calcul des contraintes moyennes (Eq. 9) ou distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b).**

La Figure 26 indique la sensibilité de la formule de Camenen & Larson (2005) au diamètre du sédiment choisi. Des valeurs du $d_{50}$ de 0.8 à 1.6 mm ont été testée. Il apparait une sensibilité non-négligeable des résultats au diamètre, en particulier pour la campagne de mesure de janvier 2017 (Figure 26a). En effet, le diamètre impacte directement le calcul de la contrainte de cisaillement critique. Ainsi de la même manière que pour le cas du choix du

calcul des contraintes, le calcul du transport solide est très sensible aux les faibles valeurs de contraintes proches de la contrainte critique de mise en mouvement.

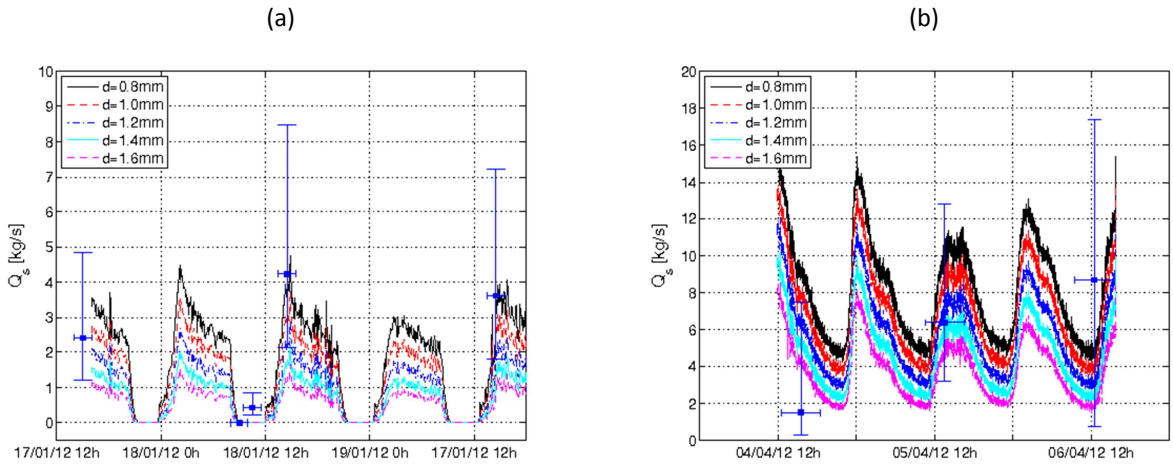



**Figure 26: Sensibilité au diamètre sur les débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005) à partir d'un calcul des contraintes moyennes (Eq. 9) ou distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b).**

La Figure 27 indique la sensibilité au choix de la formule de capacité. Ainsi, la formule de Meyer-Peter & Müller (1948) dans sa version modifiée par Artelia (de Linares, 2007) implique des débits solides plus élevés que issus de la formule de Camenen & Larson (2005), et *a priori* plus en accord avec les résultats expérimentaux. A l'inverse, la formule de de Meyer-Peter & Müller (1948) dans sa version originale et basée sur un calcul de contrainte moyennée sur la section (modèle Hydratec) implique une sous-estimation des résultats importantes en particulier pour la campagne de janvier où les contraintes sont relativement plus faibles.

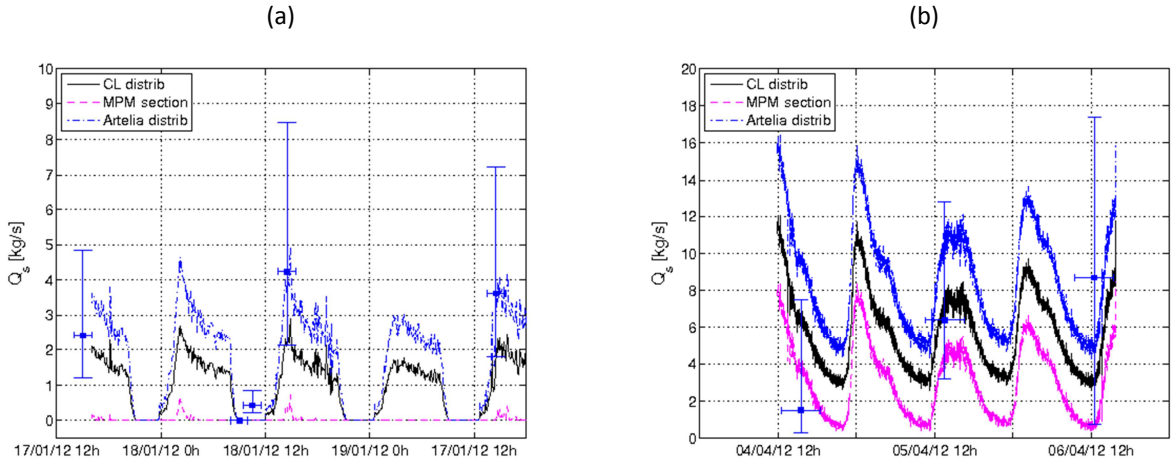



**Figure 27: Débits solide par charriage modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2005), de Meyer-Peter & Müller (1948) dans sa version original et sans distribution des contraintes et dans sa version modifiée par Artelia (de Linares, 2007) à partir d'un calcul des contraintes moyennes (Eq. 9) ou distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure de janvier 2017 (a) et d'avril 2017 (b).**

## 5.6. Application pour l'estimation de la suspension graduée à Mauves sur Loire

Des mesures avec la bouteille de Delft ont permis d'estimer la suspension graduée de sable sur la section de Mauves-sur-Loire lors de la campagne d'avril 2017. Sachant que les sédiments fins sont plus sensibles à la suspension, les calculs ont donc été réalisés avec deux classes de sédiments: une première classe de sédiments fins ($d_a = 0.6$mm) à 30% et une seconde classe plus grossière ($d_b = 1.6$mm) à 70%. La Figure 28a indique que cette description bimodale de la granulométrie est à peu près en cohérence avec les échantillons de la bouteille de Delft. La Figure 28b présente les résultats obtenus à partir du modèle de courbe de tarage et de la courbe de tarage hauteur-dénivelé-débit. Le modèle tend à nettement sous-estimer les résultats expérimentaux avec de plus une granulométrie beaucoup plus fine (seule la classe à 0.6 mm implique un transport en suspension important pour le modèle). Ces résultats indiquent peut-être que les mesures avec la bouteille de Delft sur des profondeurs faibles (à 5 et 10 cm au-dessus du fond) incluent plus du charriage (saltation) que de la réelle suspension graduée de sable. Il est à noter qu'au-delà de 20 cm, les résultats issus de la bouteille de Delft indiquaient un transport en suspension graduée nul.

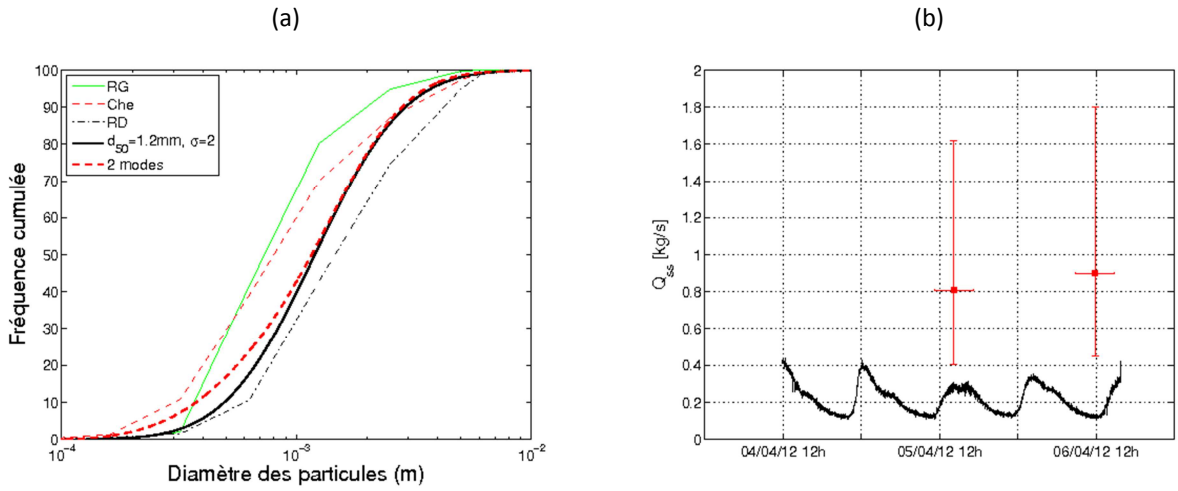



**Figure 28: Granulométrie des sédiments échantillonées avec la bouteille de Delft (a) et débits solide par suspension graduée modélisés à l'aide de la formule de Camenen & Larson (2008) à partir d'un calcul des contraintes distribuées sur la section (Eq. 11) dans le cas de la campagne de mesure d'avril 2017 (b).**

## 5.7. Application au calcul d'un flux moyen annuel

Des résultats du modèle hydraulique 1D d'Hydratec ont permis d'estimer les niveaux d'eau et pente sur la section d'étude (PK73) sur la période de 2009 à 2013. Il a ainsi été possible de calculer les débits liquide et solide sur cette période à partir des modèles de courbes de tarage hydraulique et sédimentaire calibrées pour le site de Mauve-sur-Loire. Il a aussi été possible de réaliser les mêmes calculs en effaçant les effets de la marée (moyenne glissante) pour estimer l'impact de la marée sur le transport solide.

La Figure 29 présente les résultats de débits liquide et solide avec un calcul des contraintes distribuées sur la section et l'application de la formule de capacité par charriage de Camenen & Larson (2008). Concernant les débits, on peut s'apercevoir que l'impact de la marée devient rapidement négligeable (au-delà d'un débit de 500 $m^3$/s). La courbe des débits moyennés sur une marée est très similaire à la courbe instantanée pour les périodes de haut débit. Cela impacte directement les résultats sur le transport solide où l'on s'aperçoit que les résultats sont très similaires même si les mesures instantanées impliquent un débit solide

plus élevé.

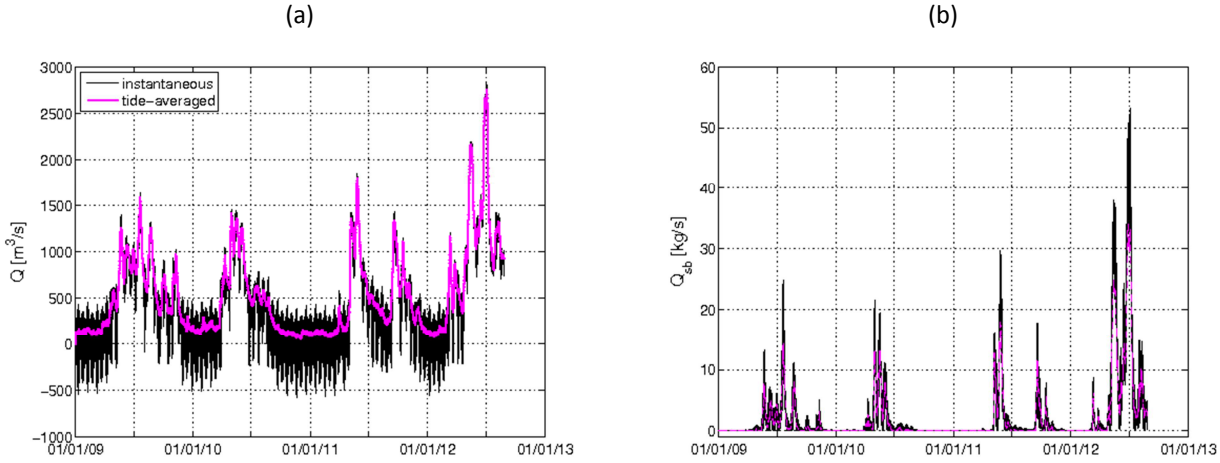



**Figure 29 : Débit liquide(a) et solide (b) issus des courbes de tarage hydro-sédimentaire calées sur le Loire à Mauves-sur-Loire sur la période de 2009 à 2013.**

Les résultats en termes de flux solide moyen annuel par charriage sont donnés dans le Tableau 9. Ils confirment la prédominance des forts débits sur le transport solide. En effet, les différences entre les 3 formules qui sont principalement sur le début de mise en mouvement impliquent des différences dans les résultats faibles par rapports aux deux cas expérimentaux où les débits étaient relativement faibles (cf. Figure 27). Nous obtenons ainsi des flux solides moyens annuels proches de 100 000 t.

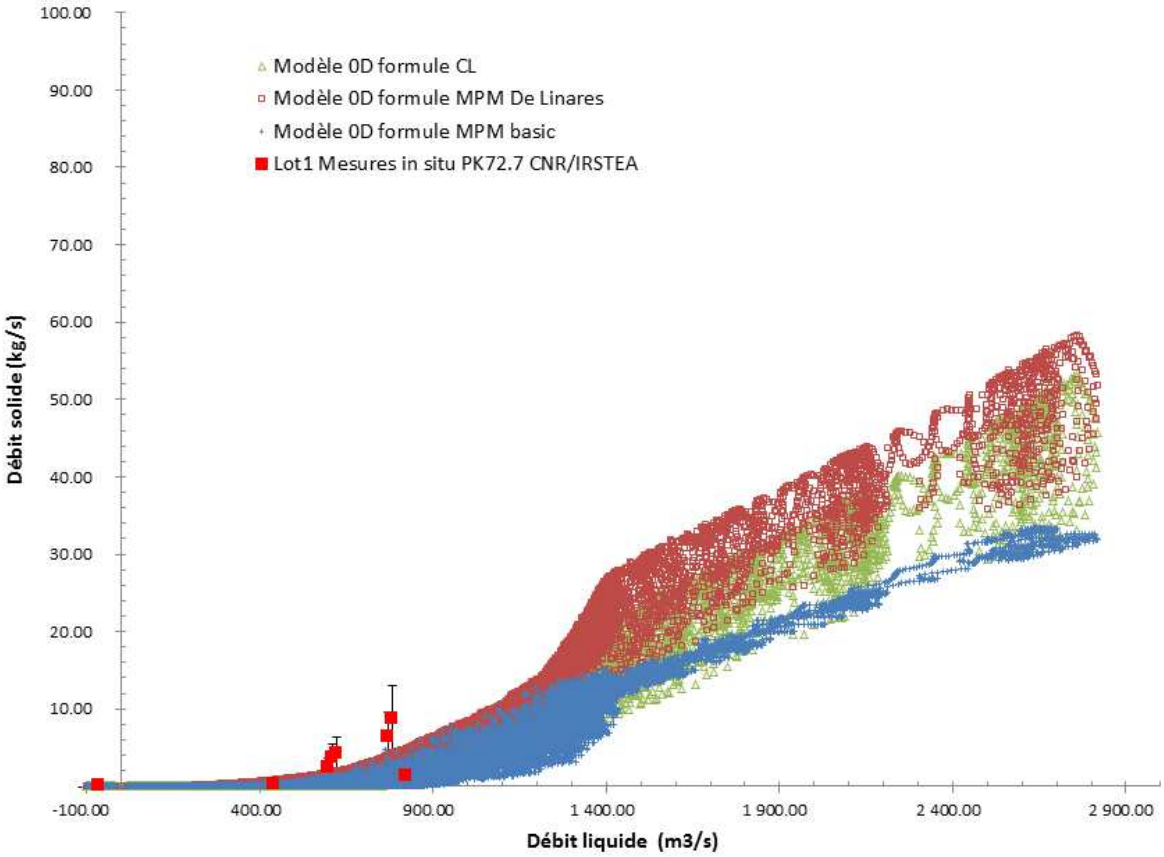



**Figure 30 : Courbes de tarage sédimentaire et sensibilité à la formulation**

Nous avons aussi estimé le flux solide moyen annuel par suspension en supposant deux classes de sédiments comme pour le paragraphe 40, soit 30% avec $d_a = 0.6$mm et 70% avec $d_b = 1.6$mm. Selon le modèle proposé, le flux solide par suspension resterait donc négligeable.

| **Formules** | **Débit solide moyen annuel avec prise en compte de la marée [t]** | **Débit solide moyen annuel sans prise en compte de la marée [t]** |
|---|---|---|
| CL charriage distrib | 80 000 | 61 000 |
| MPM section | 78 000 | 60 000 |
| MPM (Artelia) distrib | 112 000 | 90 000 |
| CL suspension distrib | 3 500 | 2 700 |

**Tableau 9 : Débits solide moyens annuels estimés pour différentes formules de capacité à partir des résultats de modélisation hydraulique 1D sur la période de 2009 à 2013**

# 6. RÉFÉRENCES

Camenen, B., Bayram, A. & Larson, M. (2006). Equivalent roughness height for plane bed under steady flow, Journal of Hydraulic Engineering, 132, 1146-1158

Camenen, B., Dramais, G., Le Coz, J., Ho, T.-D., Gratiot, N. & Piney S. (2017) Estimation d'une courbe de tarage hauteur-dénivelée-débit pour une rivière influencée par la marée, conférence SHF Hydrométrie 2017, Lyon, soumis à la Houille Blanche.

Camenen B., Grabowski, R.C., Latapie, A., Paquier A., Solari, L. & Rodrigues, S. (2015). On the estimation of the bed-material transport and budget along a river segment: application to the Middle Loire River, France. Aquatic Sciences. 78:71-81.

Camenen, B., Holubová, K., Lukac, M., Le Coz, J. & Paquier, A. (2011). Assessment of methods used in 1D models for computing bed-load transport in a large river: the Danube River in Slovakia, Journal of Hydraulic Engineering, 137, 1190-1199

Camenen, B. & Larson, M. (2005). A bedload sediment transport formula for the nearshore Estuarine, Coastal & Shelf Science, 63: 249-260.

Camenen, B. & Larson, M. (2008). A General Formula for Noncohesive Suspended Sediment Transport, J. Coastal Res., 24: 615-627.

Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Peteuil, C., Fretaud, T., Falgon, A., Dussouillez, P., Moore, S. A. (2014). A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River. Proc. River Flow conference, Lausanne, Switzerland, 8p.

Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J.-G., Macaire, J.-J. & Jugé, P. (2012). Estimating bedload transport in a large sand-gravel bed river from direct sampling, dune tracking and empirical formulas Geomorphology, 179, 40-57

de Linares, M. (2007). Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc Joseph Fourier University, Grenoble 1.

Engelund, F. & Hansen, E. (1972). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams Technical Press.

Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport Proc. 2nd IAHR Congress, 39-64.

van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport 110, part II: suspended load transport, part III: bed forms and alluvial roughness, Journal of Hydraulic Division, ASCE, 110, 1431-1456/1613-1641/1733-1754.

van Rijn, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

Yalin, M. S. (1977). Mechanics of Sediment Transport. Pergamon Press.

# 7. ANNEXES