

**Rapport de stage pour l'obtention  
de la 1<sup>ère</sup> année de Master**

**Quantification et qualification du transport  
solide lors d'une décrue en Loire moyenne à  
Bréhémont**



**Olivier Guillemet**  
Août, 2010

Maître de stage : Nicolas Claude  
Université François Rabelais - TOURS, CNRS/INSU,  
Université d'Orléans - Laboratoire ISTO

## Remerciements

Ce stage a permis de compléter ma formation sur le transport solide et certains paramètres hydrauliques d'un point de vue théorique mais surtout d'un point de vue pratique. La vision globale d'un travail de recherche ou d'étude, allant de la phase de terrain jusqu'au travail de réflexion pour expliquer les résultats obtenus et tenter de trouver les paramètres en régissant les caractéristiques a été très enrichissante, aussi bien dans une optique professionnelle que personnelle.

Je tiens ainsi à remercier mon maître de stage Nicolas Claude de m'avoir permis de travailler avec une partie des données de sa thèse dont l'objectif est l'étude de la dynamique hydrosédimentaire des bifurcations de chenaux dans un environnement fluvial en cours d'incision en la Loire moyenne. Ses connaissances du terrain, ses compétences en transport solide ainsi que sa disponibilité m'ont permis de mener à bien le présent travail dans des conditions optimales. De même, je tiens à remercier son maître de thèse Stéphane Rodrigues pour les compléments d'informations qu'il a pu me donner aussi bien sur la dynamique sédimentaire que sur le site d'étude de Bréhémont (37) qu'il assimile régulièrement au phare de l'occident.

Par ailleurs, je tiens également à associer à ces remerciements l'ensemble du personnel du laboratoire ISTO de l'université François Rabelais de Tours pour la mise à disposition du matériel nécessaire au traitement granulométrique, ainsi que pour sa gentillesse et sa bonne humeur.

Enfin, ma dernière pensée ira aux autres stagiaires présents avec moi durant ce stage qui m'ont permis d'avoir aussi bien des moments de détente que des moments de partage des connaissances lorsque cela était nécessaire.

# Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	<b>1</b>
<b>Résumé/Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Site d'étude.....</b>	<b>5</b>
1.1. Présentation du contexte global : la Loire .....	5
1.2. Présentation du contexte local : Bréhémont .....	6
<b>2. Matériels et méthodes .....</b>	<b>8</b>
2.1. Campagnes d'acquisition des données de terrain, matériels et protocoles.....	8
2.1.1. <i>Mesures de transport solide</i> .....	9
2.1.2. <i>Mesures hydrométriques</i> .....	11
2.1.3. <i>Bathymétrie</i> .....	11
2.2. Traitement des données de terrain.....	11
2.2.1. <i>Mesure du transport solide</i> .....	11
2.2.1.1. Calcul du transport solide via le BTMA .....	12
2.2.1.2. Calcul du transport solide via la bouteille de Delft .....	13
2.2.2. <i>Mesure des débits liquides</i> .....	13
2.2.3. <i>Bathymétrie</i> .....	14
2.2.4. <i>Analyse granulométrique</i> .....	14
2.3. Caractérisation du transport solide.....	14
2.3.1. <i>Détermination des puissances spécifiques</i> .....	14
2.3.2. <i>Détermination des vitesses de cisaillement et forces tractrices</i> .....	15
2.3.3. <i>Détermination des forces tractrices critiques</i> .....	16
<b>3. Résultats .....</b>	<b>16</b>
3.1. Bathymétrie .....	16
3.1.1. <i>Profils transversaux (PT83)</i> .....	16
3.1.2. <i>Profils longitudinaux (PL502)</i> .....	19
3.2. Hydrométrie .....	20
3.2.1. <i>Débits liquides unitaires</i> .....	20
3.2.2. <i>Débits liquides totaux</i> .....	21
3.3. Transport solide.....	22
3.3.1. <i>Débits solides unitaires</i> .....	22
3.3.2. <i>Débits solides totaux</i> .....	24
3.4. Granulométrie.....	25
3.4.1. <i>Distribution granulométrique</i> .....	25
3.4.2. <i>Tri granulométrique</i> .....	26
3.5. Puissances spécifiques.....	27
3.6. Vitesses de cisaillement, forces tractrices et forces tractrices critiques .....	27
<b>4. Discussion .....</b>	<b>30</b>
4.1. Caractérisation du transport solide : les débits unitaires .....	30
4.2. Caractérisation du transport solide : les flux .....	31
<b>Conclusion.....</b>	<b>33</b>

<b>Bibliographie.....</b>	<b>34</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>36</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>36</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>37</b>

## Résumé

La mise en place d'ouvrages sur les cours d'eau afin de réduire la section d'écoulement et conserver entre autre un niveau d'eau suffisant pour la navigation a peu à peu conduit à une incision du lit et à l'abandon de nombreux chenaux secondaires. Ce contrôle du débit liquide pose de nombreuses questions quant à la capacité du cours d'eau à véhiculer correctement ses sédiments. Deux campagnes de jaugeages des débits liquides, solides et de bathymétrie ont ainsi été effectuées en Loire moyenne à Bréhémont (37) afin de caractériser quantitativement et qualitativement le transport sédimentaire par charriage et par suspension graduée. Il a été observé un transport permanent des sédiments avec, pour les débits liquides les plus élevés, l'existence du charriage ainsi que d'une saltation relativement importante. Pour les bas débits le charriage est pratiquement l'unique source de transport solide. La morphologie caractéristique de la zone d'étude avec un talweg central entouré de deux barres sédimentaires concentre la majorité du flux solide dans la partie centrale du chenal notamment en fin de décrue comme l'a montré la seconde campagne. L'existence et les variations du transport par suspension graduée résident d'après les comparaisons d'hydrométrie, de force tractrice et de bathymétrie dans les variations des débits liquides. Pour le charriage, il s'agit d'une association complexe de ces paramètres avec notamment la mise en évidence de l'importance des formes du lit. Contrairement au flux liquide qui augmente d'amont en aval dans un cours d'eau naturel, la dynamique sédimentaire est liée à des processus très locaux. Il semble donc indispensable de mener des campagnes de mesures de ce genre pour en comprendre le fonctionnement et ainsi proposer des solutions aux problèmes de gestion des cours d'eau.

**Mots clés :** *transport solide, charriage, suspension graduée, débit liquide, décrue, Loire moyenne, Bréhémont.*

## Abstract

The implementation of hydraulic works on rivers to concentrate the flows and get sufficient water levels for navigation has progressively led to incision of the bed and the disconnection of many secondary channels. This control of liquid flow asks many questions about the ability of the river to transport adequately its sediments. Two campaigns of gauging of the water and sediment fluxes have been carried out in the middle reach of the Loire river near Bréhémont (37) to characterize quantitatively and qualitatively the bed load and suspended load transport. A bathymetry survey has been also made during these campaigns. It has been observed a constant sediment transport, with for high flows, the existence of a bed load and a relatively important suspended load. For the low flow, the bed load is almost the only source of sediment transport. The characteristic of the morphology of the study zone with a central thalweg surrounded by two sedimentary bars concentrates the majority of sediment transport in the central part of the channel notably at the end of the falling discharge of flood, as was shown the second campaign. The existence and changes of suspended load consist by hydrometry, bathymetry and shear stress comparisons in a variation of liquid flow. For the bed load, there is a complex association between these parameters but bed forms are essential to this transport. Contrary to the liquid flow which increases from upstream to downstream in a natural stream, the sediment dynamics is linked to very local processes. So, it seems necessary to conduct many campaigns of measures to understand the functioning of sediment transport and to suggest solutions to the morphological and river problems.

**Keywords :** *sediment transport, bed load, suspended load, liquid flow, middle Loire, Bréhémont.*

## Introduction

La gestion des cours d'eau depuis l'antiquité avec les premières notions d'appropriation et d'utilisation jusqu'à nos jours avec une maîtrise de leur cheminement dans l'espace et de l'hydraulique a fortement évolué. L'amélioration des connaissances et des outils techniques a permis peu à peu de comprendre les mécanismes régissant la vie d'une rivière et également d'anticiper sur son devenir notamment en terme de variation de niveau d'eau. Cet élément a longtemps été problématique puisque les crues étaient au cœur du quotidien des hommes et causaient des catastrophes aussi bien humaines que matérielles. A l'opposé, les étiages durant la période estivale étaient également préoccupants pour le partage de cette ressource quels qu'en soient les usages.

Néanmoins, une partie de la composante des cours d'eau et non des moindres est encore mal connue : le transport des particules solides.

La compréhension du transit des sédiments de l'amont vers l'aval d'un cours d'eau est un domaine récent de l'étude des rivières et il concorde entre autre avec des phénomènes morphologiques majeurs (incision du lit, abandon des chenaux secondaires...) ayant conduits dans certaines zones à de fortes dégradations d'ouvrages.

Ceci est fortement visible sur la Loire dont l'un des exemples marquant de l'impact du transport sédimentaire est l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978. L'incision progressive du lit a peu à peu mis à nu la base de certaines piles du pont, ce qui, allié à l'affouillement, a entraîné une usure prématurée de l'ouvrage jusqu'à ce qu'il cède sous la puissance du fleuve.

En accord avec la dynamique actuelle d'acquisition de données pour comprendre les mécanismes de transport et de dépôt sédimentaire, le rapport suivant a pour objectifs de quantifier et qualifier le transport solide sur un site de la Loire moyenne (Bréhémont, 37) lors d'une phase de décrue.

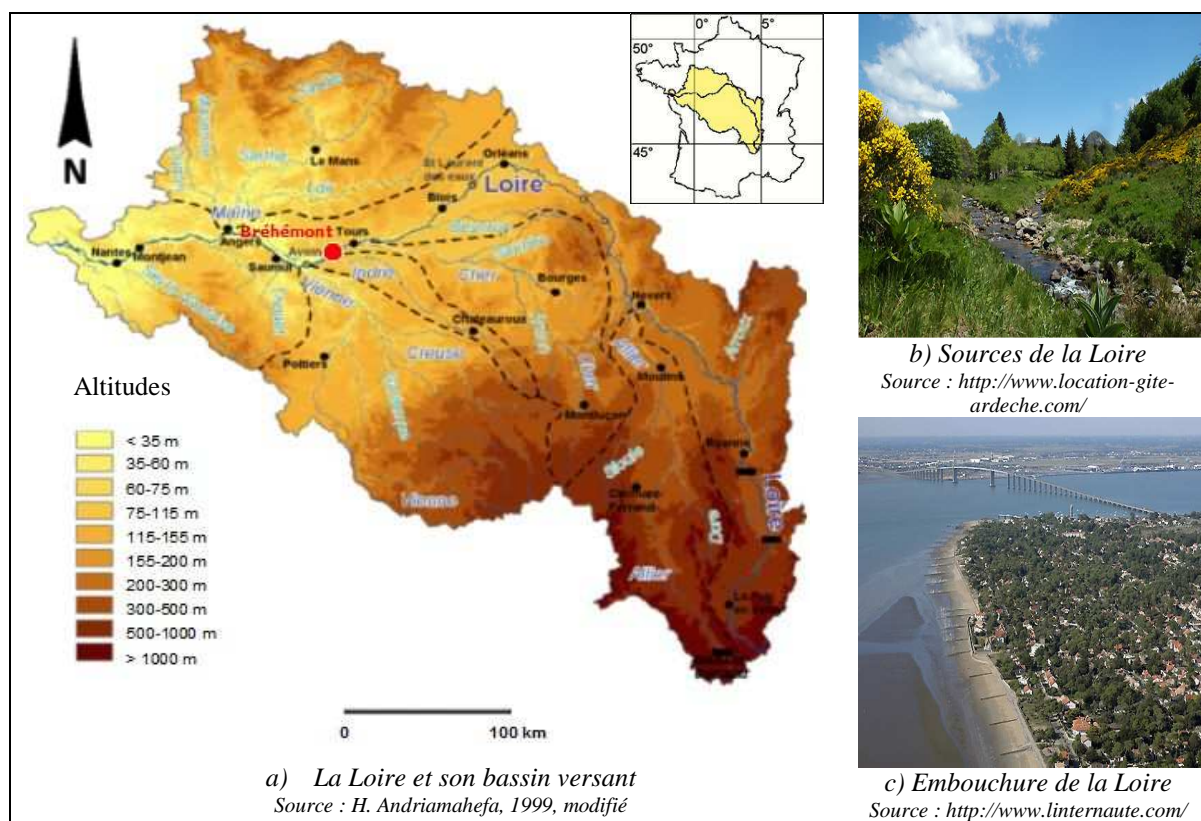
Dans un premier temps, les caractéristiques du site d'étude seront présentées en allant de l'échelle du bassin versant de la Loire à l'échelle locale de Bréhémont. Ensuite, les différentes méthodes d'échantillonnage de terrain et d'analyse en laboratoire seront détaillées ainsi que les méthodes de traitements des données. Ceci conduira à la présentation des différents résultats obtenus à partir de ces informations et à une interprétation de ceux-ci afin de pouvoir conclure sur le sujet.

# 1. Site d'étude

## 1.1. Présentation du contexte global : la Loire

La Loire, de sa source au Mont Gerbier de Jonc en Ardèche (Figure 1.b) à son embouchure à Saint-Nazaire en Loire-Atlantique (Figure 1.c) parcourt 1013 km sur un socle tout d'abord d'origines magmatiques et métamorphiques dans le Massif Central avant de rejoindre en remontant vers le nord des formations sédimentaires. Dans sa partie aval (après Angers), elle retrouve des formations magmatiques et métamorphiques, vestiges du massif Armoricaïn.

De part sa longueur, il s'agit du plus long fleuve s'écoulant en France et son bassin versant de 117 000 km<sup>2</sup> (Figure 1.a) représente environ 1/5<sup>ème</sup> du territoire.



**Figure 1 : La Loire d'amont en aval**

En plus de ses caractéristiques géographiques conséquentes, la Loire est également un fleuve majeur de part son histoire avec son utilisation comme axe de communication durant le XVIII<sup>ème</sup> et le XIX<sup>ème</sup> siècle principalement et le développement de la navigation. Ceci a conduit à la création de divers ouvrages ayant pour objectif la création d'un chenal navigable pérenne. Des levées ont également été dressées le long d'une grande partie de son cours afin de limiter l'impact de la montée des eaux. En effet, la Loire possède de forte fluctuation de débit entre les périodes de basses et de hautes eaux et de nombreuses crues ont causé de gros dommages notamment dans le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle avec les crues de 1846, 1856 et 1866. Malgré les interventions de l'homme pour contrer les variations de débit du cours d'eau, celui-ci demeure l'un des derniers fleuves sauvages d'Europe. Ceci se retrouve d'un point de vue biologique avec la présence de nombreuses espèces protégées dans ou à proximité de la Loire mais également d'un point de vue physique avec une dynamique sédimentaire importante et une mobilité latérale du fleuve restreinte mais possible entre les levées.

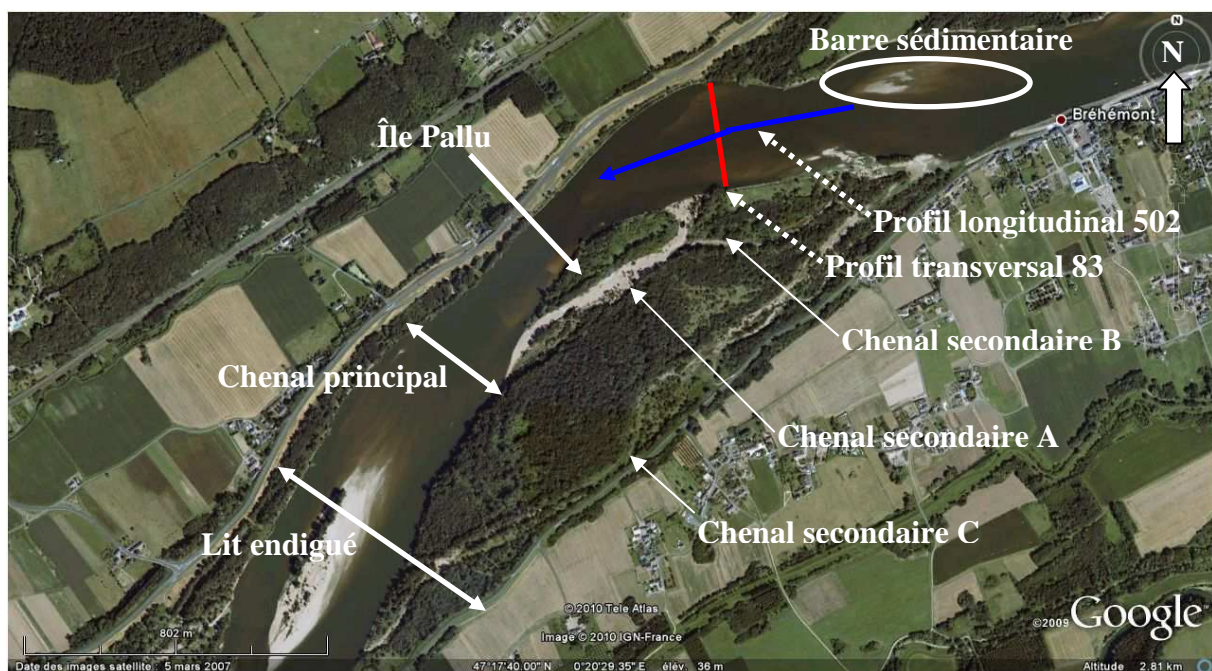


## 1.2. Présentation du contexte local : Bréhémont

La zone d'étude se situe en Loire moyenne (de Nevers à Montjean-sur-Loire proche d'Angers) dans le département d'Indre-et-Loire (37) à environ 30 km en aval de la ville de Tours sur la commune de Bréhémont (Figure 1.a). Placé entre les confluences avec le Cher (11 km en amont) et avec l'Indre (18 km en aval), ce site est à 5 km en aval de la station hydrométrique de Langeais.

Dans cette partie, la Loire s'écoule sur des dépôts calcaires du Crétacé datant d'environ 80 millions d'années (craies du Turonien et du Sénonien) recouvert par des formations détritiques plus récentes (1,5 à 55 Ma) de l'Eocène, du Miocène et du Pliocène.

Morphologiquement, elle présente un style en anabranches caractérisé par une déviation du chenal principal vers la droite du lit endigué et la présence de trois chenaux secondaires séparés par des îles végétalisées sur la gauche du lit (Gautier *et al*, 2007) comme il est possible de le voir sur la figure 2.



**Figure 2 : Site d'étude. Sur cette figure sont visibles les deux transects (PT83 et PL502) où ont été réalisées les différentes mesures et prélèvements qui serviront dans la suite de ce rapport.**

Cette configuration morphologique se retrouve sur de nombreux tronçons de la Loire moyenne avec très souvent des unités morphologiques caractéristiques bien différenciées qui ont souvent été décrites dans la littérature.

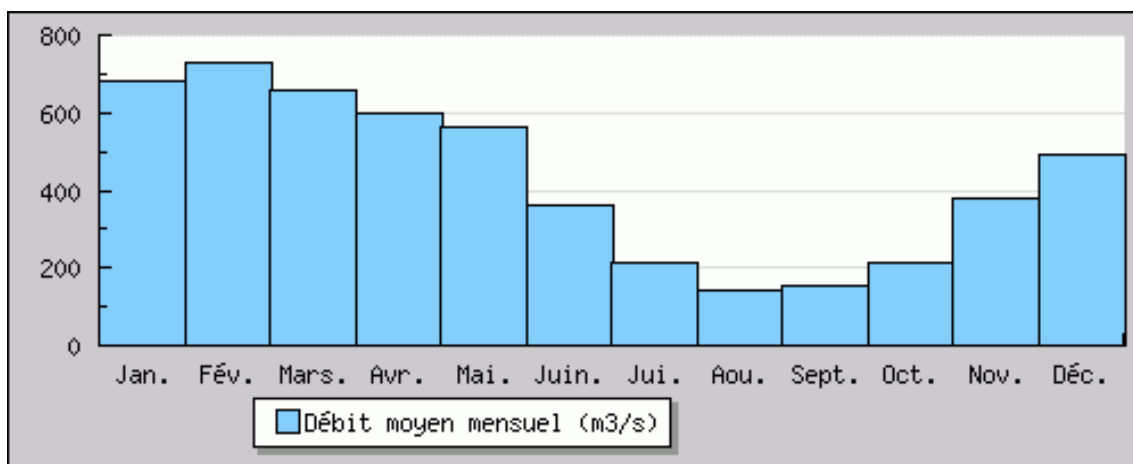
Ainsi, d'après Bacchi (2000) et repris par Rodrigues (2004), il est possible de distinguer sur la figure 2 un chenal principal oscillant de 175 à 300 m de large à l'intérieur duquel se retrouvent des barres sédimentaires ainsi que des îles à végétation plus ou moins dense. Comme il a été noté précédemment, ce site possède en connexion au chenal principal un réseau de chenaux secondaires bien dessiné qui est alimenté uniquement en période de hautes eaux et à des niveaux différents selon le chenal étudié.

Ces différents éléments sont inscrits dans un lit endigué (lutte contre les crues) d'une largeur de 700 m qui s'inscrit lui-même à l'intérieur d'un lit majeur ici évalué à 3300 m et délimité par les versants et/ou les terrasses alluviales.

D'un point de vue hydrologique, les fluctuations de débits observables ici sont similaires à celles de l'ensemble du système ligérien avec une période de hautes eaux l'hiver et une



période de basses eaux l'été comme le montre la figure 3 issue des données récoltées par la station hydrométrique de Langeais sur 26 années. Le débit moyen est de 430 m<sup>3</sup>/s avec un maximum en février de 729 m<sup>3</sup>/s et un minimum en août de 140 m<sup>3</sup>/s.



**Figure 3 : Hydrogramme de la Loire à Langeais**

Source : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

Néanmoins, selon les années ces valeurs peuvent être fortement modifiées en relation à des conditions météorologiques particulières : fortes périodes de sécheresse, précipitations conséquentes sur plusieurs jours ou encore les pluies cévenoles. Ces écarts par rapport à la moyenne sont indiqués dans le tableau suivant montrant la fréquence de retour de ces débits caractéristiques.

**Tableau 1 : Débits caractéristiques déterminés à Langeais**

	Basses eaux	Crues
Fréquence	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Débit (m <sup>3</sup> /s)
Biennale	93	2000
Quinquennale	71	2600
Décennale	-	3000
Vicennale	-	3400

*A noter que lors des trois grandes crues du XIX<sup>ème</sup> siècle (1846, 1856, 1866) le débit a approché un maximum de 7 200 m<sup>3</sup>/s en Loire moyenne (Gien) ce qui relève du caractère exceptionnel de ces évènements qui pourtant se sont produits avec un intervalle de 10 ans à chaque fois.*

D'après les données fournies par cette station, le débit à plein bord qui correspond pour des rivières coulant sur des terrains perméables au débit d'une crue biennale (Roberts, 1989 in Bravard, 1997) et qui permet la mise en mouvement de la charge de fond ainsi que des changements géomorphologiques majeurs en lit mineur (Léopold *et al.*, 1964 ; Dury, 1969 in Bravard 1997) est ici de 2000 m<sup>3</sup>/s. Cette valeur pourra servir de référence pour vérifier si effectivement cette notion de débit à plein bord coïncide avec une mise en mouvement des sédiments du lit.

## 2. Matériels et méthodes

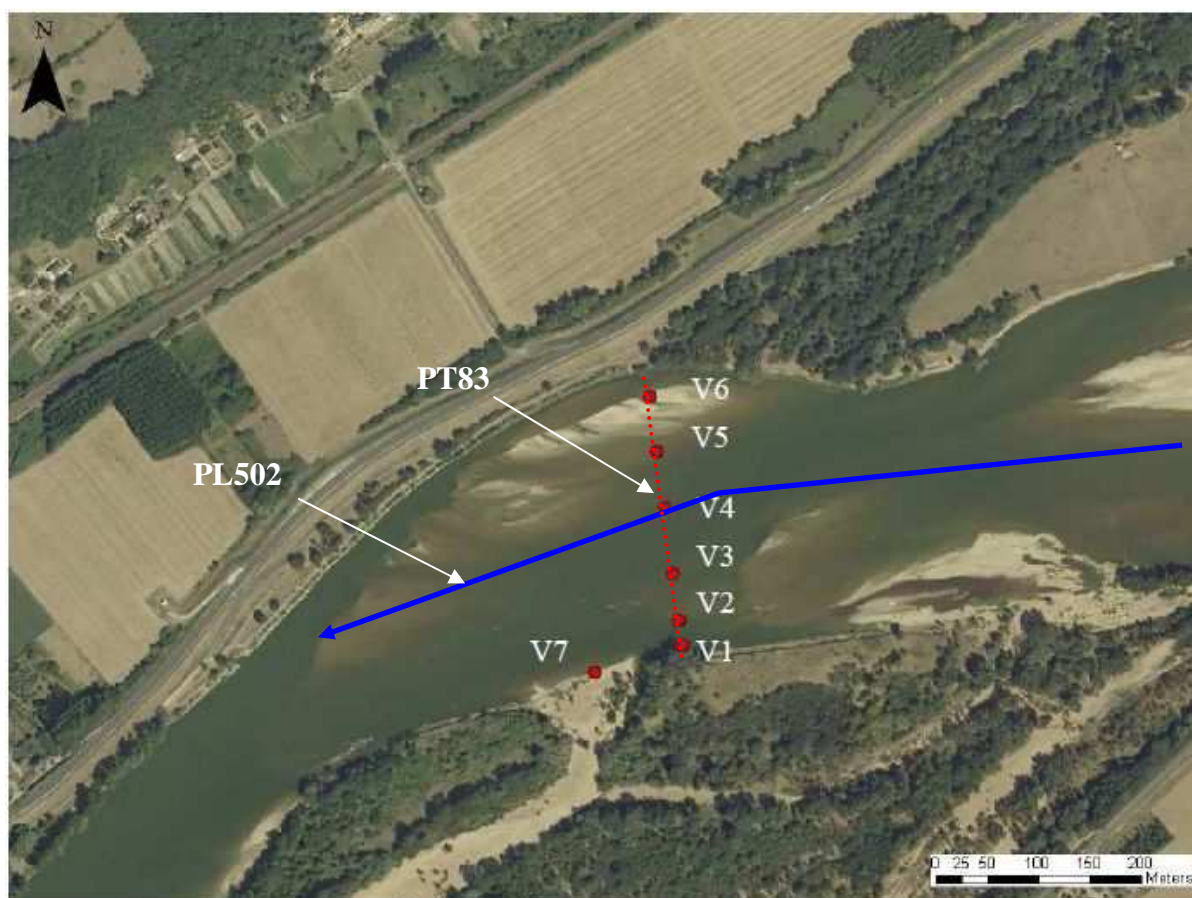
### 2.1. Campagnes d'acquisition des données de terrain, matériels et protocoles

Deux campagnes de terrain ont été réalisées pour effectuer des jaugeages des débits solide et liquide afin de caractériser la dynamique sédimentaire du site de Bréhémont. La première a eu lieu du 15 au 17 décembre 2009 et la seconde du 9 au 19 mars 2010 avec une interruption de 4 jours du 12 au 15 mars. Toutes ces mesures ont été accompagnées d'un suivi bathymétrique et de mesures de débits par ADCP.

La campagne de décembre avait pour objectif de valider les protocoles d'acquisition des données de terrains qui seront décrits dans cette partie. De plus, elle s'est accompagnée d'une faible hydrologie qui est restée stable durant toute cette période, c'est pourquoi dans la suite du rapport certains éléments ne seront traités que pour le mois de mars.

Sur le terrain, un profil transversal (PT 83, Figure 2) sur lequel 6 verticales ont été placées (Figure 4) a été choisi afin de réaliser les différentes mesures de quantification du débit solide ainsi que du débit liquide. La verticale 7 était initialement comprise dans le protocole mais le chenal secondaire (A) n'étant pas en eau durant les campagnes, celle-ci n'a pu être utilisée. L'objectif était de confronter les mesures avec ce chenal exondé puis inondé ou l'inverse.

Différents profils longitudinaux ont été réalisés mais seul le profil PL502 présenté sur la figure 2 et passant au niveau de la verticale 4 sera retenu dans cette étude et permettra donc des analyses combinées.

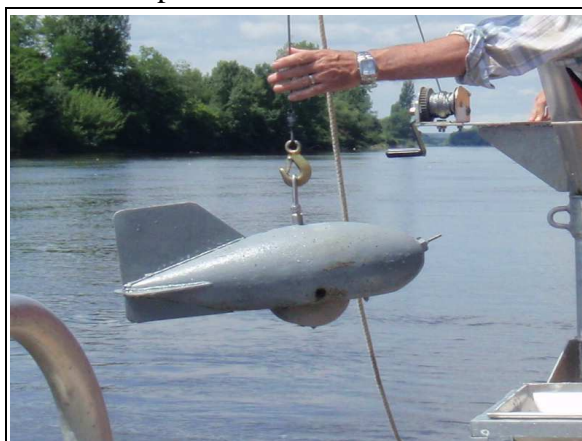


**Figure 4 : Vue aérienne (2005) du site d'échantillonnage. Le profil longitudinal 502 passe au niveau de la verticale 4 dans la partie centrale du chenal.**

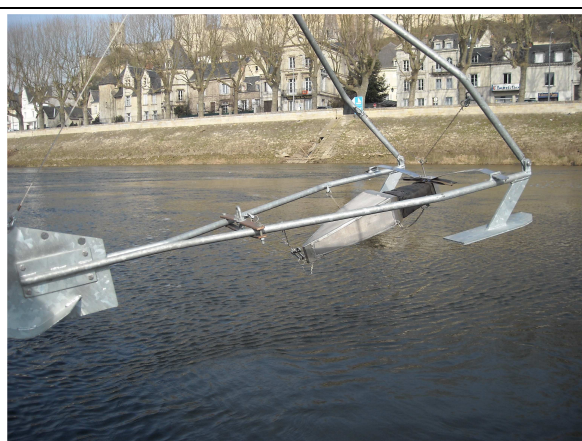
*Source : Benoît Deleplancque, 2010, modifié*

### 2.1.1. Mesures de transport solide

Afin de caractériser d'un point de vue quantitatif le transport sédimentaire au niveau de PT83, un jaugeage solide qui s'apparente à celui d'un jaugeage liquide (les deux détaillés dans la partie méthode de traitement des données) a été réalisé. Différents échantillonneurs isocinétiques (ne perturbant ni l'écoulement ni le transport des sédiments) visibles sur la figure 5 ont été utilisés afin d'analyser à la fois le charriage s'opérant à la surface du lit, le transport gradué qui correspond à des successions de dépôt sur le fond et de suspension des particules et enfin le transport par suspension qui s'opère à l'intérieur même de toute la masse d'eau. Seuls les deux premiers types de transport seront étudiés par la suite. En effet, la suspension a été qualifiée de négligeable sur le terrain et sur ce cours d'eau elle est surtout beaucoup moins morphogène que le reste du transport. L'appareil de mesure des matières en suspension sera néanmoins présenté.



a) US BM-54



b) BTMA



c) Bouteille de Delft



d) Bouteille Niskin

**Figure 5 : Echantillonneurs du transport solide**

Source : Nicolas Claude

Le premier échantillonneur (figure 5.a) est un **US BM-54** (United State Bedload Material). Cet appareil est composé d'une mâchoire sur sa partie ventrale qui une fois posée sur le fond du cours d'eau va se refermer par relâchement de la tension du câble et permettre ainsi le prélèvement des sédiments du lit sur 10 cm de profondeur. Pour rester dans le sens du courant, l'appareil est muni d'un aileron et le système de clapet empêche le lessivage à la remontée.

Les prélèvements vont permettre une étude granulométrique des particules présentes au niveau du plancher alluvial superficiel de chaque verticale et pour compenser un éventuel dysfonctionnement de l'appareil, deux mesures ont été effectuées à chacun des points du transect.

*Problèmes possibles : il est possible que la mâchoire se referme précipitamment et ne prélève pas les 10 cm de sédiments théoriques.*

Le second échantillonneur (figure 5.b) est le **BTMA** (Bed Load Transport Meter Arnhem). Il s'agit d'un appareil qui repose sur le lit et qui permet de piéger les particules supérieures à 300  $\mu\text{m}$  à l'intérieur d'une nasse à ouverture rectangulaire de 8,5 cm de large et 5 cm de hauteur.

Les prélèvements vont ici permettre de quantifier le transport sédimentaire par charriage.

Suivant le protocole décrit par Boiten (2003), dix mesures de 2 minutes devaient être effectuées sur chacune des verticales. Ceci a légèrement été modifié en raison des faibles taux de transport constatés et il a été choisi de réaliser sept mesures de 4 minutes afin d'avoir un volume prélevé plus important. Le passage de dix à sept mesures est quant à lui dû à un problème de temps. L'incertitude de mesure est ici évaluée à environ 30 %.

*Problèmes possibles : la progradation de sédiments peu obstruer l'ouverture du BTMA et perturber la suite de la mesure ; positionnement aléatoire sur les formes du lit ; orientation dans le sens du courant mais pas forcément dans celui du charriage.*

L'échantillonneur suivant (Figure 5.c) est la **bouteille de Delft**. Sa forme de bouteille est devancée par un bec à deux tailles possibles d'orifice (1,9  $\text{cm}^2$  ou 3,8  $\text{cm}^2$ ) pour deux formes différentes, droite et coudée. Dans le cas présent la plus grande des ouvertures des becs coudés a été privilégiée afin de récolter des volumes suffisants de sédiments.

Cette bouteille permet de piéger les particules supérieures à 50  $\mu\text{m}$  de diamètre avec néanmoins des pertes dans la fraction allant de 50  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ .

Les prélèvements vont permettre de caractériser le transport solide par saltation.

Toujours suivant le protocole décrit par Boiten (2003), une nouvelle fois modifié pour le temps d'intégration en raison des faibles taux de transport, deux mesures de 6 min ont été effectuées à 10 cm, 20 cm et 30 cm du fond sur chaque verticale. Ceci vient juste au-dessus des 5 cm d'échantillonnage du BTMA.

*Problèmes possibles : plus la mesure sera effectuée proche du fond plus il y aura de risques de récupérer des fractions charriées s'il y a avancé d'une dune et positionnement de l'appareil en aval de cette dernière.*

Le dernier échantillonneur du transport solide (Figure 5.d) est la **bouteille Niskin**. Elle possède deux ouvertures aux bases d'un cylindre et permet de faire des prélèvements d'eau à des hauteurs choisies selon le niveau d'eau. L'envoi d'un témoin permet de refermer la bouteille à ses deux extrémités une fois que la hauteur désirée est stabilisée.

Exemple : pour une hauteur de 2 m, il a été effectué une mesure à 50 cm du fond, une à 1 m, une à 1,5 m et une proche de la surface.

L'opération a été répétée sur chaque verticale et permet de caractériser le transport des matières en suspension. Comme il a été indiqué précédemment, les prélèvements obtenus par cette méthode ne seront pas traités dans ce rapport mais cet outil associé à l'USBM, au BTMA et à la bouteille de Delft permet d'étudier le transport solide sur l'ensemble de la colonne d'eau.

### **2.1.2. Mesures hydrométriques**

Afin d'avoir un aperçu global sur le fonctionnement de la Loire à Bréhémont des mesures hydrométriques ont été réalisées. L'objectif était d'obtenir des vitesses de courant pour calculer le débit liquide. Elles permettront d'expliquer les résultats du transport solide entre autre par les vitesses de cisaillement et la notion de force tractrice qui seront détaillées dans la suite de ce rapport.

L'appareil de mesure, est un moulinet associé à un saumon qui permet par rotation de son hélice de quantifier la vitesse du courant en nombre de tours par seconde.

La méthode de terrain est basée sur celle d'exploration du champ des vitesses qui impose des mesures de vitesses de courant à différentes hauteurs de la colonne d'eau au sein de laquelle la répartition des vitesses est non uniforme. Il a ainsi été effectué des mesures à la profondeur maximale (font + 0,18 m'), à 0,2.Pmax, 0,4.Pmax, 0,6.Pmax, 0,8.Pmax ainsi qu'à la surface sur chacune des verticales. (Protocole et schéma explicatif en Annexe 1).

Pour chacune des profondeurs, six mesures (de 30 secondes) ont été effectuées afin d'avoir une bonne représentativité des vitesses du courant. Dans Boiten (2003), il était conseillé selon cette méthode fréquemment utilisée une seule mesure avec un temps minimum d'intégration de 1 minute.

### **2.1.3. Bathymétrie**

A partir de sondeurs mono et multifaisceaux, les relevés bathymétriques de la zone de Bréhémont ont pu être réalisés. Le principe de ces appareils est basé sur l'émission et la réception d'ondes sonores. En pratique, une onde est envoyée à travers un ou plusieurs faisceaux et l'appareil récupère la réflexion de cette onde après un temps donné. En connaissant la vitesse de propagation de l'onde ainsi que le temps de retour du ou des faisceaux, l'appareil permet d'obtenir directement la profondeur de la zone traitée ainsi qu'une cartographie du relief.

## **2.2. Traitement des données de terrain**

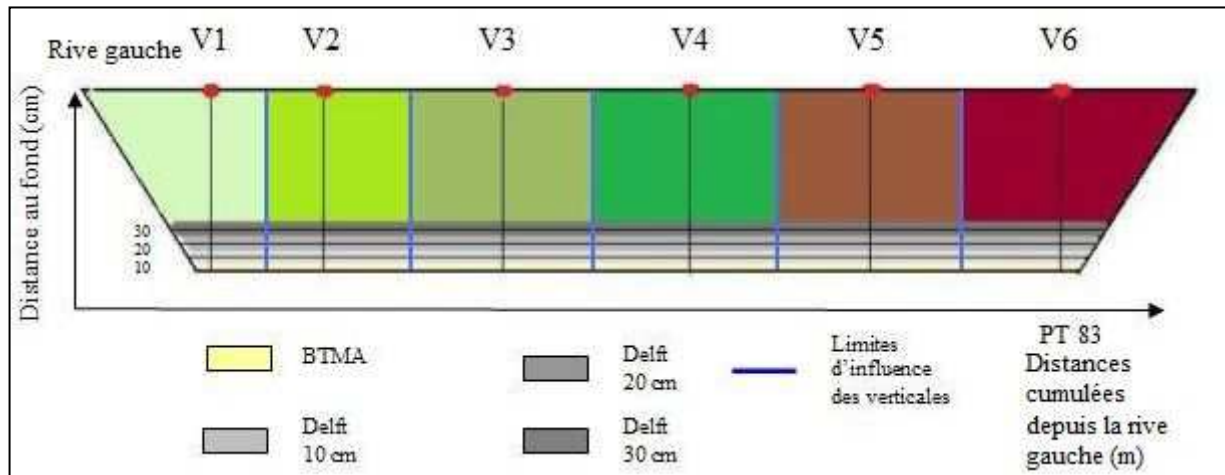
*Ce traitement a été effectué au laboratoire ISTO de l'UFR Sciences et Techniques de l'Université François Rabelais de Tours durant la période du stage.*

### **2.2.1. Mesure du transport solide**

Afin de déterminer un flux solide sur le profil transversal 83, un débit unitaire va tout d'abord être calculé sur chacune des verticales à partir des échantillons récupérés et par la suite ces résultats pourront être étendus à l'ensemble de la section selon le modèle visible sur la figure 6.

Sur cette figure sont visibles la zone des 5 cm de prélèvement du BTMA, ainsi que les trois hauteurs de prélèvement à la bouteille de Delft à 10, 20 et 30 cm du fond comme il a été indiqué dans le protocole présenté précédemment. Elles seront d'après ce modèle représentatives du transport par incrément de 10 cm, de 5 à 35 cm du fond comme le montre le dégradé de gris de la figure 6.





**Figure 6 : Zones d'influences des prélèvements par BTMA et Delft sur chacune des verticales du profil PT83**

Les débits unitaires seront ensuite associés à la zone d'influence I de chaque verticale qui se caractérise de la façon suivante selon cette figure :

$$I = ((n-(n-1))/2) + ((n+1)-n)/2 \quad (1)$$

*n* est la verticale choisie et sa distance à la rive gauche en mètre, (*n-1*) la verticale précédente et (*n+1*) la suivante.

Pour les verticales près des berges on considèrera la distance de la verticale à la berge à la place de (*n-(n-1)*)/2 pour V1 et ((*n+1*)-*n*)/2 pour V6. Les pentes étant faibles, on considèrera toujours une section transversale rectangulaire.

#### 2.2.1.1. Calcul du transport solide via le BTMA

Il s'effectue à partir de la formule décrite par Boiten (2003) qui permet de calculer le débit solide unitaire  $T_i$  ( $m^3/24h/m$ ) par prélèvement sur chaque verticale :

$$\text{BTMA } T_i = (\alpha \cdot V \cdot f) / b \quad (2)$$

$\alpha$  : coefficient de captage des particules ( $\alpha=2$ ) sans inclure de potentielles pertes de 60 à 300 $\mu m$

$V$  = prélèvement en  $cm^3/2 \text{ min}$

$f$  = facteur de conversion des  $cm^3/2 \text{ min}$  en  $m^3/24h$  ( $f=720 \cdot 10^{-6}$ )

$b$  = largeur d'entrée de la nasse du BTMA ( $b=0,085 \text{ m}$ )

D'après ces paramètres, cette formule peut être réduite à **BTMA  $T_i = 0,017 \cdot V$**  (3)

Sept mesures ayant été effectuées sur chaque verticale, la moyenne de celles-ci sera considérée pour déterminer le débit solide unitaire final de cette verticale à partir de ce mode de prélèvement.

Une fois calculé, ce débit sera multiplié par l'équation (1) correspondant à cette verticale pour obtenir cette fois-ci le débit solide journalier sur la zone d'influence de la verticale. L'addition des six zones d'influences donnera le débit solide total journalier par charriage sur la section.



#### 2.2.1.2. Calcul du transport solide via la bouteille de Delft

Il s'effectue une nouvelle fois à partir d'une formule décrite par Boiten (2003) qui permet de calculer le débit solide unitaire  $T_i$  ( $m^3/24h/m$ ) par prélèvement sur chaque verticale :

$$\text{Delft } T_i = V/(a.t) \cdot 0,144 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V &= \text{volume prélevé (cm}^3\text{)} \\ a &= \text{aire du nez de la bouteille, ici } 3,8 \text{ cm}^2 \\ t &= \text{le temps d'intégration (min)} \\ 0,144 &= \text{facteur de conversion} \end{aligned}$$

Deux mesures ayant été effectuées à chaque hauteur, la moyenne entre les deux multipliée par la hauteur de l'incrément (ici 10 cm) permettra d'acquérir le débit unitaire journalier pour la hauteur correspondante. L'addition des débits des trois hauteurs permettra d'obtenir par la suite le débit solide unitaire total journalier sur la verticale d'étude à partir de ce mode de prélèvement.

Une fois calculé, ce débit sera multiplié par l'équation (1) correspondant à cette verticale pour obtenir cette fois-ci le débit solide journalier sur la zone d'influence de la verticale. L'addition des six zones d'influence donnera le débit solide total journalier de la fraction graduée sur la section.

#### 2.2.2. Mesure des débits liquides

Le débit liquide va être calculé sur le même principe que le débit solide avec tout d'abord le calcul d'un débit unitaire selon une verticale puis par la suite une intégration de ce résultat dans la zone d'influence de la verticale.

##### Méthode d'exploration du champ des vitesses :

A partir du moulinet il est noté un nombre de tours d'hélice pour 30 secondes sur six mesures à chaque profondeur ( $P_{max} + 0,18 \text{ cm}$ ,  $0,2.P_{max}$ ,  $0,4.P_{max}$ ,  $0,6.P_{max}$ ,  $0,8.P_{max}$  et à la surface).

La moyenne de ces six mesures sera ramenée à un nombre de tours par seconde (noté  $n$ ) pour pouvoir être exploitée et donner une vitesse instantanée ( $m/s$ ) à chaque profondeur.

Les équations ici utilisées en référence à l'hélice choisie sur le terrain seront :

$$U = 0,250.n + 0,01 \text{ si } n < 0,63 \text{ trs/s} \quad (5)$$

$$U = 0,261.n + 0,003 \text{ si } n > 0,63 \text{ trs/s} \quad (5')$$

A partir des vitesses calculées à toutes les profondeurs, il sera possible de créer un profil des vitesses qui montre la vitesse ( $U$ ) en fonction de la profondeur ( $P$ ) (Annexe 2) à partir duquel le débit unitaire peut être calculé.

Une fois obtenu, il faudra multiplier ce débit unitaire par la zone d'influence  $I$  (équation 1) de la verticale tout comme pour le débit solide. L'addition du débit de chacune des zones permettra l'obtention du débit liquide total sur la section.

### 2.2.3. Bathymétrie

Le traitement des deux transects (PT83 et PL502) suivis quotidiennement lors des campagnes sera réalisé à l'aide du logiciel HYPACK qui permettra d'obtenir les profils bathymétriques et de comparer les évolutions temporelles des formes du lit (macro et mésoformes). Des calculs de surface entre profils permettront de dégager la tendance globale (accentuation ou lissage des formes du lit) et des calculs de volumes permettront de dégager les zones de dépôt et d'érosion. Des superpositions de profils pourront également permettre d'évaluer la mobilité longitudinale ou transversale (selon le profil) des formes du lit et de corréler ces informations aux taux de transport solide constatés en ces zones.

### 2.2.4. Analyse granulométrique

Par soucis de temps, l'ensemble des échantillons ne pourra être traité et il a été choisi d'étudier les prélèvements du 9, 11, 16 et 18 mars pour avoir une étendue temporelle représentative de la campagne.

L'ensemble des échantillons supérieurs à 50 g récupérés et prélevés sur le terrain à l'aide de l'US BM-54, du BTMA et de la bouteille de Delft feront l'objet d'une étude granulométrique selon le protocole de l'Annexe 3. L'objectif sera d'étudier la variabilité granulométrique des sédiments transportés au sein de la section PT83 et plus précisément leur variabilité verticale et transversale (à partir notamment des pourcentages cumulés par classe granulométrique). De plus, une étude via l'outil Excel Gradistat (Blott, 2000) permettra pour chacun des échantillons de déterminer les diamètres caractéristiques des échantillons comme le  $D_{50}$  (médiane) ou le  $D_{90}$  (caractéristique des grosses particules) ainsi que les classes de texture.

## 2.3. Caractérisation du transport solide

A partir du traitement direct des données de terrains, différentes notions vont pouvoir être étudiées afin de qualifier le transport solide sur la zone d'étude : la puissance spécifique, la vitesse de cisaillement et la force tractrice ainsi que la force tractrice critique.

### 2.3.1. Détermination des puissances spécifiques

Le calcul des puissances spécifiques  $\Omega$  ( $W/m^2$ ) va permettre de caractériser la capacité de la Loire en ce lieu à retrouver une dynamique naturelle notamment après des modifications morphologiques comme le définissait Brookes (1988) in Petit *et al* (2005). Le contexte sera ici un peu différent mais cette notion servira de base pour évaluer les aptitudes du cours d'eau à évoluer dans cette zone. Son calcul s'effectue à partir de la formule :

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S / L \quad (6)$$

$\rho$  = masse volumique de l'eau pure ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  = accélération de la pesanteur de  $9.81 \text{ m/s}^2$

$Q$  = débit ( $m^3/s$ )

$S$  = pente de la ligne d'eau (%)

$L$  = largeur du cours d'eau (m)

Théoriquement,  $Q$  correspond au débit à plein bord pour cette application mais ici, les débits obtenus à partir des mesures de terrain seront utilisés.

Globalement, il est considéré qu'au dessus de 35 W/m<sup>2</sup> (pour le débit à plein bord) un cours d'eau peu « retrouver » une dynamique naturelle suite à des aménagements ou des contraintes extérieures mais tout ceci est bien sûr à nuancer au cas par cas. Cela permettra d'avoir une valeur indicatrice pour comparer les résultats.

### 2.3.2. Détermination des vitesses de cisaillement et forces tractrices

Le calcul des vitesses de cisaillement et des forces tractrices (notion mise en évidence par Du Boys 1879) découlant de la loi de la paroi de Prandtl - Von-Karman et vérifié expérimentalement par Nikuradse devra permettre d'affiner les observations effectuées à partir du calcul de la puissance spécifique et va caractériser la force de frottement de l'eau sur le fond par unité de surface.

Le calcul de la vitesse de cisaillement  $U^*$  (m/s) s'effectue à partir de la formule :

$$U^* = K * a \quad (7)$$

$K = \text{constante de Von-Karman } (K = 0,4)$   
 $a = \text{paramètre issue de la régression linéaire}$

Pour déterminer le paramètre « a » de l'équation (7), il faudra à partir des profils des vitesses ou tout du moins des valeurs de vitesse  $U$  (m/s) associées à leur profondeur construire un graphique représentant les vitesses en fonction de  $\ln(Z)$ ,  $Z$  étant la hauteur au fond. D'après les caractéristiques des vitesses dans un cours d'eau qui sont globalement croissantes du fond vers la surface, le nuage de points obtenu sera assimilable à une droite. Le coefficient directeur de la droite de régression issue de ces points sera le paramètre « a » servant dans le calcul de la vitesse de cisaillement.

Par soucis de représentation graphique  $U$  et  $Z$  ont été utilisés respectivement en cm/s et cm pour éviter de se retrouver avec des valeurs négatives et positives pour les logarithmes ce qui impliquera par la suite l'utilisation d'un facteur de correction pour retrouver les bonnes unités. Une fois connue, cette vitesse sert de base au calcul de la force tractrice  $\tau_0$  (N/m<sup>2</sup>) qui s'effectue à partir de la formule suivante :

$$\tau_0 = \rho \cdot U^* / 10000 \quad (8)$$

$\rho = \text{masse volumique de l'eau pure } (1000 \text{ kg/m}^3)$   
 $U^* = \text{vitesse de cisaillement } (\text{cm}^2/\text{s})$   
 10000 : facteur de correction pour retrouver des N/m<sup>2</sup>

Une autre méthode de calcul de la force tractrice sera également utilisée en comparaison à l'équation (8). Il s'agit de la validation de la notion mise en avant par Du Boys qui se caractérise cette fois-ci comme la tension tangentielle à la paroi (Larras, 1972 et 1977 in Bravard 1997) et qui comprend en plus de l'action du courant sur le lit considéré dans la méthode précédente l'action du courant sur les berges. Cette extension à l'ensemble des zones de contact eau/sédiments a tendance à surévaluer la force tractrice réelle mais il sera ainsi possible de voir concrètement ce qu'il en est.

Elle s'obtient à partir de la formule :

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot Rh \cdot \Phi \quad (9)$$

$\rho = \text{masse volumique de l'eau pure } (1000 \text{ kg/m}^3)$   
 $g = \text{accélération de la pesanteur de } 9.81 \text{ m.s}^{-2}$   
 $Rh = \text{rayon hydraulique } (m)$   
 $P = \text{pente en } \%$

Selon Bravard et Petit (1997), la pente d'énergie correspond à celle de la ligne d'eau et le rayon hydraulique qui s'obtient en divisant la section mouillée par le périmètre mouillé peut être assimilé à la profondeur moyenne sur les grands cours d'eau.

### 2.3.3. Détermination des forces tractrices critiques

La force tractrice critique correspond à la valeur de force tractrice nécessaire pour mettre en mouvement une particule de diamètre donné.

Afin de la déterminer, différentes équations ont été établies avec notamment l'utilisation unique du diamètre des particules comme variable. La relation retenue ici se base sur l'obtention d'un critère adimensionnel à partir des densités du sédiment et de l'eau, du diamètre des grains, de la viscosité cinématique, l'accélération de la pesanteur ainsi que la force tractrice. Il s'agit de la fonction de Shields (1936) :

$$\Theta_c = \tau_c / [(\rho_s - \rho_f) \cdot g \cdot D] \quad (10)$$

$\Theta_c$  = critère adimensionnel de Shields

$\tau_c$  = force tractrice critique en  $N/m^2$

$\rho_f$  = masse volumique de l'eau pure ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$\rho_s$  = masse volumique du solide ( $2650 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  = accélération de la pesanteur de  $9.81 \text{ m.s}^{-2}$

$D$  = diamètre des grains (m)

Selon Rodrigues (2009), une valeur de 0,045 peut être attribuée à  $\Theta$  dans cet environnement et il sera choisi pour diamètre le  $D_{90}$  comme le conseil Bravard (1997). En effet, la mobilisation de la charge de fond des rivières sablo-graveleuse s'opère préférentiellement lorsque les forces tractrices arrivent à des valeurs suffisantes pour déstabiliser les éléments les plus grossiers.

## 3. Résultats

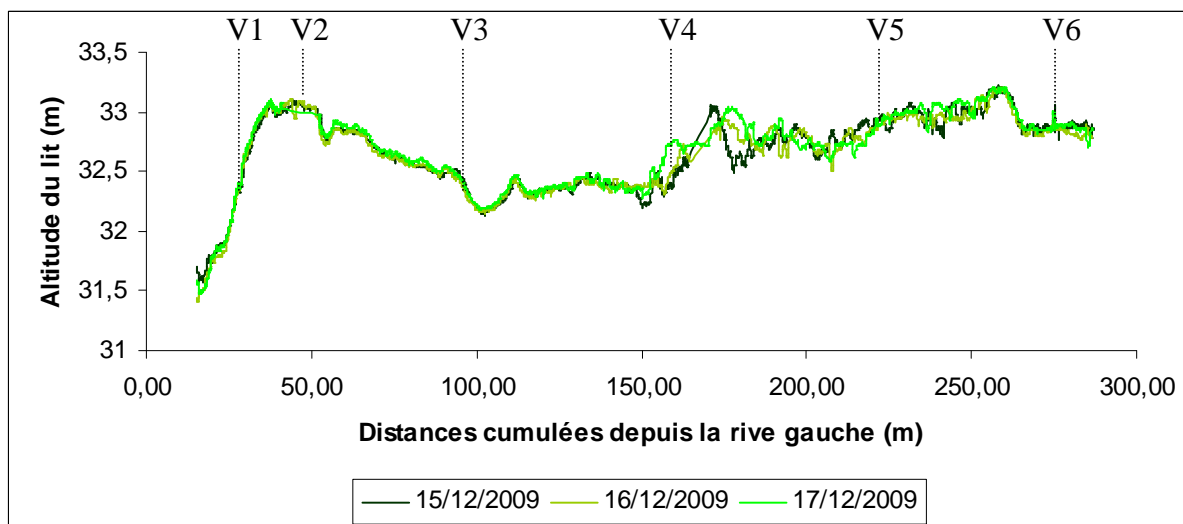
### 3.1. Bathymétrie

#### 3.1.1. Profils transversaux (PT83)

Le suivi bathymétrique de ce profil durant la campagne de décembre (Figure 7) et la campagne de mars (Figures 8 et 9) permet de dégager les caractéristiques du lit de la Loire en ce lieu et également d'en dégager les caractéristiques sur les verticales d'échantillonnage.

Du 15 au 17 décembre (Figure 7), le profil est resté globalement similaire avec de gauche à droite une mouille dans la zone de V1, la présence d'une barre sédimentaire au niveau de V2 et V3, un talweg entre V3 et V4, une autre barre sédimentaire de V4 jusqu'à une dizaine de mètres de V6 et enfin une mouille au niveau de V6.

En rentrant un peu plus dans le détail et en prenant comme référence le talweg, la mouille de gauche plonge 1 m plus profondément que celui-ci et les deux barres sédimentaires sont surélevées d'environ 80 cm. Ces barres sont toutes les deux orientées en pente douce vers le talweg et possède des élévations maximales dans les zones les plus éloignées de celui-ci. Celle de gauche possède une structure relativement plane tout comme le talweg alors que celle de droite est beaucoup plus irrégulière notamment entre V4 et V5 avec des mésoformes allant du centimètre à quelques décimètres.



**Figure 7 : Profils bathymétriques de PT83 durant la campagne de décembre**

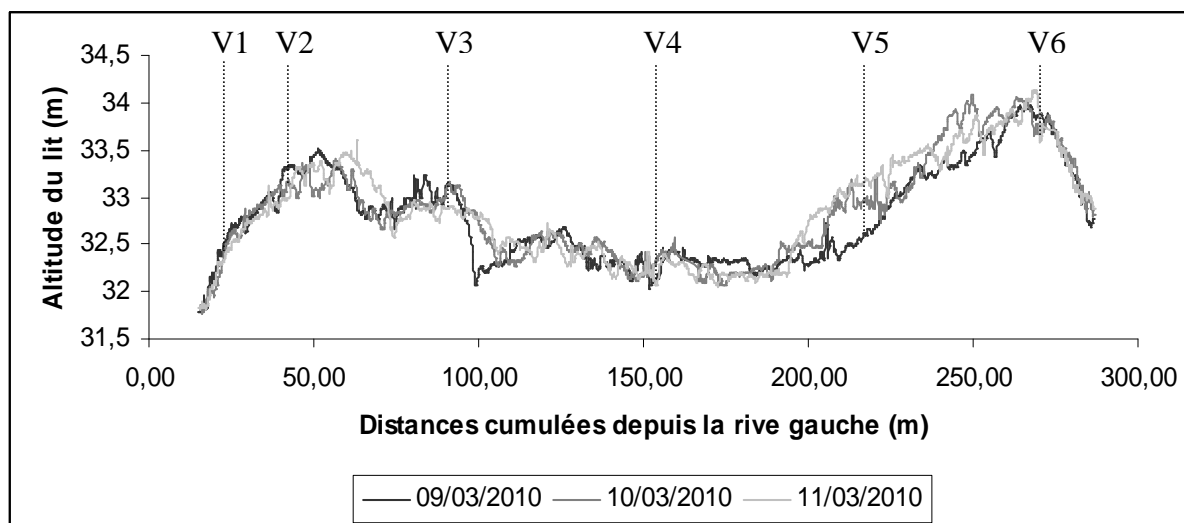
Du 9 au 11 mars (Figure 8), il est possible d'identifier les mêmes grandes structures avec toujours une mouille cette fois-ci à gauche de V1, une barre sédimentaire allant de V1 à la droite de V3, un talweg de la droite de V3 à la gauche de V5, puis une barre sédimentaire de V5 à V6 avant d'observer une nouvelle fois une mouille à la droite de V6.

Ces formes caractéristiques sont néanmoins beaucoup plus marquées que lors de la campagne de mars avec cette fois-ci une surélévation de la barre de gauche de plus d'1 m par rapport au talweg et de plus d'1,50 m pour celle de droite avec toujours l'augmentation de ces valeurs en s'éloignant le plus possible de la zone centrale.

Ces modifications d'amplitude par rapport à décembre sont dues à deux paramètres qui s'additionnent :

- un enfoncement du talweg de plusieurs décimètres (50cm au maximum)
- un rehaussement des barres de 50 à 80 cm

On note également un changement dans la structure interne de ces barres. Cette fois-ci, les deux possèdent des irrégularités de surface assimilables à des mésoformes qui peuvent faire jusqu'à 30 cm de hauteur pour quelques mètres de large.



**Figure 8 : Profils bathymétriques de PT83 durant la campagne de mars (1ère semaine)**

Du 16 au 19 mars (Figure 9), la structure globale du lit de la Loire sur ce profil est similaire à celle du 9 au 11 mars aussi bien d'un point de vue des formes caractéristiques que de leurs amplitudes même si celles-ci ont légèrement baissé.

Les éléments à noter sont un lissage des formes du lit notamment au niveau des deux barres, (la seule zone possédant des irrégularités significatives de surface est le talweg) et un rehaussement de 50 cm de la barre de gauche à proximité du talweg sur 20 m de large environ à partir du 18 mars.

Globalement, l'évolution morphologique du lit sur cette période tend vers un aplanissement avec semble-t-il un élargissement des barres surtout visible sur celle de gauche.

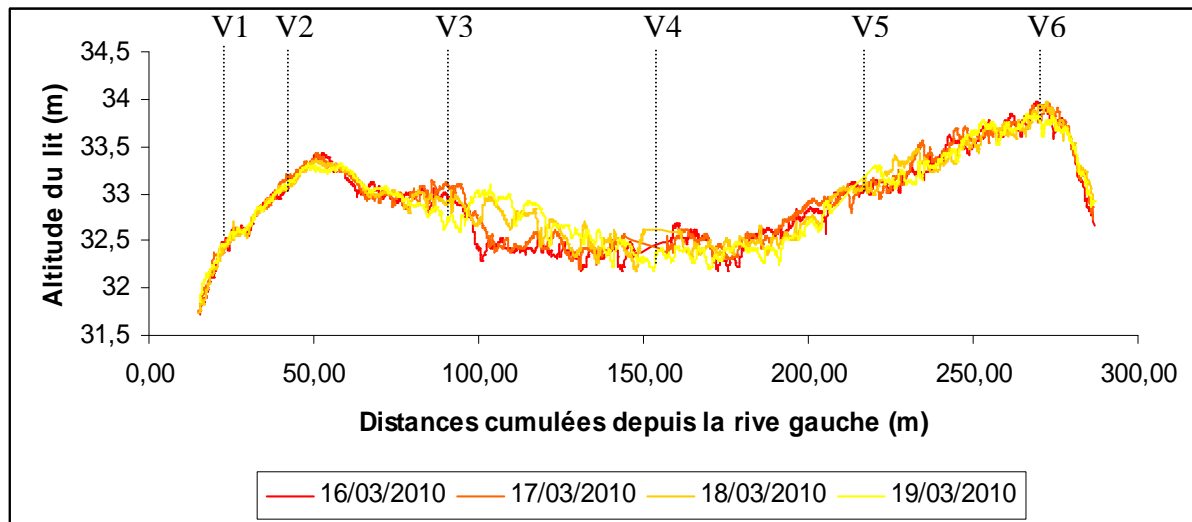


Figure 9 : Profils bathymétriques de PT83 durant la campagne de mars (2<sup>ème</sup> semaine)

Il semble donc y avoir trois zones caractéristiques sur ce profil avec les deux barres sédimentaires qui entourent le talweg. La comparaison des profils PT83 du 9 et 19 mars ainsi que des profils en amont et en aval de cette zone sur les mêmes dates à l'aide du logiciel HYPACK a permis de dégager par étude des volumes les zones préférentielles de dépôt ainsi que d'érosion sur cette période (Annexe 4).

Durant l'ensemble de la campagne de mars, le talweg ainsi que la mouille de droite ont subi une érosion progressive (jusqu'à 50 cm pour le talweg) alors que le dépôt sédimentaire (jusqu'à 20 cm) s'est principalement effectué sur les barres et plus précisément dans leurs zones les plus hautes. En plus de leurs structures caractéristiques, ces zones du lit semblent donc réagir de façon différente d'un point de vue sédimentaire et il est intéressant de constater que les zones hautes sont plutôt synonymes de dépôt alors que les zones basses sont plutôt synonymes d'érosion.

*Globalement, il est possible d'observer durant chacune des campagnes une morphologie similaire avec la présence de deux barres sédimentaire entourant un talweg central. Il est néanmoins possible de dégager certaines différences avec notamment la présence d'un lit relativement lisse en décembre sur la gauche du chenal ainsi que dans le talweg. Durant la première semaine de mars, le lit est surmonté de mésoformes sur l'ensemble de la section et il est observé une accentuation du relief. Lors de la seconde semaine de mars, le lit redevient de plus en plus proche de celui de décembre excepté dans le talweg qui est très irrégulier.*



### 3.1.2. Profils longitudinaux (PL502)

Le suivi de ce profil durant la campagne de mars (Figures 10 et 11) permet d'évaluer l'évolution longitudinale du lit de la Loire au niveau de PT83 et de la verticale 4 par laquelle passe PL502.

Du 9 au 11 mars (Figure 10), il est possible de voir au niveau de PT83 la présence d'une zone surélevée de 50 cm de hauteur sur 60 m de long environ assimilable à une barre sédimentaire. Cette formation avance régulièrement selon les journées avec une vitesse de déplacement proche de 5m/j. Cette barre est surmontée de sous unités (dunes) de 2 à 5 m de long environ pour une hauteur de 20 cm. Leur vitesse de progradation est assimilable à celle évaluée pour la barre, ainsi, une à deux dunes franchissent PT83.

Il est également observable l'arrivée d'une plus grande barre sédimentaire qui se trouve à environ 20 m de PT83 le 11 mars et qui possède un front de progradation de plus de 50 cm de haut.

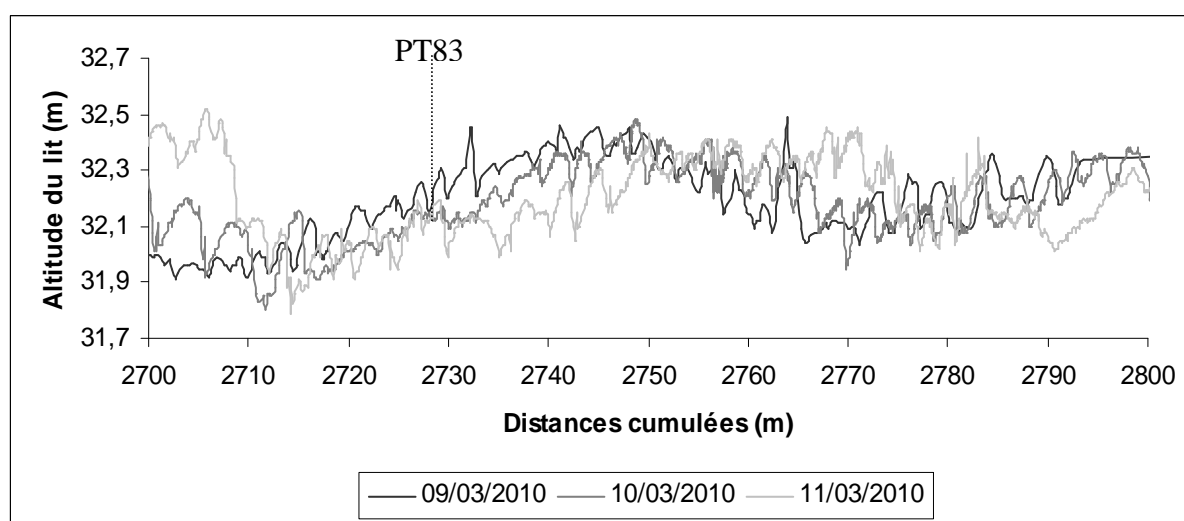


Figure 10 : Profils bathymétriques de PL502 durant la campagne de mars (1<sup>ère</sup> semaine)

Entre le 16 et le 19 mars (Figure 11), PT83 se trouve sur une structure assez homogène spatialement correspondant à la barre visible sur la gauche de la figure 10 et qui est arrivée au niveau de PT83 le 13 mars (Annexe 5). Elle comprend des sous unités bien distinctes (dunes) faisant de 20 à 40 cm de haut et 5 à 10 m de long.

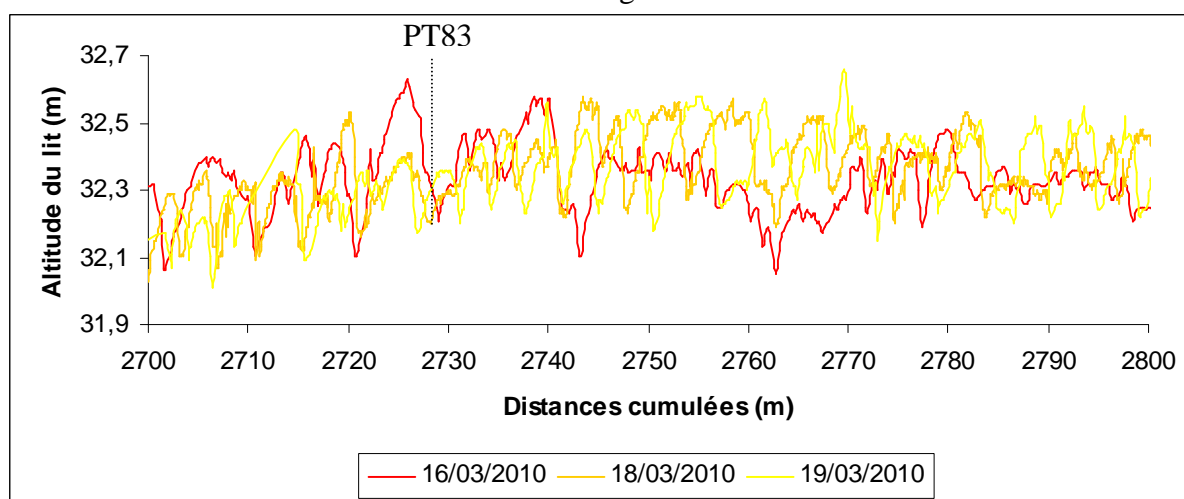


Figure 11 : Profils bathymétriques de PL502 durant la campagne de mars (2<sup>ème</sup> semaine)

Autre information, plus les journées passent plus ces formations rétrécissent puisqu'elles sont plus hautes et plus longues pour la journée du 16 mars que pour les 18 et 19 mars. La vitesse de progradation de la barre est d'environ 10 m par jour entre le 16 et le 18 mars et de 5 m/j pour la journée du 19 mars ce qui correspond tout comme sur la période d'étude précédente au passage d'une ou deux sous unités par jour par PT83. Il est également possible d'observer pour les journées du 16 et du 18 mars que PT83 se trouve juste en aval ou sur la partie initiale du front de progradation de deux dunes alors que le 19 mars, le profil se trouve juste en amont d'une de ces sous unités.

*Globalement, il a été noté lors de ces deux semaines de campagnes la présence de dunes surmontant deux barres sédimentaires. La vitesse de progradation de ces formes du lit semble relativement similaire et a été évaluée à environ 5 m/j pour chacune d'elles. La principale différence réside dans la taille des dunes. Elles étaient moins hautes et de plus faibles longueurs d'ondes sur la barre de la première semaine (20 cm de haut pour 2 à 5 m de long) que sur celle de la seconde semaine avec un rapport de taille proche de 2.*

## 3.2. Hydrométrie

### 3.2.1. Débits liquides unitaires

Pour chacune des campagnes, les débits liquides unitaires obtenus à partir du moulinet ont été calculés et repositionnés selon le profil transversal 83 comme le montre la figure 12 (mars).

Du 15 au 17 décembre (Annexe 6), il est possible de dire que les débits liquides unitaires sont restés relativement constants aussi bien d'un point de vue quantitatif que spatial. En effet, on observe quelle que soit la journée une valeur relativement forte (0,7 à 0,9 m<sup>2</sup>/s) dans la mouille gauche puis une baisse significative sur la barre gauche aux alentours de 0,5 m<sup>2</sup>/s. Ensuite, la courbe remonte proche de 1 m<sup>2</sup>/s sur la fin de cette barre avant de redescendre sur dans le talweg proche de 0,6 m<sup>2</sup>/s et de légèrement décroître jusqu'à la fin de la mouille droite.

Ces différences sont principalement dues aux variations de profondeurs mises en évidence avec la bathymétrie ainsi qu'aux variations des vitesses du courant sur la section qui ont été repérées lors des mesures au moulinet.

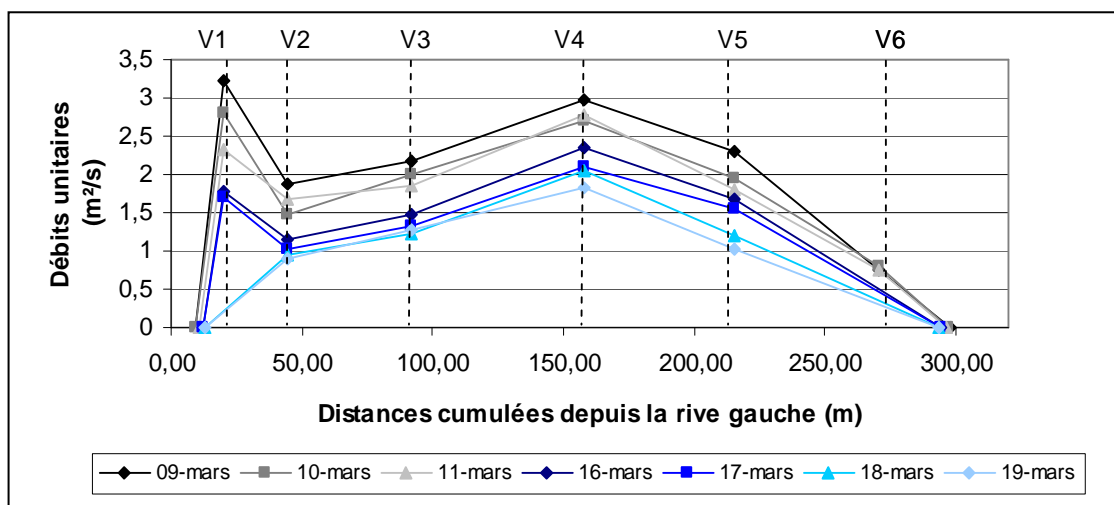


Figure 12 : Débits liquides unitaires durant la campagne de mars sur PT83

Selon la figure 12, il est possible de dire que les courbes représentatives des débits unitaires de la campagne de mars sont symétriquement décroissantes et évoluent donc selon la même tendance : une valeur relativement forte sur V1 avant d'observer une forte baisse sur V2 (environ 40%). Ensuite les profils remontent jusqu'à V4 pour atteindre des valeurs proches de celles de V1 avant de redescendre de V4 à V6 où ils atteignent des valeurs relativement faibles.

Tout comme au mois de décembre, il semble y avoir une zone non favorable à l'écoulement aux alentours de V2 et également une zone favorable qui cette fois-ci se trouve au centre du chenal ainsi qu'à proximité de la rive gauche. Ces différences sont toujours dues aux variations de profondeur avec la présence de la mouille vers V1, les barres de V2 à V3 et de V5 à V6 et le talweg central. Des variations des vitesses de courant sur la section ont une nouvelle fois été mises en évidence par les mesures au moulinet. Ainsi, les vitesses de courant sont plus élevées au niveau du talweg et dans une moindre mesure au-dessus de la barre sédimentaire gauche. Elles sont plus faibles dans la mouille gauche, au-dessus de la barre sédimentaire droite et sont encore plus faibles dans la mouille droite.

### 3.2.2. Débits liquides totaux

L'obtention de ces débits unitaires a permis de calculer le débit liquide journalier sur la section PT83 comme le montre la figure 13.

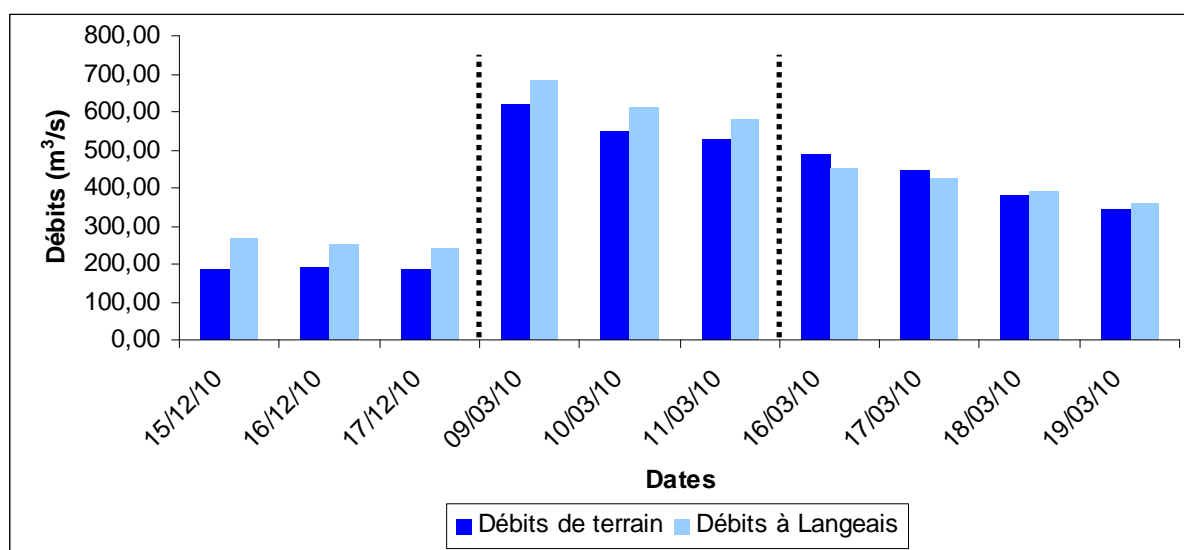


Figure 13 : Evolution des débits liquides lors de la campagne de décembre et campagne de mars, 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> semaine

Les débits sont restés relativement constants durant la campagne de décembre avec des valeurs d'environ 180 m³/s en accord avec les valeurs homogènes de débits unitaires. En revanche, durant la campagne de mars on observe une décrue progressive avec un débit qui passe de 620 m³/s le 9 mars à 343 m³/s le 19 mars. Cette évolution est en accord avec la décroissance régulière des profils des débits unitaires vue précédemment.

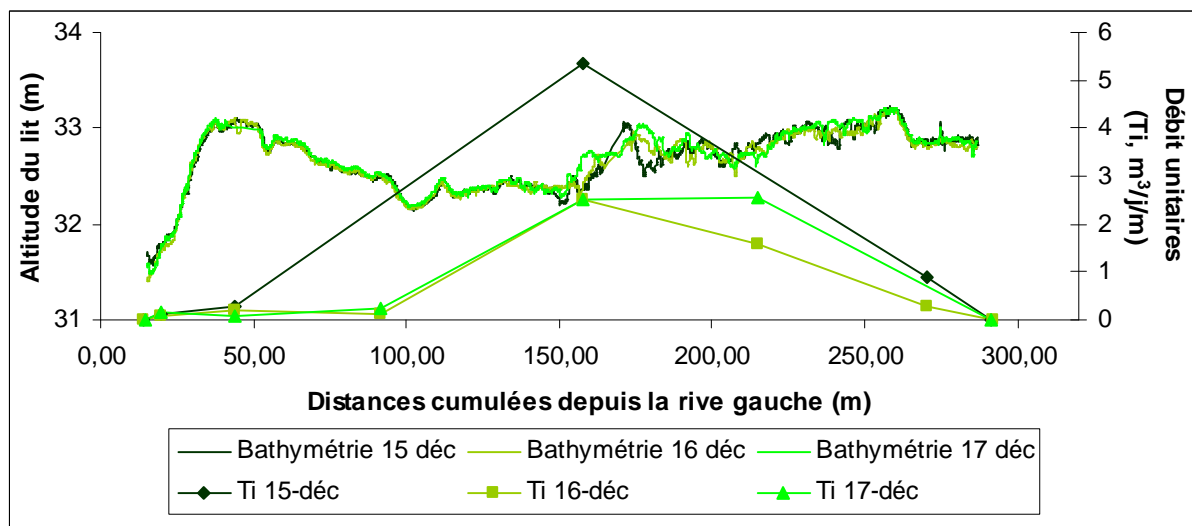
Si l'on se réfère aux données de la station de Langeais, ces débits calculés à partir des mesures de terrain sont relativement justes (erreurs < 10 %) en dehors des valeurs de la campagne de décembre qui ont été sous évaluées d'environ 25 %. La méthode semble moins précise pour les bas débits sur un cours d'eau comme la Loire.

*Globalement, l'étude des débits unitaires a permis de montrer une décroissance régulière du profil des vitesses sur la section au cours d'une décrue qui a fait passer le débit liquide d'un peu plus de 600 m<sup>3</sup>/s à un peu moins de 350 m<sup>3</sup>/s. De plus, il a été noté un écoulement préférentiel quelque soit la période au niveau du talweg ainsi que de la mouille gauche. Ceci est principalement dû à la profondeur plus importante de ces zones et également à une accélération des vitesses pour le talweg.*

### 3.3. Transport solide

#### 3.3.1. Débits solides unitaires

Pour chacune des campagnes, les débits solides unitaires obtenus à partir du BTMA et de la bouteille de Delft ont été calculés et repositionnés selon le profil transversal 83 (Annexe 7 ). Il a ainsi été possible de calculer les débits solides unitaires totaux selon ce profil comme le montre les figures 14, 15 et 16.



**Figure 14 : Débits solides unitaires totaux durant la campagne de décembre sur PT83**

Selon la figure 14, du 15 au 17 décembre le transport solide total (charriage + suspension graduée) a été plus conséquent dans la partie centrale (talweg) et partie droite du chenal. En effet, les taux de transports maximaux sont toujours dans le centre du chenal (de 2,52 à 5,36 m<sup>3</sup>/j/m selon la journée) et reste relativement important (autour de 2 m<sup>3</sup>/j/m) sur le contrebas de la barre de droite à proximité du talweg.

Cette tendance globale est principalement due aux zones de transport de la charge de fond. En effet, les taux de transport faisant suite aux traitements des prélèvements effectués à l'aide de la bouteille de Delft sont quotidiennement proches de 0 m<sup>3</sup>/j/m et sont donc négligeables par rapport aux résultats issus du BTMA. Il faut néanmoins noter que quelle que soit la fraction recueillie, les taux de transport les plus importants sont toujours situés dans le talweg.

Durant la 1<sup>ère</sup> semaine de mars, les zones de transports sont moins bien marquées qu'en décembre. En effet d'après la figure 15, les 9 et 10 mars les taux de transports élevés sont sur les deux barres alors que le 11 mars les taux de transport élevés sont plus faibles mais plus homogènes sur la section avec néanmoins un transport s'opérant davantage vers la droite du chenal.

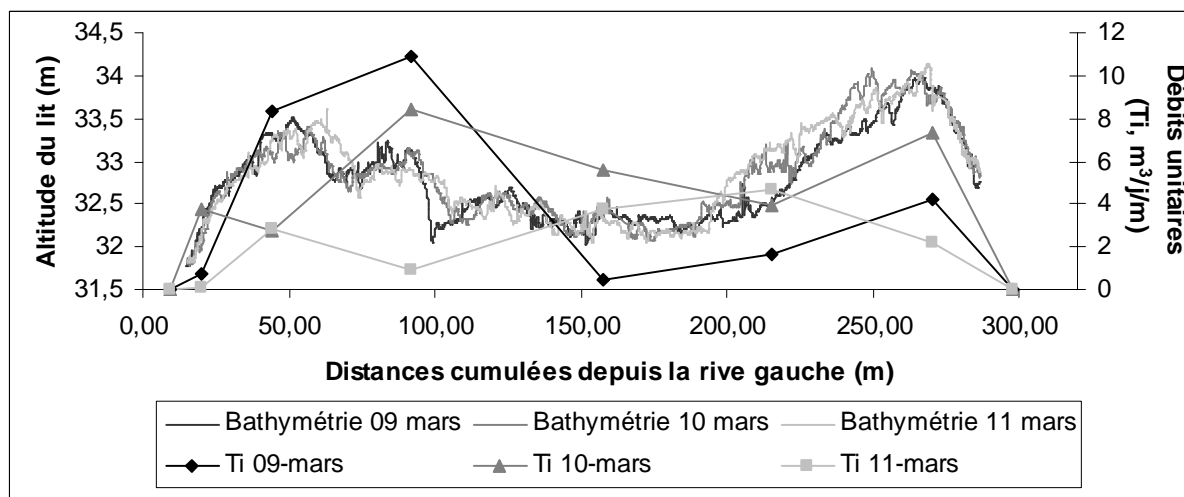


Figure 15 : Débits solides unitaires totaux durant la campagne de mars (1<sup>ère</sup> semaine) sur PT83

Ces observations se retrouvent aussi bien pour le charriage que pour la suspension graduée avec globalement un transport soit sur la barre de gauche soit sur celle de droite avec une zone moins dynamique dans le talweg surtout visible le 9 mars. Il est important de noter que les taux de transport calculés à partir des prélèvements de la bouteille de Delft sont ici beaucoup plus élevés qu'en décembre avec des valeurs souvent proches de  $3 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$  et un maximum de  $6 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$  sur V3 le 10 mars représentant environ 50% du transport totale sur cette verticale. Néanmoins, il ne faut pas oublier que la méthode de prélèvement peut fausser en partie les taux de transport.

Lors de la seconde semaine de mars, les zones du transport solide ont totalement changé comme le montre la figure 16 suivante. En effet, le transport s'effectue de façon très importante les 16 et 18 mars dans le talweg (un peu à l'image de décembre) avec des valeurs supérieures à  $11 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ . Pour les deux autres journées, les taux de transport sont beaucoup plus faibles et assez homogènes (proches de  $3 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ ) avec des valeurs un peu plus élevées sur la barre gauche le 17 mars et sur la barre droite le 19 mars.

Ces variations journalières se retrouvent aussi bien pour le transport par charriage que pour le transport par saltation avec néanmoins une fraction graduée quasi nulle sur la partie gauche du chenal sur ces quatre journées.

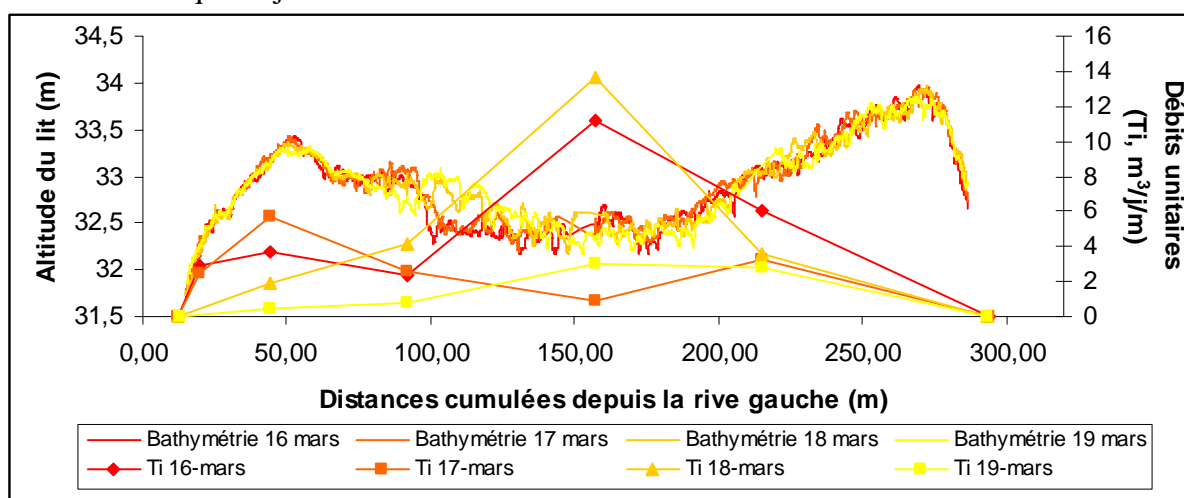


Figure 16 : Débits solides unitaires totaux durant la campagne de mars (2<sup>ème</sup> semaine) sur PT83

### 3.3.2. Débits solides totaux

L'obtention de ces débits unitaires journaliers a permis de calculer les débits solides totaux journaliers sur cette section comme le montre la figure 17.

Sur cette figure, les deux campagnes de transport solide ressortent avec des caractéristiques de débits bien différentes.

En décembre, le débit solide se résume essentiellement au transport par charriage avec des valeurs de l'ordre de 700, 275 puis 450 m<sup>3</sup>/j dans l'ordre des journées de la campagne. Le transport par saltation est négligeable puisqu'il ne représente jamais plus de 10 % du transport total.

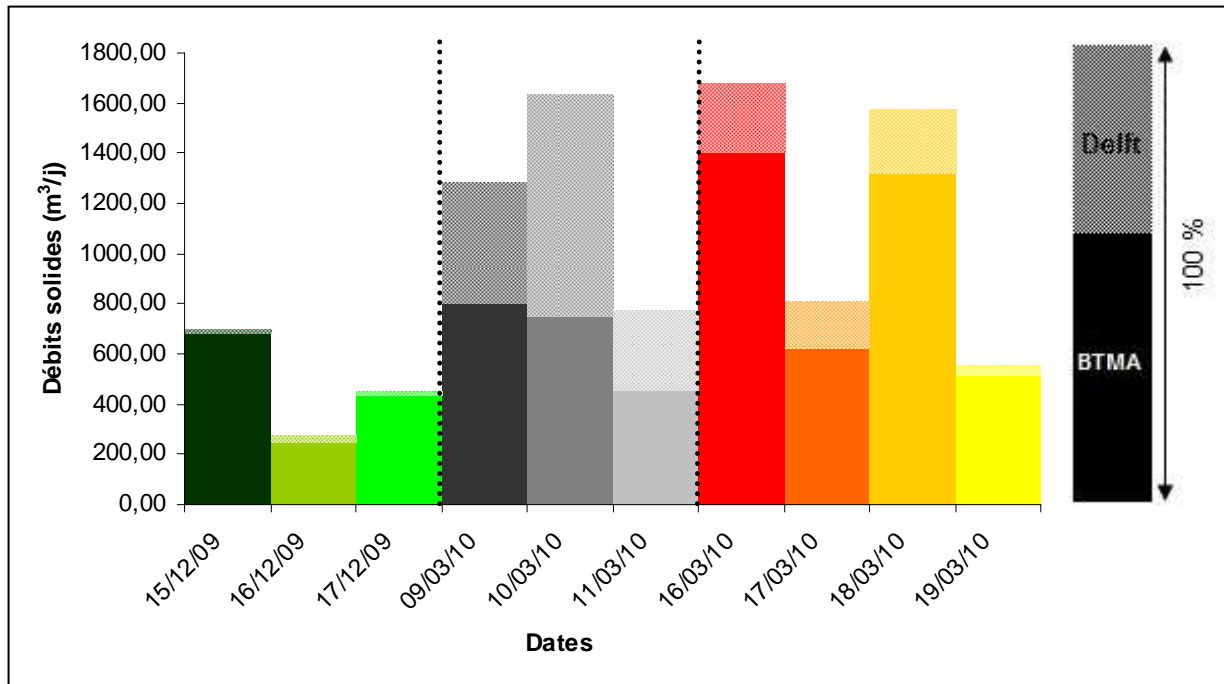


Figure 17 : Débits solides totaux journaliers obtenus à partir des prélèvements de terrain (BTMA et Delft)

La campagne de mars avec ses deux périodes de prélèvements montre des débits solides beaucoup plus importants. Ainsi, du 9 au 11 mars il a été noté un maximum de plus de 1600 m<sup>3</sup>/j tout comme sur la période du 16 au 19 mars. Cela est principalement dû à une augmentation du transport par saltation (notamment pour la première semaine de cette campagne) puisque le débit charrié est resté relativement similaire à celui de décembre à l'exception des 16 et 18 mars où il est beaucoup plus important.

Même s'il manque quatre journées entre les deux semaines d'études de la campagne de mars, on peut noter un transport solide journalier réagissant par pulsation avec un débit important suivant un débit moins important et inversement. Une pulsation propre au charriage est également visible sur la seconde semaine.

*Globalement, il a été identifié un transport s'opérant préférentiellement dans le talweg pour les bas débits comme l'a montré la semaine de décembre ainsi que l'évolution de la seconde semaine de mars. Pour les débits plus importants (> 500 m³/s) le transport s'opère cette fois-ci préférentiellement au niveau des deux barres sédimentaires. De plus, à l'échelle globale de la section il a été noté un flux solide réagissant de façon pulsante (de 275 m³/j à plus de 1600 m³/j), élément également repérable à une échelle plus locale, dans le talweg, lors de la seconde semaine de mars.*



### 3.4. Granulométrie

Il est important de préciser que beaucoup d'échantillons prélevés à la bouteille de Delft n'ont pas été traités à cause de leur faible masse ( $< 50$  g). La présentation suivante des résultats se concentrera donc uniquement sur les échantillons prélevés au BTMA et à l'US-BM54 ce qui caractérisera uniquement la zone de charriage.

#### 3.4.1. Distribution granulométrique

A partir des triangles de texture issus de Gradistat (Annexe 8), les classes texturales des échantillons ont pu être déterminées. La grande majorité des échantillons se composent essentiellement de sable et de gravier, ils font partie soit de la classe sablo graveleuse soit gravo sableuse. Une minorité d'échantillons se trouve quant à elle dans la classe sablo faiblement graveleuse.

Ceci ne permet donc pas d'observer une grande distinction entre les échantillons, élément qui va être possible avec l'étude du diamètre médian ( $D_{50}$ ) et surtout du diamètre caractéristique des gros échantillons ( $D_{90}$ ) qui servira au calcul de la force tractrice critique.

La figure suivante présente ces diamètres caractéristiques pour chacune des verticales prélevées sur les quatre journées choisies pour l'étude granulométrique.

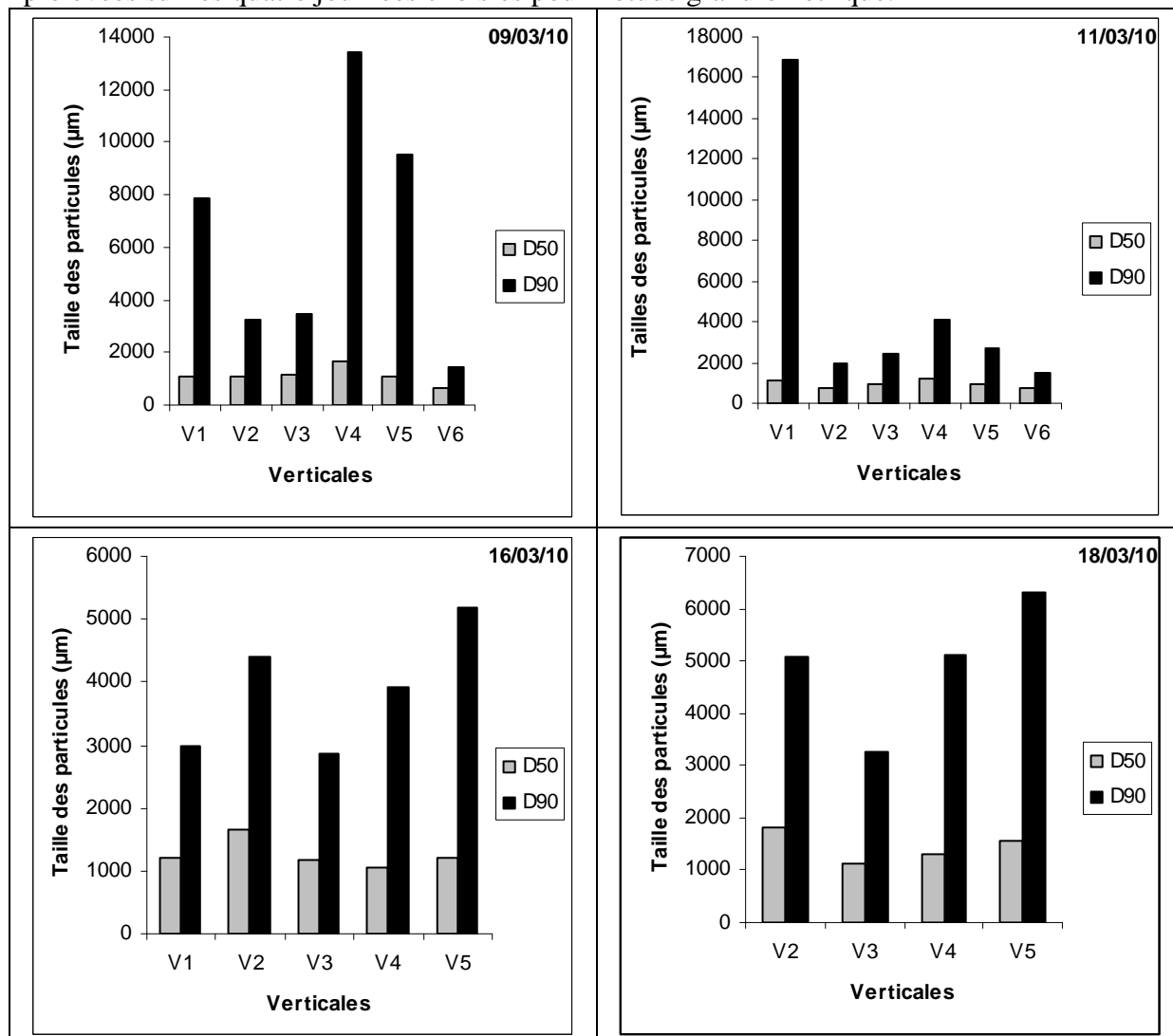


Figure 18 :  $D_{50}$  et  $D_{90}$  moyens par verticale des échantillons prélevés avec le BTMA et l'USBM

Le diamètre médian oscille de 660 et 1800  $\mu\text{m}$  alors que le  $D_{90}$  possède une amplitude plus importante avec un minimum de 1500  $\mu\text{m}$  sur V2 le 11 mars et un maximum de 17 000  $\mu\text{m}$  sur V1 toujours le 11 mars.

A quelques exceptions près, les verticales possédant les plus forts  $D_{50}$  possèdent également de forts  $D_{90}$  comme on peut le voir le 9 mars sur V4, le 11 mars sur V1 et V4, le 16 mars sur V2 et le 18 mars sur V1 et V5. Ces deux paramètres évoluant de manière quasi similaire, l'étude du  $D_{90}$ , diamètre qui servira par la suite va permettre de caractériser l'évolution spatiale de la taille des particules.

Le 9 mars, les zones de V1, V4 et V5 se caractérisent par la présence significative de grosses particules ( $> 8\,000\ \mu\text{m}$ ) qui se retrouvent uniquement sur V1 le 11 mars et faiblement sur V4. Au niveau des autres verticales, les valeurs de  $D_{90}$  sont comprises entre 1 500 et 4 000  $\mu\text{m}$ . Ainsi, la mouille gauche, le talweg et le contrebas de la barre de droite à proximité du talweg possèdent un lit granulométriquement plus grossier à l'opposé des zones de barres sédimentaires (ou zone haute pour celle de gauche) et de la mouille droite durant la 1<sup>ère</sup> semaine de la campagne de mars.

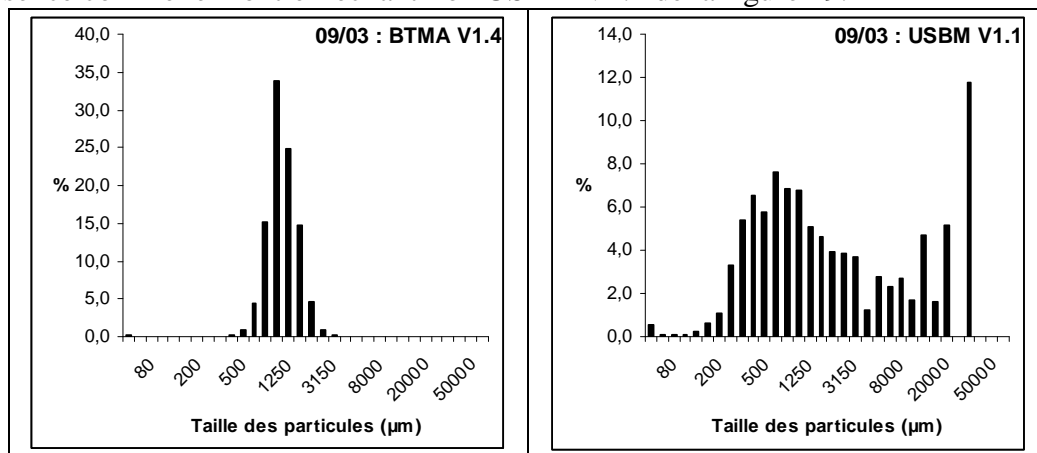
Durant la seconde semaine, même s'il manque V6 le 16 mars ainsi que V1 et V6 le 18 mars il est possible de dire que la situation a changé. En effet, les valeurs de  $D_{90}$  sont beaucoup plus homogènes (3 000 à 6 000  $\mu\text{m}$ ) et même légèrement supérieures sur V2 et V5 qui correspondent aux deux barres. Les zones possédant les grains les plus petits sont cette fois-ci la mouille au niveau de V1 et le contre bas de la barre de gauche à proximité du talweg au niveau de V3.

***Au fur et à mesure de la décrue la composition granulométrique du site s'est semble-t-il inversée. Tout d'abord, les particules plus grossières étaient au niveau de la mouille gauche, du talweg et de la partie de la barre droite à son contact. Par la suite, les particules de ces zones sont devenues plus petites pour passer en dessous du diamètre des particules présentes au niveau des barres qui lui a légèrement augmenté.***

### 3.4.2. Tri granulométrique

La notion de tri granulométrique s'observe très bien à partir de graphiques représentant les pourcentages par classe ou alors les pourcentages cumulés de chacune des classes.

Sur l'ensemble des échantillons traités (Annexe 9), le tri est relativement bon avec la dominance de quelques classes granulométriques comme on peut le voir sur l'échantillon BTMA V1.4 de la figure 19. Néanmoins, quelques échantillons sont nettement moins bien triés avec la présence d'une forte hétérogénéité granulométrique associée à une homogénéité de présence comme le montre l'échantillon USBM V1.1 de la figure 19.



**Figure 19 : Fréquence des classes granulométriques pour un échantillon bien trié (BTMA V1.4) et un échantillon mal trié (USBM V1.1)**

A partir de l'étude des échantillons mal triés, il s'avère que ceux-ci sont pratiquement tous issus de prélèvements effectués avec l'US BM-54. Cette observation semble logique du fait de ses caractéristiques d'échantillonnage. Il prélève sur les 10 cm supérieurs du lit et recueille ainsi des grains qui ne sont pas forcément en mouvement à l'inverse du BTMA qui recueille uniquement des particules mobiles. De ce fait, il y a beaucoup plus de chance de retrouver des particules plus grossières ou alors des particules fines colmatées à partir des prélèvements de l'US BM-54.

### 3.5. Puissances spécifiques

Comme le montre le tableau 2 suivant, les puissances spécifiques sont comprises entre 5 W/m<sup>2</sup> (16 mars) et 19 W/m<sup>2</sup> (9 mars) avec quatre journées aux alentours de 10 W/m<sup>2</sup>. Ces valeurs sont assez éloignées des 35 W/m<sup>2</sup> permettant au cours d'eau de retrouver une dynamique naturelle suite à des aménagements mais la situation est ici différente.

**Tableau 2 : Puissances spécifiques calculées au niveau de PT83 pour chaque journée de la campagne de mars**

Dates	09-mars	10-mars	11-mars	16-mars	17-mars	18-mars	19-mars
$\Omega$ (W/m <sup>2</sup> )	19,21	8,74	9,26	5,09	14,07	8,07	9,59

Le site de Bréhémont ne possède pas d'aménagements majeurs et durant cette campagne, les débits étaient entre trois et six fois moins importants que celui du débit plein bord. A partir de ces deux éléments, il est possible de dire qu'il n'y a pas de facteur empêchant la Loire d'avoir une dynamique naturelle et donc de potentiels changements morphologiques.

### 3.6. Vitesses de cisaillement, forces tractrices et forces tractrices critiques

Durant la campagne de décembre, les valeurs des vitesses de cisaillement et forces tractrices (Tableau 3) sont restées relativement homogènes et assez basses. En effet, les valeurs de forces tractrices (force proportionnelle au carré de la vitesse de cisaillement divisé par 10) sont toutes comprises entre 0,1 et 2,8 N/m<sup>2</sup> en dehors des valeurs obtenues sur V4 (talweg) les 16 et 17 décembre qui sont respectivement de 39,73 N/m<sup>2</sup> et 4,00 N/m<sup>2</sup>. Les valeurs minimales (proches de 0 N/m<sup>2</sup>) sont toujours retrouvées sur V1 (mouille).

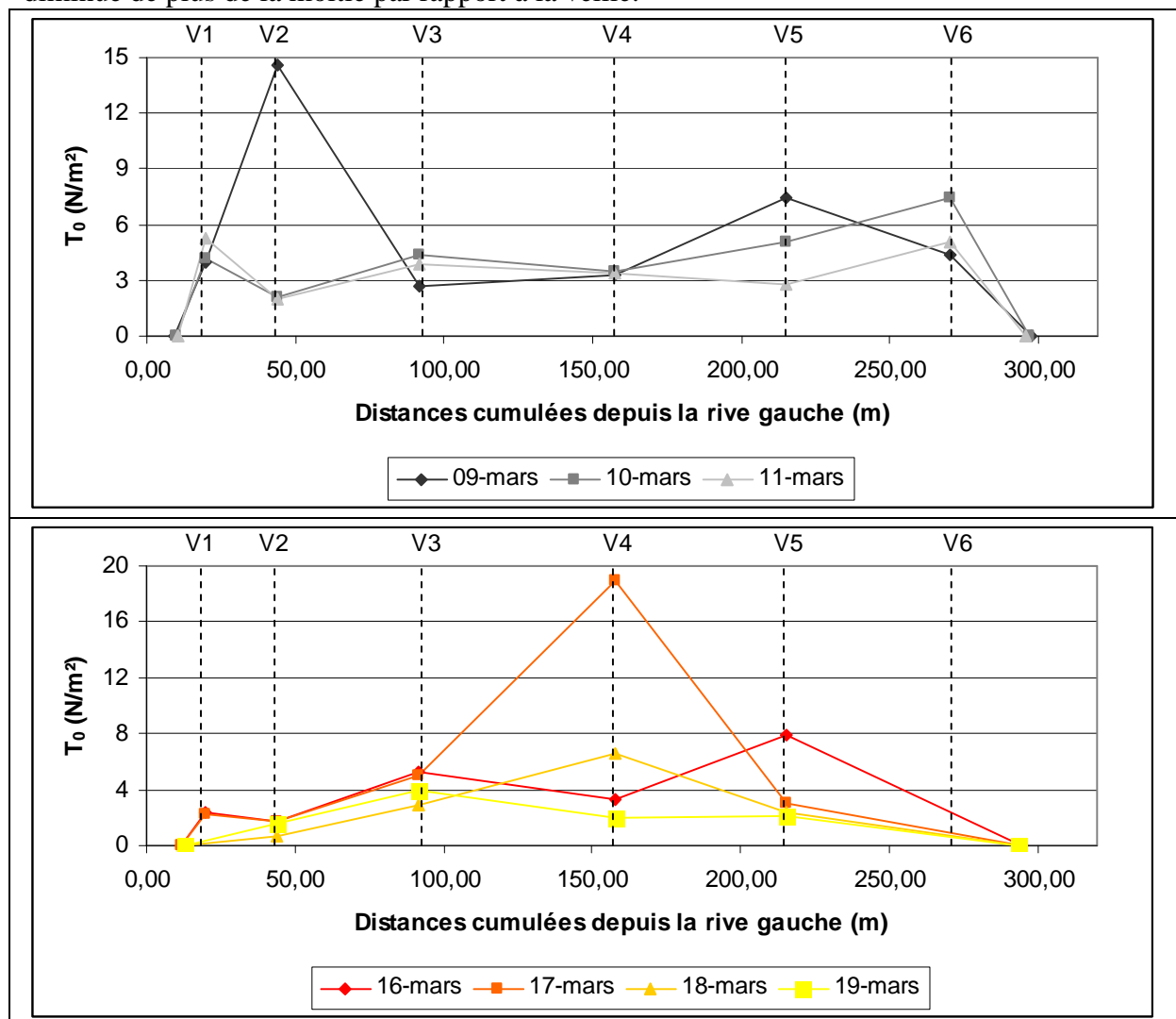
**Tableau 3 : Vitesses de cisaillement et forces tractrices sur chaque verticale durant la campagne de décembre**

Dates	15-déc		16-déc		17-déc	
Verticales	U* (cm/s)	T <sub>0</sub> (N/m <sup>2</sup> )	U* (cm/s)	T <sub>0</sub> (N/m <sup>2</sup> )	U* (cm/s)	T <sub>0</sub> (N/m <sup>2</sup> )
V1	1,16	0,14	2,26	0,51	2,25	0,50
V2	2,53	0,64	3,26	1,06	4,04	1,63
V3	-	-	5,24	2,75	4,36	1,90
V4	3,69	1,36	19,93	39,73	6,33	4,00
V5	-	-	3,63	1,32	3,61	1,30
V6	3,21	1,03	3,08	0,95	-	-

La valeur du 16 décembre est certainement surévaluée et cette « déviance » peut s'expliquer soit par des problèmes de mesure avec le moulinet soit par un élément ponctuel du cours d'eau ayant conduit à une forte accélération des vitesses en remontant la colonne d'eau.

Durant la campagne de mars, les valeurs des vitesses de cisaillement et forces tractrices sont beaucoup plus élevées et beaucoup plus hétérogènes que lors de la première campagne. Ceci

est visible sur la figure 20 montrant l'évolution des forces tractrices. Ainsi, le 9 mars les valeurs de forces tractrices sont comprises entre 2,60 et 14,60 N/m<sup>2</sup> avec le maximum sur V2 (sommet de la barre de gauche), une valeur relativement forte sur V5 (contrebas de la barre de droite à proximité du talweg ; 7,46 N/m<sup>2</sup>) et le minimum sur V3 (proximité de la barre de gauche avec le talweg). Le 10 mars, la situation est différente avec un maximum de 7,45 N/m<sup>2</sup> sur V6 (mouille) et un minimum de 2,11 N/m<sup>2</sup> sur V2. Cette tendance se retrouve le 11 mars avec les mêmes verticales pour les fortes et faibles valeurs de forces tractrices. Le 16 mars (début de la 2<sup>ème</sup> semaine de la campagne), les fortes valeurs de  $\tau_0$  se retrouvent au niveau de V3 et V5 (respectivement 5,27 et 7,90 N/m<sup>2</sup>) et les faibles valeurs (< 2,5 N/m<sup>2</sup>) sur la gauche du chenal au niveau de V1 et V2. Cette tendance se retrouve bien le 17 mars pour la partie gauche du chenal avec à nouveau de faibles valeurs. Cette fois-ci, le maximum est sur V4 (18,91 N/m<sup>2</sup>), une valeur toujours assez forte est observable sur V3 et la valeur de V5 a diminué de plus de la moitié par rapport à la veille.



**Figure 20 : Evolution des forces tractrices lors de la campagne de mars**

Le 18 mars, la situation est globalement la même avec simplement une baisse de l'ensemble des valeurs surtout visible au niveau de V4. Sur la dernière journée d'étude, les valeurs sont désormais plus basses et plus homogènes que celles du début de la campagne et le maximum se trouve au niveau de V3 (3,99 N/m<sup>2</sup>).

Les valeurs de forces tractrices issues de la seconde méthode (Tableau 4), calculées à partir de la ligne d'eau observable sur V4 (PL502) sont étendues pour chaque journée à l'ensemble de la section.

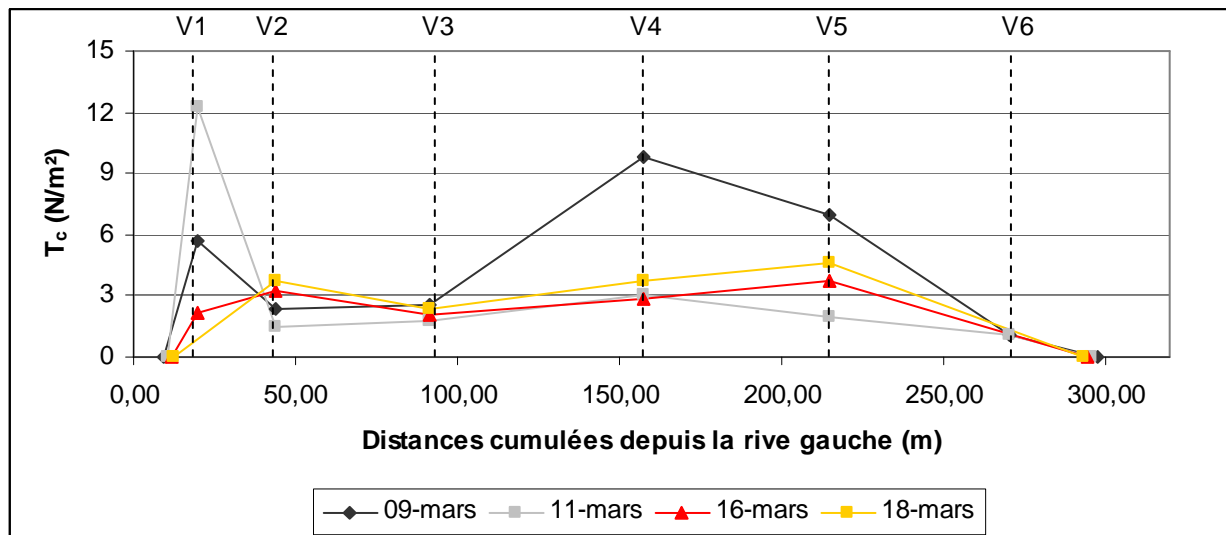
**Tableau 4 : Forces tractrices (2<sup>ème</sup> méthode) durant la campagne de mars**

Dates	09-mars	10-mars	11-mars	16-mars	17-mars	18-mars	19-mars
$T_0$ (N/m <sup>2</sup> )	21,94	10,11	9,90	5,14	14,25	9,30	9,97

Globalement, elles sont plus élevées que celles déterminées par la première méthode mais leur évolution suit celle observée précédemment notamment pour les valeurs maximales.

Cette méthode, moins précise de part les paramètres pris en compte ne permet pas une quantification exacte de la force tractrice mais en revanche, elle permet de suivre les variations temporelles globales de cette force sur une section. Ceci peut être intéressant si l'on ne dispose pas des données des vitesses de courant permettant l'application de l'autre méthode.

Le dernier paramètre caractérisant chacune des verticales est la force tractrice critique. Celle-ci a été calculée à partir des données granulométriques des quatre journées traitées (9, 11, 16 et 18 mars) comme le montre la figure 21.



**Figure 21 : Forces tractrices critiques sur chaque verticale durant les journées de la campagne de mars ayant subies l'analyse granulométrique**

Le 9 mars, la force tractrice critique est la plus élevée au niveau de V4 et de V5 (respectivement 9,76 et 6,92 N/m<sup>2</sup>) et minimale sur V6 (1,05 N/m<sup>2</sup>). La situation change totalement le 11 mars puisque seule V1 possède une valeur élevée de force tractrice critique (12,28 N/m<sup>2</sup>) et sur les autres verticales elle est relativement faible (< 3 N/m<sup>2</sup>). Pour les deux autres journées, les valeurs de  $\tau_c$  sont relativement homogènes (entre 2,00 et 4,70 N/m<sup>2</sup>) avec un minimum sur V3 et un maximum sur V5.

*Globalement, il a été identifié des valeurs de forces tractrices de plus en plus faibles au cours de la décrue, élément également mis en avant avec les faibles débits liquides de la campagne de décembre. De plus, lors des bas débits, les forces tractrices tendraient à être plus élevées dans le talweg alors qu'elles seraient plus élevées au niveau des deux barres pour des débits plus importants.*

*Les forces tractrices critiques sont quant à elles en corrélation positive avec le débit liquide, du moins pour l'évaluation de la force tractrice critique maximale sur la section. En effet, plus le débit baisse, plus les forces tractrices critiques maximales diminuent et deviennent homogènes sur la section.*

## 4. Discussion

### 4.1. Caractérisation du transport solide : les débits unitaires

Selon la quantification du transport solide obtenue précédemment, différentes hypothèses peuvent être lancées pour comprendre ces résultats. En effet, les variations des vitesses de courant, du débit liquide ou encore des forces tractrices pourraient expliquer les variations du taux de transport au sein de la section.

A partir des résultats caractéristiques de chacune des verticales obtenus dans la partie résultat, il est très difficile de dégager des liens entre les paramètres étudiés. En effet, pour certaines journées les fortes valeurs de débits unitaires liquides correspondent aux fortes valeurs de débits unitaires solides alors que pour d'autres journées il n'y a pas de correspondance (Annexe 10). D'autres paramètres doivent régir la mise en mouvement des sédiments sur un point donné.

Les forces tractrices sont considérées comme les forces permettant la mise en mouvement des sédiments du lit d'un cours d'eau, il semble donc logique d'étudier les variations des taux de transport en fonction de ces forces sur la section.

La figure 22 suivante illustre les variations des taux de transport sur les verticales prélevées les 9, 11, 16 et 18 mars en fonction tout d'abord de la force tractrice et par la suite du rapport de la force tractrice sur la force tractrice critique.

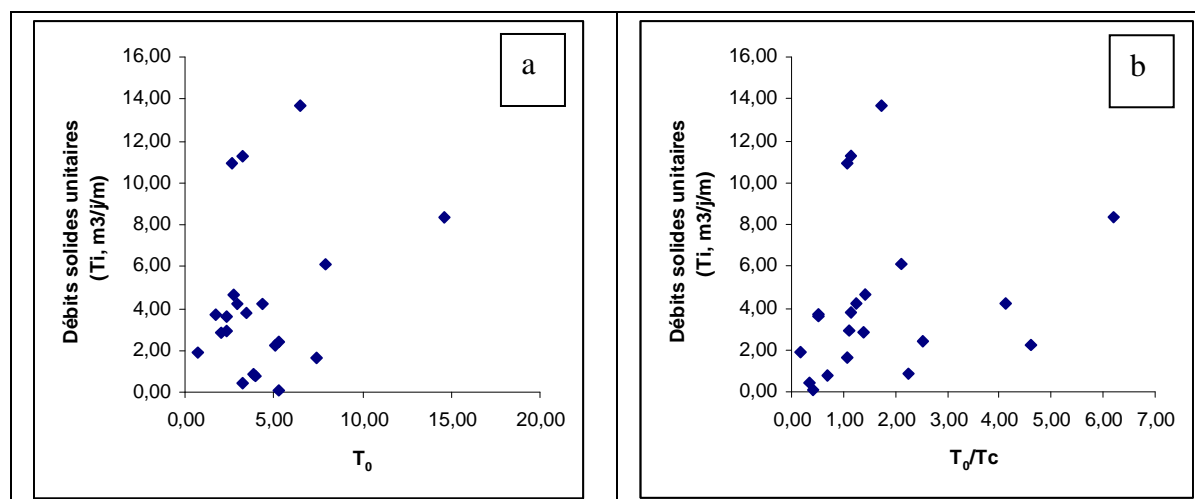


Figure 22 : Evolutions des débits solides unitaires en fonction de  $\tau_0$  (a) et en fonction du rapport  $\tau_0/\tau_c$  (b)

Sur le premier graphique il est très difficile de dégager une tendance car le débit solide unitaire n'est pas proportionnel à la force tractrice ce qui peut sembler logique vu qu'ici les caractéristiques du lit (taille des particules principalement) ne sont pas considérées.

Sur le second graphique, la situation est pratiquement identique avec un amas de points non organisés ce qui peut paraître surprenant. Par définition, la mise en mouvement des particules s'opère lorsque les valeurs des forces tractrices deviennent supérieures à celles des forces tractrices critiques. Ici, il y a des taux de transport significatifs pour des valeurs du rapport  $\tau_0/\tau_c$  supérieures et inférieures à 1. De plus, l'augmentation de ce rapport ne montre pas des taux de transport de plus en plus élevés. Cette absence de lien pourrait en partie être dû à la méthode de calcul des forces tractrices. En effet, il a été considéré le profil de vitesse de l'ensemble de la colonne d'eau pour déterminer la régression linéaire permettant par la suite de calculer les vitesses de cisaillement puis les forces tractrices. Il est en théorie conseillé d'étudier la variation de ces vitesses dans la basse couche de la colonne d'eau mais le manque de donnée dans cette zone n'a pu permettre cette application.



L'existence de corrélation entre ces différents paramètres n'est pas confirmée même si la validation de la définition de force tractrice critique à une cette échelle ne fait aucun doute. D'autres paramètres doivent intervenir dans l'élaboration complexe qu'est le transport solide notamment si l'on travail verticale par verticale. L'étude des phénomènes de turbulence à proximité du lit pourrait être intéressante et pourrait permettre d'expliquer pourquoi de faibles valeurs de la force tractrice permettent la mobilisation de beaucoup de sédiments.

#### 4.2. Caractérisation du transport solide : les flux

L'étude des paramètres spécifiques aux différentes zones de la section n'ayant pas fourni de résultats significatifs, il peut-être intéressant de voir si une étude plus globale des processus, permet de dégager cette fois-ci certaines tendances. Pour se faire, les débits solides journaliers de la campagne de mars vont être associés aux débits liquides journaliers de la décrue comme le montre la figure 23.

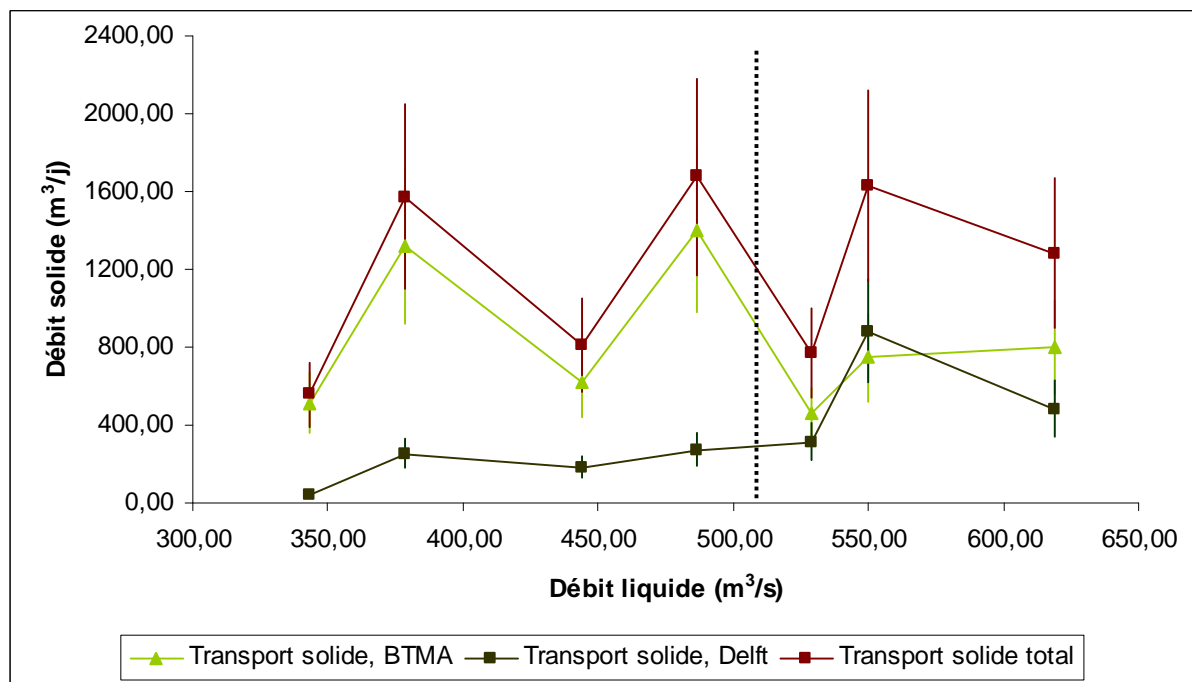


Figure 23 : Evolution du transport solide au cours de la décrue de mars

Sur cette figure, il est possible de retrouver le caractère pulsant du transport solide total comme il avait été indiqué dans la partie résultat. Néanmoins, cette pulsation est simplement présente pour le transport de la charge de fond. L'évolution du transport par suspension graduée lors de la décrue est quant à elle relativement linéaire en dehors d'une valeur qui peut être considérée d'après les données disponibles de deux manières. Soit le transport par saltation réagit de façon linéaire sous un débit de 550 m³/s et fonctionne autrement au-dessus de cette valeur, soit le calcul de cette valeur a été influencé par de mauvais prélèvements de terrain ayant pu récupérer une partie de la charge de fond notamment pour les mesures à 10 cm du lit. La seconde hypothèse semble être la plus probable car l'écart des volumes prélevés à 10 cm et 20 cm est beaucoup plus important que sur les autres journées de cette campagne. Il sera ainsi considéré que sans cette valeur (10 mars), le transport par suspension graduée s'effectue de façon linéaire pendant cette décrue selon une droite d'équation :

$$Q_s(\text{Sus.G}) = 1,31.Q_l - 353 \quad \text{avec } Q_s(\text{Sus.G}) \text{ le débit solide par saltation (m}^3/\text{j), } Q_l \text{ le débit liquide (m}^3/\text{s) et 353 l'ordonnée à l'origine}$$

En suivant cette équation dont le coefficient de corrélation  $R^2$  est égal à 0,82, la valeur critique de mise en mouvement des sédiments par ce mode de transport est de  $270 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cela est en accord avec les valeurs de débits solides calculées à partir des prélèvements de la bouteille de Delft pour le mois de décembre. En effet, si l'on se réfère aux débits fournis par la station hydrométrique de Langeais, le 15 décembre le débit liquide était de  $268 \text{ m}^3/\text{s}$  et pour cette valeur, le débit solide par saltation était extrêmement faible (environ  $15 \text{ m}^3/\text{j}$ , soit 2 % du transport total). Cette tendance a été conservée sur les trois journées de la campagne de décembre et semble confirmer l'ordre de grandeur de la relation établie précédemment et également la présence d'une valeur seuil de transport par suspension graduée aux alentours de  $270 \text{ m}^3/\text{s}$ . Néanmoins, tout ceci reste hypothétique et devra être confronté à d'autres campagnes de mesures pour pouvoir passer du statut de « tendance » à celui de fait « avéré ».

Le dernier paramètre à considérer pour tenter d'expliquer les variations de flux solide, est l'étude de la migration et de l'évolution morphologique des macro et mésoformes du lit.

Comme l'ont montré les résultats bathymétriques, le lit de la Loire se caractérise par des changements morphologiques quotidiens avec des variations d'altitude et des déplacements longitudinaux et/ou transversaux. De part leurs caractéristiques spatiales, les formes du lit (barres, dunes...) influencent fortement ces modifications puisqu'elles sont en perpétuel mouvement. En effet, quel que soit le débit liquide, il a été observé une progradation des différentes unités vers l'aval pouvant atteindre  $10 \text{ m/j}$  pour un débit de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  et étant de l'ordre de  $5 \text{ m/j}$  pour un débit proche de  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ainsi, pour des valeurs de débits très éloignées du débit de plein bord (3 à 6 fois moins) la Loire est ici capable d'évoluer morphologiquement et de véhiculer une charge de fond relativement importante comme l'ont attesté les calculs de débits solides. Les crues ne sont donc pas nécessaires pour observer un charriage important comme il est souvent possible de le lire dans la littérature.

De plus, la présence des formes du lit associée à leur migration semble avoir un impact majeur sur les flux solide observés. En effet, les 16 et 18 mars il a été noté sur le profil longitudinal 502 passant au niveau du talweg, la présence de deux faces amont de dunes au niveau du profil transversal 83. De plus, ces deux journées coïncident avec des valeurs importantes des taux de transport solide dans le talweg très certainement lié à l'association de ces dunes et des deux barres sédimentaires. En effet, ces dernières semblent concentrer les écoulements dans le centre du chenal au fur et à mesure de la décrue, élément également visible pour les bas débits du mois de décembre avec un transport s'opérant uniquement dans cette zone. Dans ces conditions, les taux de transport solide du talweg sont assimilables à l'ensemble du débit solide de la section. A l'opposé, le 19 mars, le profil se trouve dans la partie aval d'une dune et le taux de transport est alors 3 à 4 fois plus faible. Ces observations font penser que les taux de transport solide sont fortement conditionnés par les mouvements des formes du lit et le passage des dunes contribuerait aux fluctuations de ces taux.

A l'échelle de la section, un caractère pulsant de la charge de fond a été mis en évidence pour la période du 16 au 19 mars. Il est tout à fait envisageable que cette caractéristique découle de la migration des formes du lit comme cela vient d'être identifié dans le talweg, zone qui de plus, devient le siège de la majorité du transport pour des bas débits.

L'hydrométrie ainsi que les forces tractrices n'avaient pas permis d'expliquer les variations des taux de transport solide au sein de la section et des difficultés restaient quant à la caractérisation du flux solide global notamment pour le transport par charriage. Ceci est très certainement dû à des facteurs comme la turbulence et à la mobilité du lit précédemment définie. Cette mobilité conditionne de part ses caractéristiques des volumes de sédiments disponibles au transport qui pourront être mobilisés d'autant plus facilement si les forces tractrices sont supérieures aux forces tractrices critiques.

## Conclusion

La présente étude a permis de quantifier pour la première fois à partir de campagnes de mesures de plusieurs jours le transport solide de la Loire sur une même section transversale. Au niveau de la commune de Bréhémont (37), un suivi bathymétrique et l'utilisation d'échantillonneurs iso-cinétiques (BTMA, US BM-54 et bouteille de Delft) ont été utilisés afin de mesurer et d'étudier le transport par charriage et par suspension graduée. Il a ainsi été observé lors d'une décrue, des débits solides non linéaires allant de  $275 \text{ m}^3/\text{j}$  à  $1676 \text{ m}^3/\text{j}$  avec un charriage toujours actif et à l'opposé un transport par suspension graduée très hétérogène selon les périodes. Ainsi, pour les débits liquides les plus bas la saltation représentait environ 10 % du transport total alors qu'elle pouvait en atteindre près de 50 % pour les débits les plus importants. Ce type de transport semble fortement lié au débit liquide et varierait dans le même sens que ce paramètre à partir d'un débit minimal qui a ici été établi à  $270 \text{ m}^3/\text{s}$  et sous réserve de la présence de sédiments mobilisables.

Le charriage serait quant à lui dépendant de la présence et de la mobilité des barres sédimentaires ainsi que des dunes pour les débits liquides observés. L'association des données bathymétriques et des taux de transport a permis de montrer l'existence d'un flux solide plus important dans la partie amont de ces formes ce qui concorde tout à fait avec leur mode de progradation. De plus, la morphologie des dunes et leur position par rapport aux échantillonneurs lors des mesures permettrait d'expliquer les pulsations du transport solide et plus précisément du transport solide par charriage comme cela a été montré durant la seconde semaine de la campagne de mars.

Autre élément important, le flux solide se concentre entre les deux barres sédimentaires au niveau du talweg lorsque les débits deviennent relativement faibles. Cet élément soulève la problématique d'incision du lit en ce lieu notamment durant les périodes d'étiage.

La qualification du transport solide a ici été réalisée à partir des données de dix journées de mesures. Les influences du débit liquide, des variations bathymétriques des formes du lit et des seuils de mise en mouvement des particules mobilisables permettent par des associations complexes d'élaborer le processus complexe de transport sédimentaire. Il est également certain que quel que soit le débit liquide la morphologie du lit de la Loire se modifie. Néanmoins, il serait intéressant de recueillir encore plus de données, avec notamment une campagne sur une dizaine de jours consécutifs afin de valider, réfuter et/ou approfondir les conclusions tirées ici sur les caractéristiques de la dynamique sédimentaire de ce site de Bréhémont. Afin que ces caractéristiques soient complètes, un travail lors d'une montée de crue semble également indispensable pour bien comprendre le milieu. Un travail en période d'étiage pourrait également être intéressant notamment pour valider les observations de concentration du flux solide dans le talweg pour les bas débits.

Par la suite, il serait judicieux de mener le même type de travail sur d'autres sites de la Loire moyenne afin de montrer jusqu'à quelle échelle sont exportables les quantifications et qualifications du transport solide d'une zone ponctuelle de la Loire.

## Bibliographie

**Andriamahefa, H.** 1999. Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versant, Thèse, Université Jean Monnet-Saint Etienne, Cemagref BEA/LHQ.

**Bacchi, M.** 2000. Structure et dynamique des peuplements macrobenthiques en Loire. Impact des facteurs hydrologiques et sédimentaires, Thèse, Université de Tours.

**Boiten, W.** 2003. Hydrometry. A.A. Balkema Publishers, Lisse.

**Bravard, J.P., Petit, F.** 1997. Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris.

**Brookes, A.** 1988. Channelized rivers, perspectives for environmental management. Wiley, New-York.

**Deleplancque, B.** 2010. Evaluation du transport solide de la Loire en période de crue, par les biais d'échantillonnages, Mémoire L3 STUE, Université de Tours – Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire ISTO – Faculté des Sciences et Techniques de Tours.

**Dury, G.H.** 1969. Relation of morphometry to runoff frequency, in **Bravard, J.P., Petit, F.** 1997. Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris.

**Folk, R.L., Ward, W.C.** 1957. Brazos river bar : a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 27, No. 1, 3-26.

**Gautier, J.N., Rodrigues, S., Peters, J.J., Jugé, P.** 2007. Transport solide en Loire moyenne lors des crues, Justification des mesures in situ et quantification. SHF : « Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains », Paris, 28-29 novembre 2007.

**Kleinhans, M.G., Ten Brinke, W.B.M.** 2001. Accuracy of Cross-Channel Sampled Sediment Transport in Large Sand-Gravel-Bed Rivers. Journal of hydraulic engineering/April 2001, 258-269.

**Larras, J.** 1972. Hydraulique et granulats, Eyrolles, Paris.

**Larras, J.** 1977. Fleuves et rivières non aménagés. Eyrolles, Paris.

**Leopold, L.B., M.G. Wolman, and J.P. Miller.** 1964. Fluvial Processes in Geomorphology. W. H. Freeman, New York.

**Malavoi, J.R., Souchon, Y.** 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. Bull. Fr. Pêche Piscic. (2002) 365/366, 357-372.

**Petit, F.** 1990. Evaluation des forces tractrices critiques de la charge caillouteuse : expérience en flume et observations en rivières naturelles. IAHS Publ.no.194, 1990, 263-271.

**Petit, F., Hallot, E., Houbrechts, G., Mols, J.** 2005. Evaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et de haute Belgique. Bulletin de la société géographique de Liège, 46, 2005, 37-50.

**Rambault, C.** 2007. Etude du transport solide par charriage lors d'un épisode de crue en Loire moyenne sur le site de Bréhémont (37), Mémoire L3 STUE, Université de Tours - Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire GÉEAC - Faculté des Sciences et Techniques de Tours.

**Roberts, E.R.** 1989. Flood frequency and urban induced channel change : some British examples, in **Bravard, J.P., Petit, F.** 1997. Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris.

**Rodrigues, S.** 2004. Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France), Thèse, Université de Tours.

**Rodrigues, S.** 2009. Support de cours, Transport solide en domaine alluvial – Processus et Quantification.

**Rodrigues, S., Bréhéret., J.G, Macaire., J.J, Moatar, F., Nistoran, D., Jugé, P.** 2005. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river : The Loire River (France). Sedimentary Geology, 186 : 89-109.

**Shields, A.** 1936. Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Mitteilung der preussischen versuchsanstalt fur wasserbau und schiffbau, Berlin.

**Ven Te Chow.** 1959. Open-channel Hydraulics. Mc Graw Hill Book Compagny, Caldwell-New Jersey.

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : La Loire d'amont en aval .....	5
<b>Figure 2</b> : Site d'étude. Sur cette figure sont visibles les deux transects (PT83 et PL502) où ont été réalisées les différentes mesures et prélèvements qui serviront dans la suite de ce rapport. ....	6
<b>Figure 3</b> : Hydrogramme de la Loire à Langeais.....	7
<b>Figure 4</b> : Vue aérienne (2005) du site d'échantillonnage. Le profil longitudinal 502 passe au niveau de la verticale 4 dans la partie centrale du chenal. ....	8
<b>Figure 5</b> : Echantillonneurs du transport solide.....	9
<b>Figure 6</b> : Zones d'influences des prélèvements par BTMA et Delft sur chacune des verticales du profil PT83 .....	12
<b>Figure 7</b> : Profils bathymétriques de PT83 durant la campagne de décembre .....	17
<b>Figure 8</b> : Profils bathymétriques de PT83 durant la campagne de mars (1 <sup>ère</sup> semaine) .....	17
<b>Figure 9</b> : Profils bathymétriques de PT83 durant la campagne de mars (2 <sup>ème</sup> semaine).....	18
<b>Figure 10</b> : Profils bathymétriques de PL502 durant la campagne de mars (1 <sup>ère</sup> semaine).....	19
<b>Figure 11</b> : Profils bathymétriques de PL502 durant la campagne de mars (2 <sup>ème</sup> semaine)....	19
<b>Figure 12</b> : Débits liquides unitaires durant la campagne de mars sur PT83 .....	20
<b>Figure 13</b> : Evolution des débits liquides lors de la campagne de décembre et campagne de mars, 1 <sup>ère</sup> et 2 <sup>ème</sup> semaine .....	21
<b>Figure 14</b> : Débits solides unitaires totaux durant la campagne de décembre sur PT83 .....	22
<b>Figure 15</b> : Débits solides unitaires totaux durant la campagne de mars (1 <sup>ère</sup> semaine) sur PT83 .....	23
<b>Figure 16</b> : Débits solides unitaires totaux durant la campagne de mars (2 <sup>ème</sup> semaine) sur PT83 .....	23
<b>Figure 17</b> : Débits solides totaux journaliers obtenus à partir des prélèvements de terrain (BTMA et Delft).....	24
<b>Figure 18</b> : $D_{50}$ et $D_{90}$ moyens par verticale des échantillons prélevés avec le BTMA et l'USBM .....	25
<b>Figure 19</b> : Fréquence des classes granulométriques pour un échantillon bien trié (BTMA V1.4) et un échantillon mal trié (USBM V1.1).....	26
<b>Figure 20</b> : Evolution des forces tractrices lors de la campagne de mars.....	28
<b>Figure 21</b> : Forces tractrices critiques sur chaque verticale durant les journées de la campagne de mars ayant subies l'analyse granulométrique.....	29
<b>Figure 22</b> : Evolutions des débits solides unitaires en fonction de $\tau_0$ (a) et en fonction du rapport $\tau_0/\tau_c$ (b) .....	30
<b>Figure 23</b> : Evolution du transport solide au cours de la décrue de mars.....	31

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Débits caractéristiques déterminés à Langeais.....	7
<b>Tableau 2</b> : Puissances spécifiques calculées au niveau de PT83 pour chaque journée de la campagne de mars .....	27
<b>Tableau 3</b> : Vitesses de cisaillement et forces tractrices sur chaque verticale durant la campagne de décembre .....	27
<b>Tableau 4</b> : Forces tractrices (2 <sup>ème</sup> méthode) durant la campagne de mars.....	29

# **Annexes**

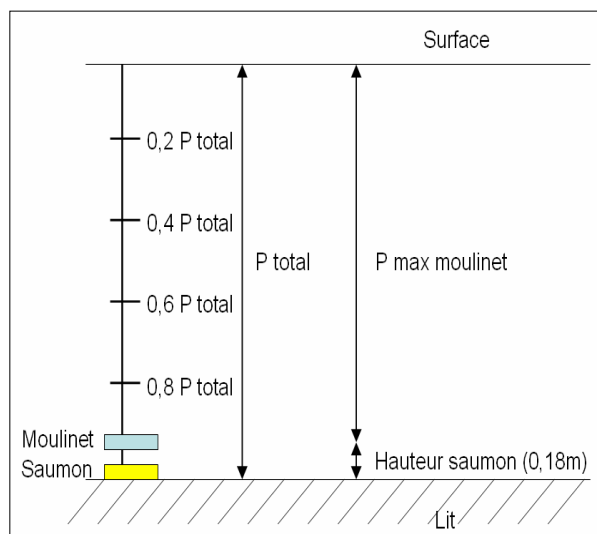


# Tables des matières

Tables des matières .....	I
<b>Annexe 1</b> : Protocole de terrain selon la méthode d'exploration du champ des vitesses .....	II
<b>Annexe 2</b> : Calcul d'un débit unitaire selon un profil des vitesses .....	II
<b>Annexe 3</b> : Proposition d'analyse granulométrique de sédiments .....	III
<b>Annexe 4</b> : Etude des zones d'érosion et de dépôt au niveau du profil transversal 83 entre le 09/03 et le 19/03 .....	VI
<b>Annexe 5</b> : Profil longitudinal 502 le 13/03/10 .....	X
<b>Annexe 6</b> : Débits liquides unitaire de la campagne de décembre .....	X
<b>Annexe 7</b> : Résultats des calculs de débits solides unitaires du transport par charriage (BTMA) et du transport par saltation (Delft) .....	XI
<b>Annexe 8</b> : Triangles des textures des journées traitées granulométriquement .....	XIV
<b>Annexe 9</b> : Etude du tri granulométrique des échantillons traités .....	XV
<b>Annexe 10</b> : Comparaison de l'hydrométrie et du transport solide .....	XVII

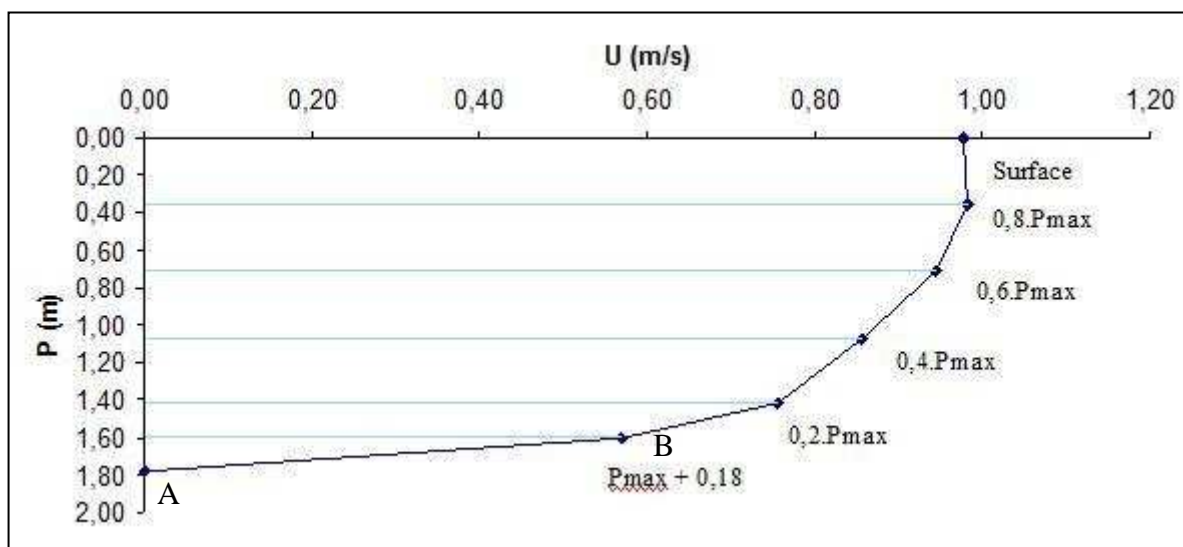
## Annexe 1 : Protocole de terrain selon la méthode d'exploration du champ des vitesses

### Etapes à suivre :



- 1) Mettre l'hélice du moulinet au niveau de la surface de l'eau.
- 2) Mettre le compteur du treuil à 0.
- 3) Descendre le saumon sur le fond du lit.
- 4) Lire la Profondeur maximale ( $P_{max}$ ) du moulinet ex: 1,80m
- 5) Calculer la profondeur totale,  $P_{totale} = P_{max} \text{ moulinet} + \text{Hauteur saumon} = P_{max} \text{ moulinet} + 0,18 \text{ m}$   
ex:  $P_{totale} = 1,80 + 0,18 = 1,98 \text{ m}$
- 6) Mesurer 6 fois la vitesse pour  $P_{max}$  moulinet (sans changer la profondeur de l'appareillage)
- 7) Remonter le moulinet à  $0,8 \cdot P_{totale}$  ex:  $0,8 \cdot 1,98 = 1,58$
- 8) Mesurer 6 fois la vitesse à  $0,8 \cdot P_{totale}$   
Continuer l'opération jusqu'à la surface en passant par  $0,6 \cdot P_{totale}$ ,  $0,4 \cdot P_{totale}$  et  $0,2 \cdot P_{totale}$ .

## Annexe 2 : Calcul d'un débit unitaire selon un profil des vitesses



A partir de ce type de graphique il est possible de calculer l'aire entre chaque ligne avec la formule donnée dans l'exemple suivant. Toutes additionnées, ces aires permettent d'obtenir le débit unitaire ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) sur la verticale étudiée.

Exemple du calcul de la surface du fond à  $P_{max} + 0,18$  où le fond sera noté A et  $P_{max} + 0,18$  sera noté B :

$$S = ((x_B - x_A)/2) \cdot (y_A - y_B)$$

## Annexe 3 : Proposition d'analyse granulométrique de sédiments

### Préparation des échantillons :

#### *Séchage et prise d'essai*

La première étape consiste à disposer les échantillons dans les coupelles d'analyses pour séchage à l'étuve (110+/- 5°C).

#### *Séparation fractions fines et grossières*

Une séparation (à 0,050 mm) en 2 populations de grains sera effectuée pour différencier **les fractions grossières** (traitées par mesure directe et tamisage) **des fractions fines** (analysées par microgranulométrie laser). La méthode employée pour séparer les deux fractions est celle du **trempe (24h)**, du **bain d'ultra-sons** (séparation des particules collées) et du **lavage** (ou tamisage mouillé) **sur tamis de 0,050 mm**. Un aliquote représentatif de l'échantillon (25 à 400 g selon le degré d'hétérogénéité du sédiment) est lavé sur un tamis de 0,050 mm. Le refus de tamis résultant est ensuite séché pour l'analyse des fractions grossières alors que les particules de taille inférieure à 0,050 mm peuvent faire l'objet d'une analyse microgranulométrique.

#### *Séparation carbonates/fraction détritique terrigène et matière organique*

Préalablement à l'analyse il peut s'avérer nécessaire de préparer les échantillons prélevés du point de vue des carbonates et de la matière organique. Les alluvions de Loire sont de nature majoritairement siliceuse sur la partie moyenne du fleuve, les carbonates et les oxydes ne représentant qu'une part négligeable. Aucun traitement de décarbonatation ne nous semble donc nécessaire<sup>1</sup>.

La matière organique, bien que présente, ne représente qu'un très faible pourcentage en poids. Son impact sur l'établissement des courbes de fréquences cumulées est donc négligeable<sup>2</sup>.

### Analyse granulométrique :

Les particules sédimentaires présentes dans les chenaux sont majoritairement des rudites et des arénites. Les pelrites ou lutites sont présentes en très faible quantité et se localisent le plus souvent sur les îles ou au sein de dépressions topographiques où une décantation est survenue.

La dominance des fractions grossières dans les chenaux étudiés justifie un degré de précision important dans les mesures propres à ce domaine granulométrique. A l'inverse, les fractions plus fines (< 0.040 mm) seront quantifiées mais leur étude ne sera pas entreprise en détail<sup>3</sup>.

L'analyse granulométrique des galets et graviers (50 à 2,5 mm) sera effectuée par tamisage sur cribles alors que la dernière classe de graviers (2 mm) et les sables (1,6 à 0,05 mm) feront l'objet d'un tamisage mécanique (Ro-Tap). La colonne de tamis utilisée correspond à la série **NFX11-504** pour laquelle la progression géométrique entre tamis consécutifs est  $r = 10$  racine de 10 (Rivière, 1977, p 4). Ceci signifie que le rapport entre le vide de maille d'un tamis et celui de maille immédiatement inférieure est égal à 1,2589. **La colonne de tamis utilisée dans cette étude se décompose en 4 sous – colonnes (tableau 1) et regroupe l'ensemble des tamis AFNOR compris entre les galets (maille 50 mm) et les fines (maille 0.050 mm)**. Une fois séché le sédiment issu du lavage est déposé dans la première partie de la colonne. Une fois le tamisage effectué (**15 min**) les particules ayant traversé la totalité de la colonne 1 sont déposées dans la colonne 2 agitées également pendant 15 min, etc...

<sup>1</sup> Si c'était le cas une attaque HCL peut être envisagée.

<sup>2</sup> Une attaque H2O2 ou perte au feu peut être envisagée si nécessaire.

<sup>3</sup> Sauf si la proportion de fine représente plus de 15% de l'échantillon global.

Taille (mm)	Numéro colonne	Classe
50	Colonne 1	Galets
40		
31.5		
25		
20		
16	Colonne 2	Graviers
12.5		
10		
8		
6.3		
5		
4	Colonne 3	Graviers
3.15		
2.5		
2		
1.6		
1.25		
1	Colonne 4	Sables grossiers
0.8		
0.63		
0.5		Sables moyens
0.4		
0.315		
0.25	Colonne 5	Sables fins
0.2		
0.16		
0.125		Silts et Argiles
0.1		
0.08		
0.063		
0.05		
0.04		

**Figure 1 : Classes granulométriques retenues pour la présente étude**

Le temps de tamisage retenu est issu de la littérature : 10-15-25 min (Folk, 1974 ; Griffiths, 1967, p 35 ; Rivière, 1977). Les particules analysées étant assez grossières, leur séparation en classes est assez rapide et ne nécessite pas une durée de tamisage importante. La nature siliceuse du matériau analysé ici minimise le phénomène de fracturation des grains ; les ultras fins de tamisage (grains susceptibles de passer le tamis 0,050 mm lors du tamisage) résultent plutôt d'une action capillaire au cours du lavage sur tamis de 0,050 mm. Cette population, souvent négligeable, sera ultérieurement ajoutée à celle des éléments fins de la suspension (Rivière, 1977).

Le résidu de chaque tamis est ensuite pesé et reporté sur la feuille de résultats.

### **Présentation des résultats et traitement des données (facultatif) :**

La granulométrie renseigne sur la composition d'un sédiment mais elle apporte également des éléments de compréhension relatifs à l'hydrodynamisme de mise en place de ces sédiments. Pour ce faire, il est nécessaire d'interpréter les résultats : cette interprétation est le plus souvent graphique. Le diagramme ternaire renseigne sur la composition de l'échantillon (% de graviers, de sables, de silts + argiles) comme l'histogramme de répartition qui permet de donner une vue d'ensemble de l'échantillon analysé ainsi que des indications sur son degré d'hétérométrie. L'histogramme est un graphique en barres dans lequel les classes de diamètres apparaissent en abscisse et les pourcentages représentés par chaque classe en ordonnée. Cette méthode simple ne permet pas toutefois la détermination de paramètres statistiques tels que la médiane, indice de classement, etc... La méthode

la plus répandue est celle de la courbe de fréquence cumulée où l'abscisse correspond aux diamètres des grains (dimension des mailles des tamis) et où l'ordonnée correspond à la masse totale cumulée. Les pourcentages cumulés sont obtenus de la manière suivante : le pourcentage retenu par le tamis le plus grossier est reporté à la dimension de maille correspondante, puis la somme des deux premiers tamis est reportée à la seconde dimension de maille, le troisième point résulte de la somme des pourcentages des trois premiers tamis... Ceci jusqu'à ce que 100% soit atteint. Ce mode de représentation (abscisse évoluant des grossiers vers les fins) est une convention chez les géologues qui diffère de l'ingénierie civile (McManus *in* Tucker, 1988). L'échelle de l'axe des ordonnées est arithmétique alors que celui des abscisses peut être logarithmique (taille en mm) ou arithmétique (taille en indice  $\phi^4$ ) (Folk, 1974). L'échelle millimétrique est plus éloquente mais certains indices « abstraits » sont plus aisément appréciables en échelle  $\phi$  (Brossé, 1982).

## Les indices :

Deux types de méthodes de détermination des indices existent :

- graphique (Folk, 1974, p.42 ; Brossé, 1982, p 54) ;
- méthode des moments (Folk, 1974, p. 42, McManus *in* Tucker, 1988, p. 79, Rivière 1977, p 38).

Dans cette étude la méthode graphique Folk et Ward (1957) est retenue. Bien que la méthode des moments soit intéressante car chaque grain du sédiment affecte la mesure (Folk, 1974, p 45) son calcul implique que la dispersion granulométrique soit connue en totalité dans l'intervalle 0-100 du pourcentage cumulatif (Rivière, 1977, p. 40). Or pour le cas où les échantillons comportent une fraction fine non mesurée (< 0.050 mm) des incertitudes sont susceptibles de survenir.

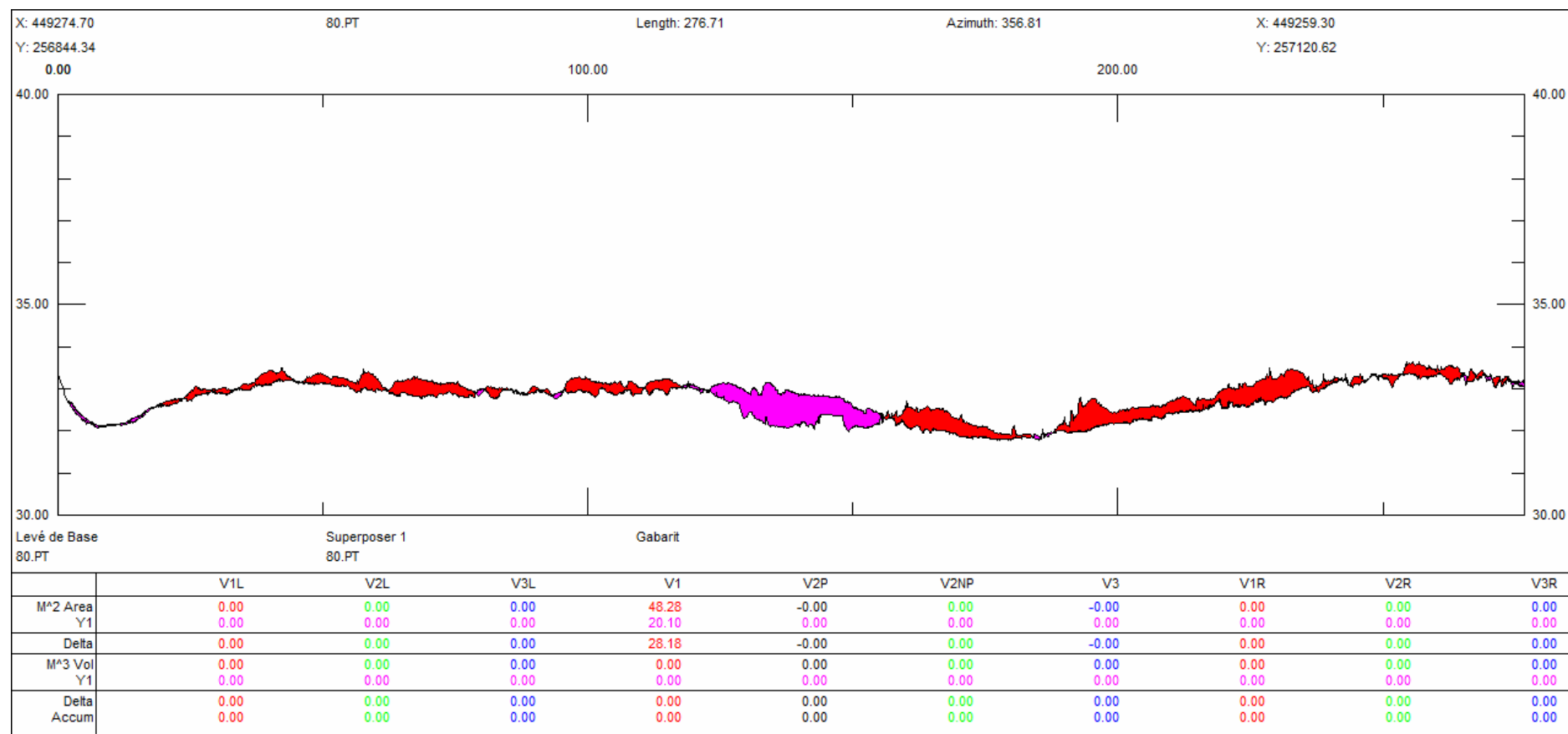
## Références bibliographiques :

- Brossé, R. (1982). Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire. Laboratoire de géologie sédimentaire. Angers, Université d'Angers: 350p.
- Dupain, R., Lanchon, R., Saint-Arroman, J.C. (2000). Granulats, sols, ciments et bétons. Educavivre, Coll. A. Capliez, 236 p.
- Folk, R. L. (1974). Petrology of sedimentary rocks. Austin, Hemphill Publishing compagny, 184 p.
- Griffiths, J. C. (1967). Scientific method in analysis of sediments. New-York, McGraw-Hill Book Compagny, 508 p.
- McManus, J. (1988). Grain size determination and interpretation. Techniques in sedimentology. M. Tucker. Oxford, Blackwell Scientific Publications: 394 p.
- Rivière, A. (1977). Méthodes granulométriques : techniques et interprétations. Paris, Masson, 170 p.

---

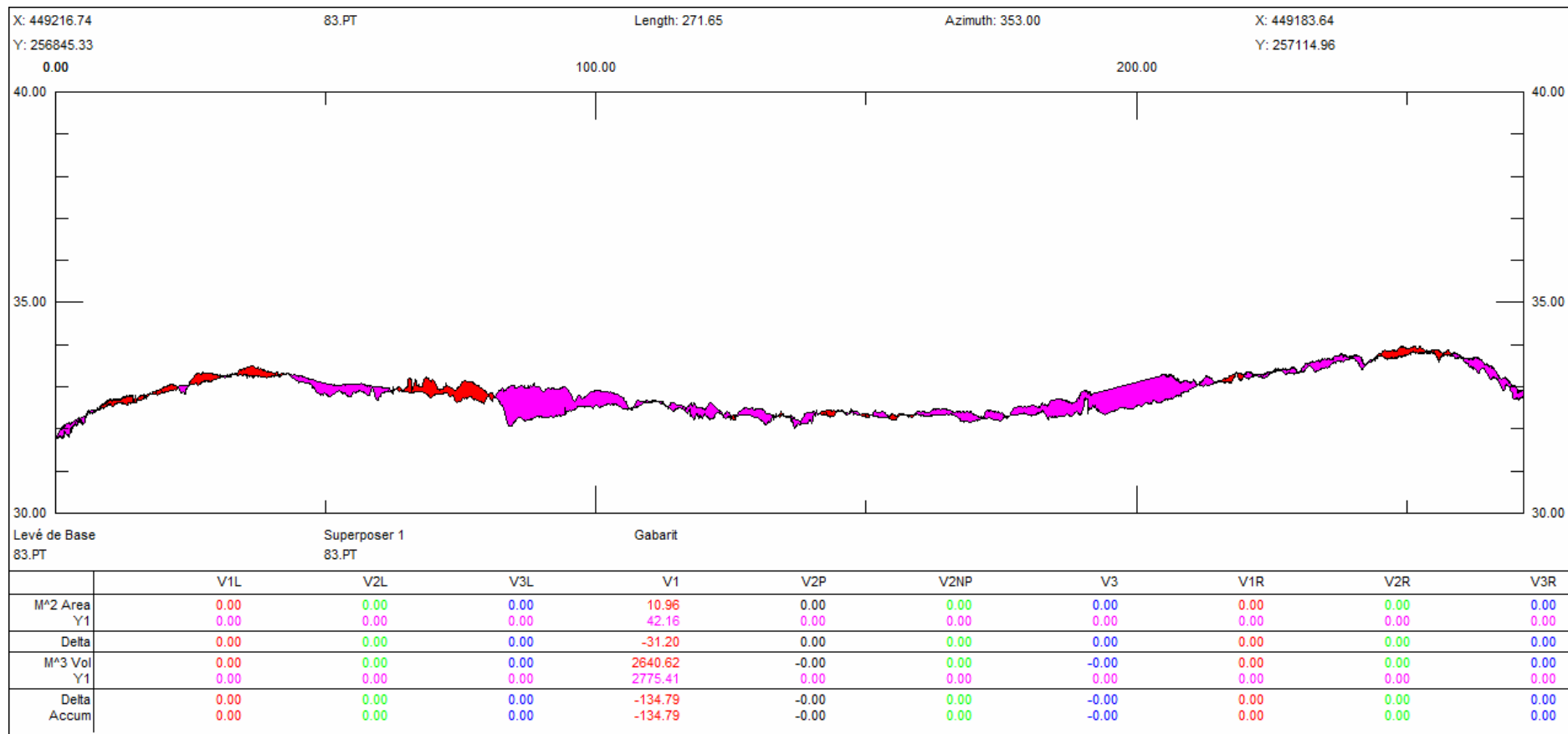
<sup>4</sup>  $\phi = -\log_2 d/d_0$

#### Annexe 4 : Etude des zones d'érosion et de dépôt au niveau du profil transversal 83 entre le 09/03 et le 19/03

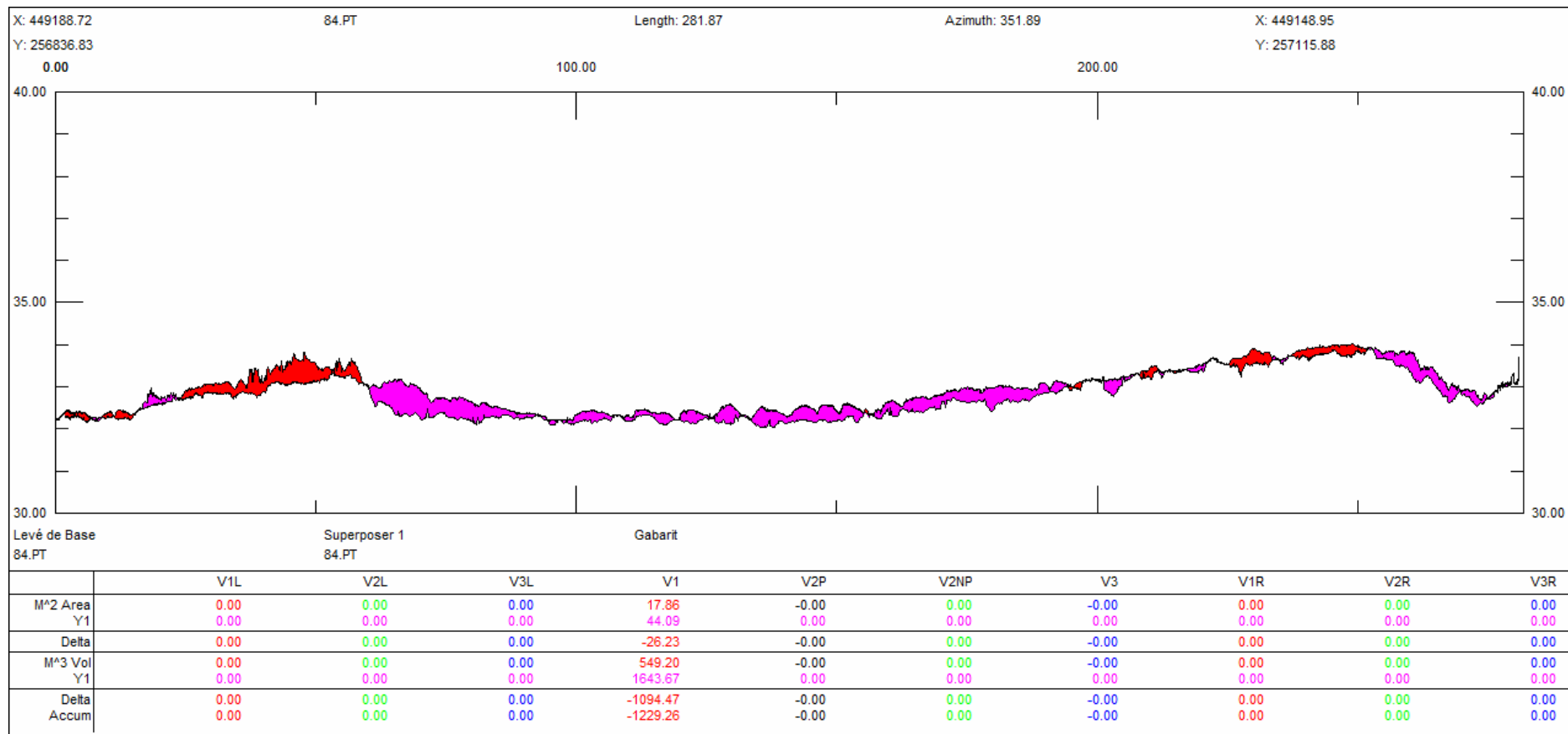


a. Profil transversal 80 en amont de PT83





b. Profil transversal 83 (PT83)



c. Profil transversal 84 en aval de PT83

- La première figure illustre les différences bathymétriques du profil transversal 80 situé en amont du 83 entre les journées du 9 et du 19 mars. Les zones en rouge correspondent au dépôt sédimentaire qui s'est opéré durant cette période alors que les zones en rose correspondent à l'érosion sédimentaire. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas eu d'érosion dans les zones rouge durant ce laps de temps mais simplement qu'elle y a été déficitaire par rapport au dépôt. Le même raisonnement est valable pour les zones d'érosion.

De façon très nette, trois ensembles se dégagent sur cette figure avec deux zones latérales de dépôt et une zone centrale d'érosion. Ce profil étant peu éloigné de PT83, on considère sa morphologie comme similaire ce qui est d'ailleurs relativement bien visible avec les deux barres sédimentaires latérales, la présence du talweg central et de la mouille contre la rive droite. Ainsi, les zones de dépôt se situent principalement sur les deux barres et dans la mouille droite alors que l'érosion s'opère principalement dans le talweg et sur le bas de la barre latérale gauche sur une zone représentant environ  $\frac{1}{4}$  de la section.

- La seconde figure illustre les différences bathymétriques du profil transversal 83 entre les journées du 9 et du 19 mars. La lecture de cette figure s'effectue de la même façon que la précédente.

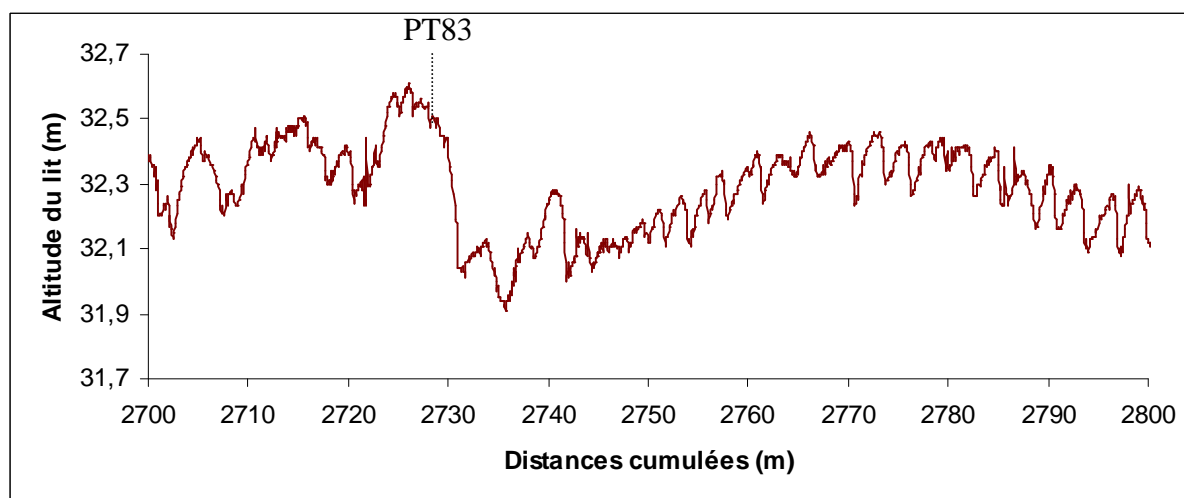
Tout comme pour PT80, les zones de dépôts sont situées au niveau des barres sédimentaires et la zone d'érosion au niveau du talweg et de la mouille droite qui était elle précédemment plus sensible au dépôt. Néanmoins, la zone d'érosion est ici beaucoup plus étendue en terme de surface et occupe environ  $\frac{3}{4}$  de la section alors que les zones de dépôts sont situées aux sommets des deux barres.

- La dernière figure illustre les différences bathymétriques du profil transversal 84 situé en aval de PT83 entre les journées du 9 et du 19 mars. La lecture de cette figure est toujours identique aux précédentes.

Globalement, la situation est la même que sur PT83 avec un dépôt sur les zones hautes des barres et une érosion dans le centre du chenal et la mouille droite toujours sur environ  $\frac{3}{4}$  de la section.

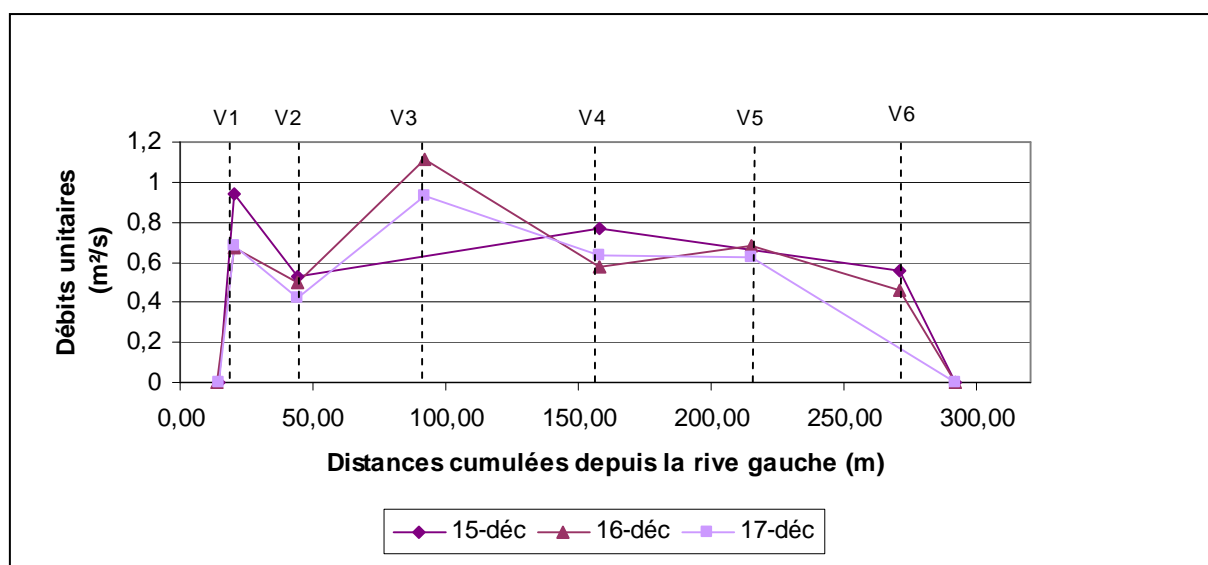
De façon générale, il est possible de dire que durant la période d'étude, les barres sédimentaires et le talweg ont une balance sédimentaire opposée avec majoritairement du dépôt sur les sommets des barres et de l'érosion dans le talweg, la partie basse des barres et dans une moindre mesure au niveau de la mouille de droite.

## Annexe 5 : Profil longitudinal 502 le 13/03/10



Le 13 mars, une barre sédimentaire avec un front de progradation de 80 cm de haut est arrivée au niveau de PT83. Cette barre possède des sous unités (dunes) de 5 à 10 m de long et 20 à 30 cm de haut sur la partie visible. A l'intérieur de ces sous unités, on peut également observer d'autres unités encore plus petites qui font une longueur d'environ 1m et une hauteur de quelques centimètres.

## Annexe 6 : Débits liquides unitaire de la campagne de décembre



Du 15 au 17 décembre, il est possible de dire que les débits liquides unitaires sont restés relativement constants aussi bien d'un point de vue quantitatif que spatial. En effet, on observe quelle que soit la journée une valeur relativement forte (0,7 à 0,9 m²/s) dans la mouille gauche puis une baisse significative sur la barre gauche aux alentours de 0,5 m²/s. Ensuite la courbe remonte proche de 1 m²/s sur la fin de cette barre avant de redescendre sur dans le talweg proche de 0,6 m²/s et de légèrement décroître jusqu'à la fin de la mouille droite.

## Annexe 7 : Résultats des calculs de débits solides unitaires du transport par charriage (BTMA) et du transport par saltation (Delft)

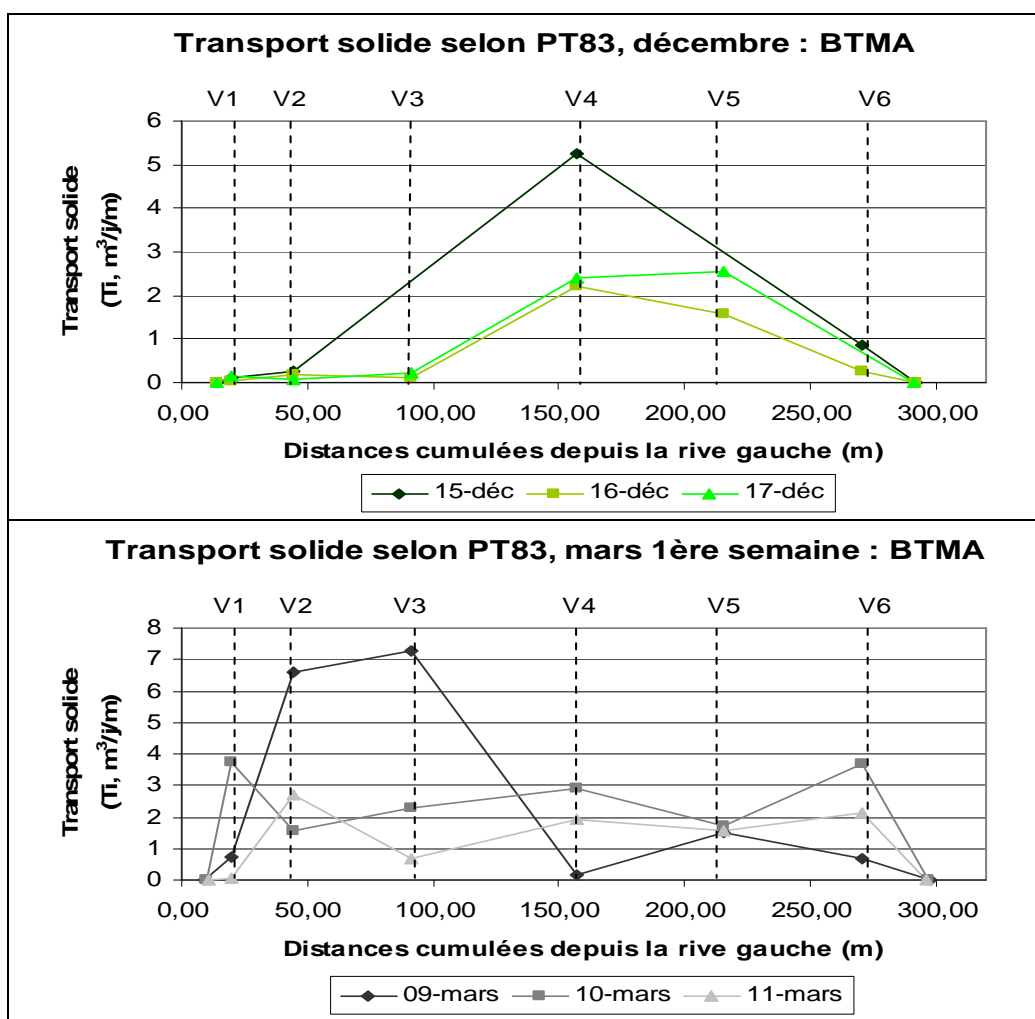
### ○ Transport par charriage

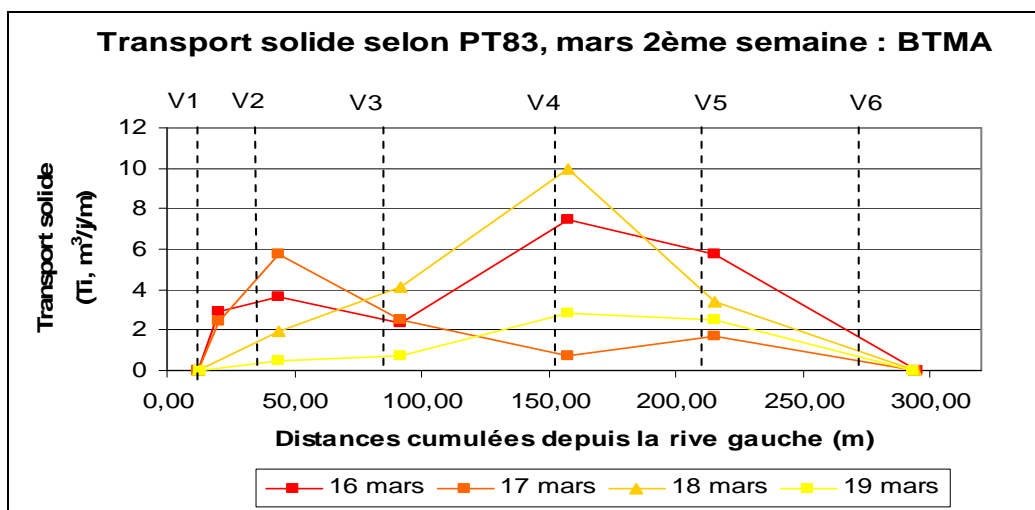
Selon les graphiques de la page suivante :

Durant la campagne de décembre, les valeurs importantes de transport obtenues à partir des prélèvements du BTMA sont concentrées au niveau de V4 (talweg) et dans une moindre mesure en contrebas de la barre sédimentaire de droite. La valeur maximale, obtenue le 15 décembre sur V4, dépasse légèrement les  $5 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ . La partie droite du chenal est caractérisée par une quasi absence de transport par charriage.

Durant la première semaine de la campagne de mars, les taux de transport sont les plus importants (environ  $7 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ ) au niveau de la barre de gauche le 9 mars et sont assez homogènes les 10 et 11 mars avec des valeurs proches de 2 à  $3 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$  sur l'ensemble du profil.

Durant la seconde semaine de la campagne de mars, les taux de transport solide sont importants dans le talweg pour les journées du 16 et du 18 mars (environ 8 et  $10 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ ), moins important mais majoritaires sur la barre de gauche le 17 mars et encore moins important le 19 mars avec des débits unitaires maximaux (environ  $2,5 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ ) au niveau du contrebas de la barre de droite à proximité du talweg.





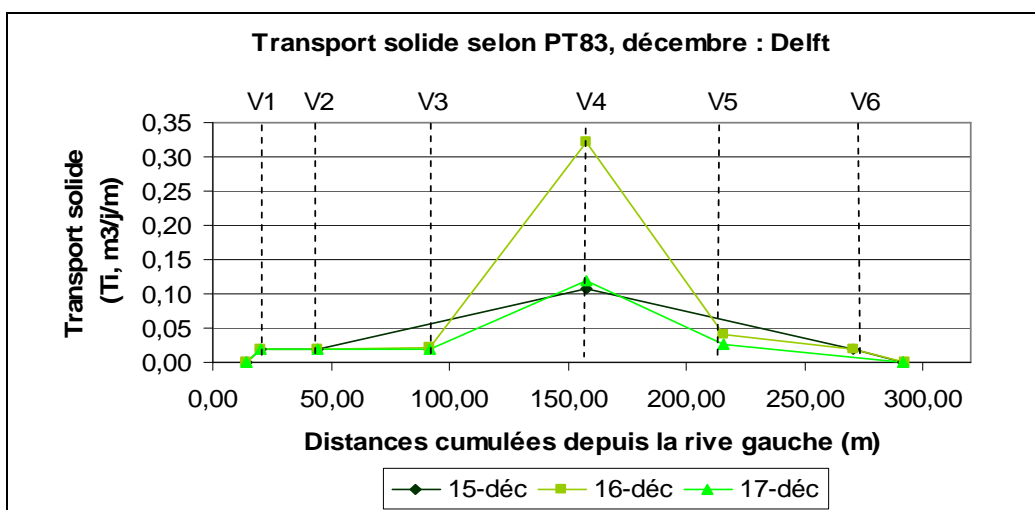
○ **Transport par suspension graduée (saltation)**

Selon les graphiques de la page suivante :

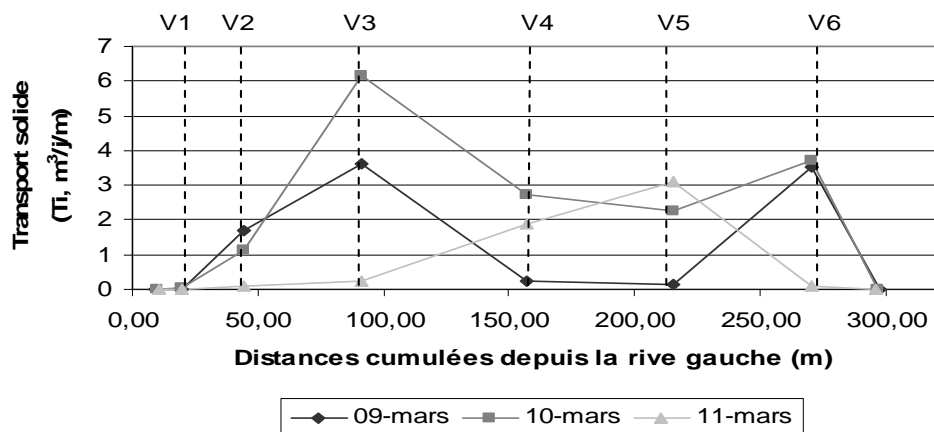
Durant la campagne de mars, les taux de transport calculés à partir des prélèvements de la bouteille de Delft sont très faibles voir quasi nul avec néanmoins des valeurs maximales (entre 0,1 et 0,3 m<sup>3</sup>/j/m) sur V4 (talweg) pour chaque journée.

Durant la première semaine de la campagne de mars, les taux de transport sont importants sur les deux barres les 9 et 10 mars (> 3 m<sup>3</sup>/j/m et un maximum de 6 m<sup>3</sup>/j/m sur la barre de gauche le 10 mars) et assez importants seulement en contrebas de la barre de droite à proximité du talweg le 11 mars.

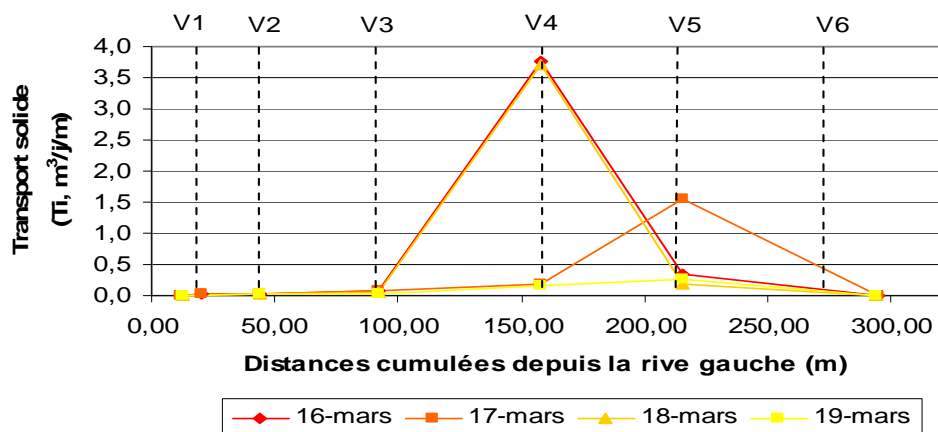
Durant la seconde semaine, les taux de transport sont importants (3,5 m<sup>3</sup>/j/m) sur V4 (talweg) les 16 et 18 mars et presque nuls ailleurs pour ces mêmes dates. Ils sont relativement importants en contrebas de la barre de droite non loin du talweg le 17 mars (faibles ailleurs) et très faibles sur l'ensemble de la section le 19 mars (< 0,5 m<sup>3</sup>/j/m).



**Transport solide selon PT83, mars 1ère semaine : Delft**

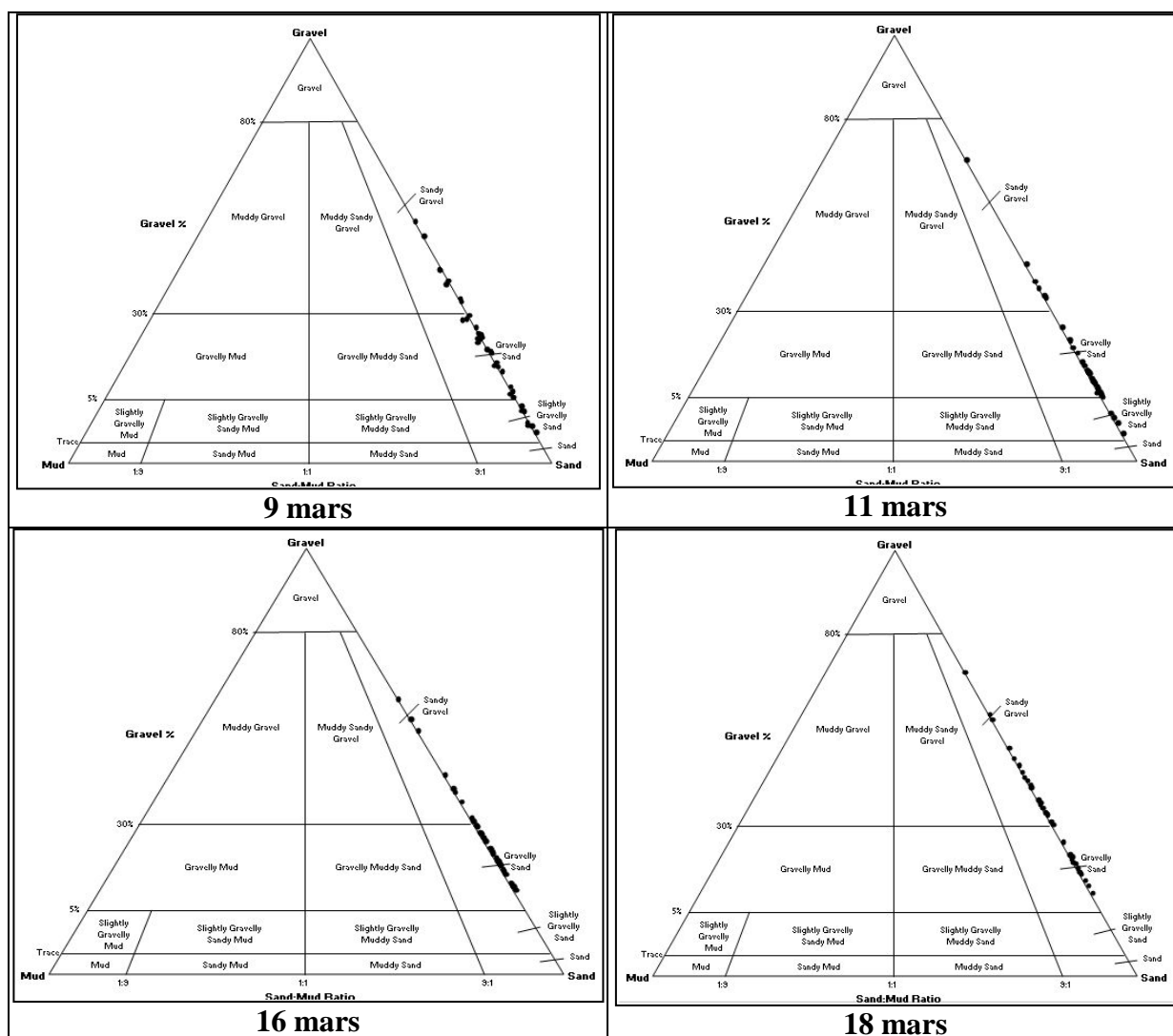


**Transport solide selon PT83, mars 2ème semaine : Delft**



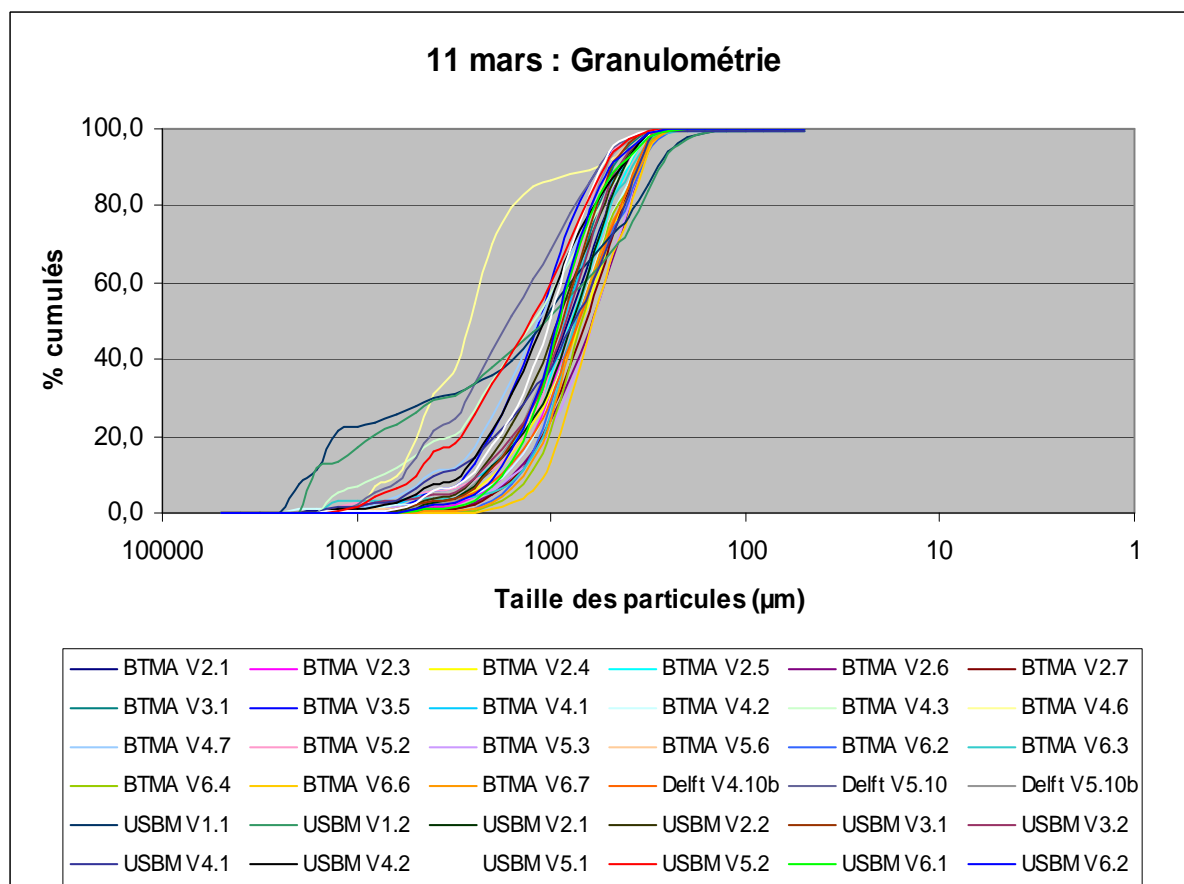
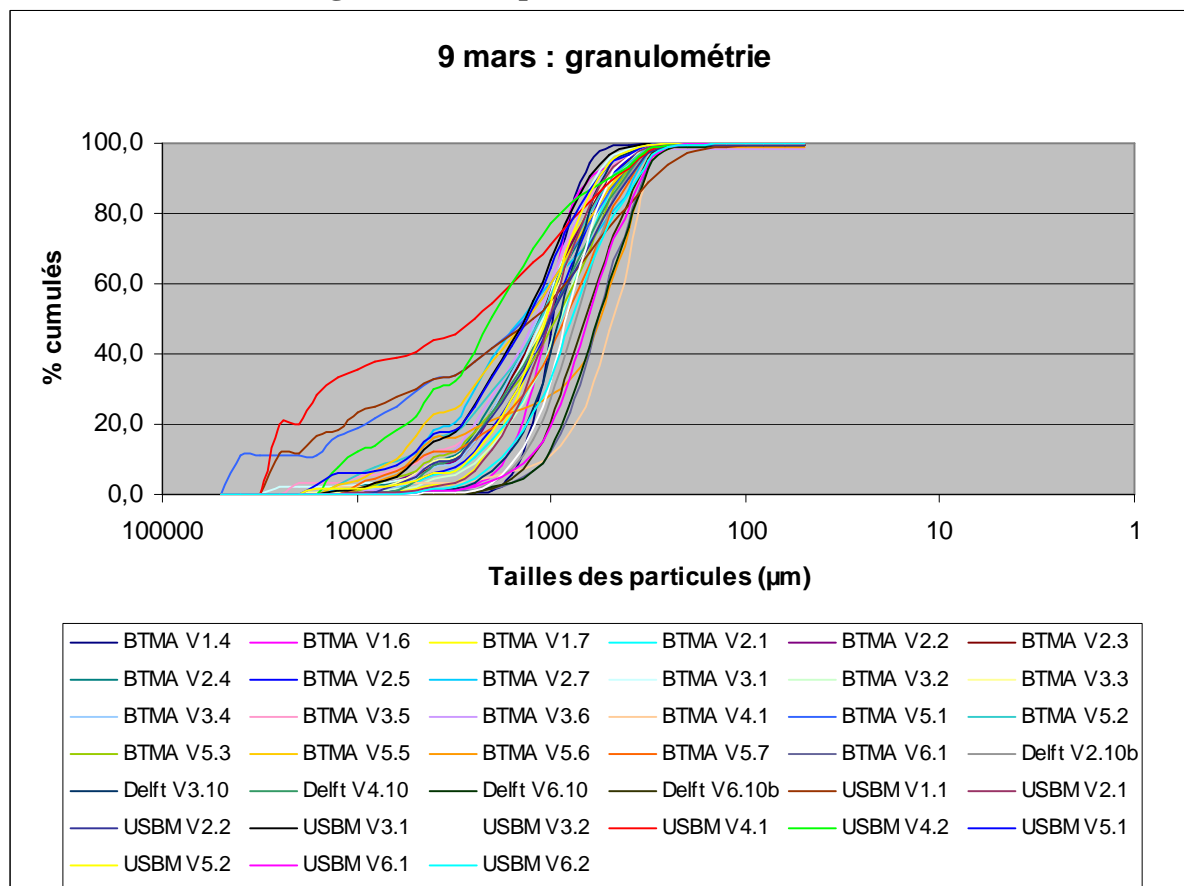


## Annexe 8 : Triangles des textures des journées traitées granulométriquement

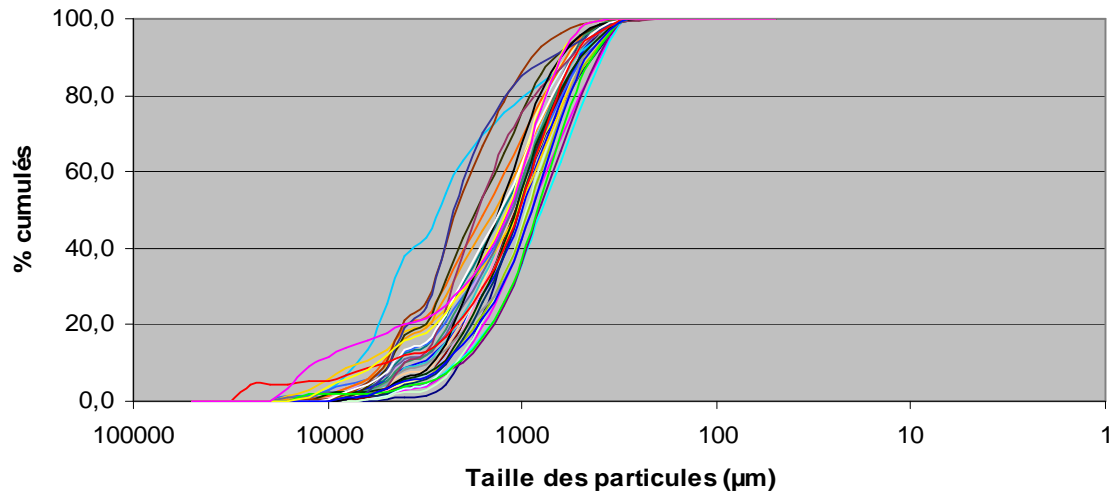


Sur les quatre journées traitées, les différents échantillons se répartissent dans trois classes de texture : sablo faiblement graveleuse, sablo graveleuse et gravelo sableuse. Ceci correspond bien aux caractéristiques du lit de la Loire en Loire moyenne.

## Annexe 9 : Etude du tri granulométrique des échantillons traités

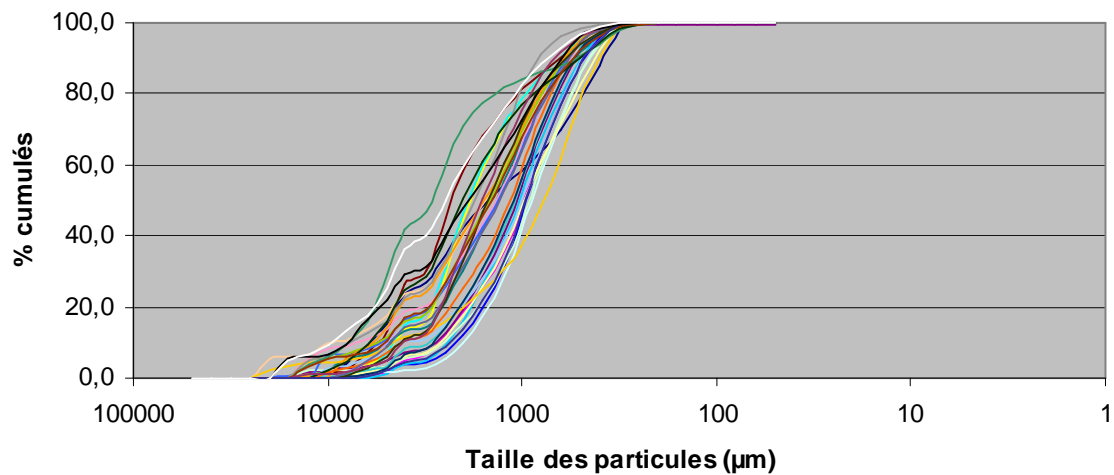


### 16 mars : Granulométrie



BTMA V1.1	BTMA V1.3	BTMA V1.4	BTMA V1.5	BTMA V1.6	BTMA V2.2
BTMA V2.4	BTMA V2.5	BTMA V2.6	BTMA V3.1	BTMA V3.3	BTMA V3.5
BTMA V3.6	BTMA V3.7	BTMA V4.1	BTMA V4.2	BTMA V4.3	BTMA V4.4
BTMA V4.5	BTMA V4.6	BTMA V5.1	BTMA V5.2	BTMA V5.3	BTMA V5.5
BTMA V5.6	BTMA V5.7	Delft V4.10b	USBM V1.1	USBM V1.2	USBM V2.1
USBM V2.2	USBM V3.1	USBM V3.2	USBM V4.1	USBM V4.2	USBM V4.3
USBM V5.1	USBM V5.2				

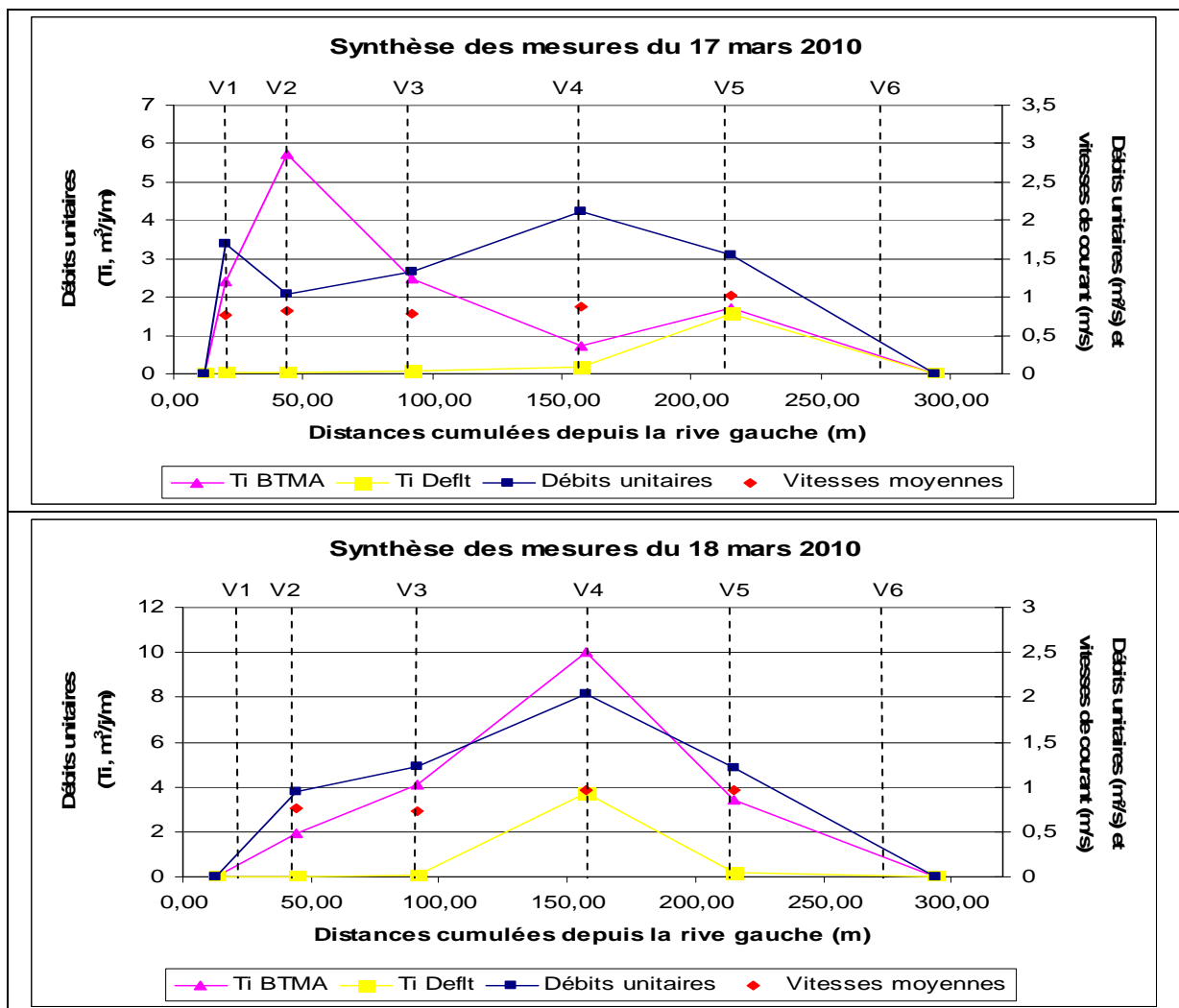
### 18/03/10 : Granulométrie



BTMA V2.1	BTMA V2.3	BTMA V2.4	BTMA V2.5	BTMA V2.6	BTMA V2.7
BTMA V3.1	BTMA V3.2	BTMA V3.3	BTMA V3.4	BTMA V3.5	BTMA V3.6
BTMA V4.1	BTMA V4.2	BTMA V4.3	BTMA V4.4	BTMA V4.5	BTMA V4.6
BTMA V4.7	BTMA V5.1	BTMA V5.2	BTMA V5.6	BTMA V5.7	BTMA V5.8
Delft V4.10b	USBM V2.1	USBM V2.2	USBM V3.1	USBM V3.2	USBM V4.1
USBM V4.2	USBM V5.1	USBM V5.2			

Sur ces différents graphiques, plus les sigmoïdes possèdent une pente élevée plus elles sont représentatives d'échantillons bien triés. Globalement, la plupart des échantillons sont relativement bien triés en dehors de quelques exceptions pour chacune des journées. Plus d'une fois sur deux, ces exceptions sont issues de prélèvements effectués à l'aide de l'US BM-54 ce qui montre une plus forte hétérogénéité des grains dans la zone de prélèvement de cet échantillonneur.

#### Annexe 10 : Comparaison de l'hydrométrie et du transport solide



Sur la journée du 17 mars, il n'y a pas de relation entre les variations de débits unitaires solides et débits unitaires liquides alors que le 18 mars, on observe une évolution strictement similaire de ces deux paramètres.

Ces deux exemples illustrent relativement bien la situation avec aussi bien des journées montrant une concordance entre ces deux débits unitaires et à l'opposée des journées montrant de grandes contradictions. Ainsi, le transport solide n'est pas dépendant ou alors dans une faible mesure des débits unitaires sur la section.