

EQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE PLAN LOIRE GRANDEUR NATURE

**APPUI PONCTUEL**

**A LA RESTAURATION DE LE LIGNE D'EAU EN BASSE – LOIRE PAR  
EXPERTISE DES MESURES BATHYMÉTRIQUES**

**REALISEES AU PRINTEMPS 2001**

**ET ADAPTATION DU PROTOCOLE DE SUIVI**

**A LE FRESNE-SUR-LOIRE / INGRANDES**

Jean Jacques PETERS  
Ingénieur conseil — Spécialiste en rivières

JUIN 2002

1	INTRODUCTION .....	4
2	EVALUATION DE LA QUALITE DES DONNEES POUR UNE ETUDE FLUVIOMORPHOLOGIQUE .....	4
	2.1. Levés cartographiques .....	4
	2.2. Les photographies aériennes .....	5
	2.3. Les lignes d'eau .....	5
3	EVALUATION DE LA MORPHODYNAMIQUE DU SECTEUR DE LE FRESNES-SUR-LOIRE / INGRANDES .....	9
	3.1. Évaluation générale de la Loire dans le secteur de Montjean-sur-Loire à Belle Croix .....	9
	3.1.1. Morphologie et contrôles .....	9
	3.1.2. Bifurcation d'Ingrandes .....	11
	3.2. Analyse des levés bathymétriques dans le secteur le Fresnes-sur-Loire / Ingrandes à Montrelais-sur-Loire (crues avril – mai 2001) .....	12
4	VISITE DE TERRAIN .....	15
	4.1. Morphologie et géologie .....	15
	4.2. Transports solides, formes du lit et axes de charriage .....	16
5	DIAGNOSTIC MORPHOLOGIQUE GENERAL .....	17

### **Annexe 1: Protocoles de suivi morphologique à Le Fresnes-sur-Loire / Ingrandes -**

	<b>Justification et adaptation</b> .....	19
1	MORPHOLOGIE TOPO-BATHYMETRIE .....	19
	1.1. Objectif des mesures .....	19
	1.2. Méthodologies .....	19
	1.3. Conclusions et recommandations .....	20
2	MORPHOLOGIE - CHAINES D'EROSION .....	21
	2.1. Objectifs des mesures .....	21
	2.2. Méthodologie .....	21
	2.3. Conclusions et recommandations .....	22
3	HYDRAULIQUE - LIMNIMETRIE .....	24
	3.1. Objectif des mesures .....	24
	3.2. Méthodologies .....	24
	3.3. Conclusions et recommandations .....	24
4	HYDRAULIQUE - DEBITS LIQUIDES ET COURANTS .....	26
	4.1. Objectif des mesures .....	26
	4.1.1. Jaugeages liquides .....	26
	4.1.2. Mesure des trajectoires de courant .....	26
	4.2. Méthodologies .....	26
	4.2.1. Jaugeages liquides .....	26
	4.2.2. Mesure des trajectoires de courant .....	27
	4.3. Conclusions et recommandations .....	28
5	SEDIMENTOLOGIE - TRANSPORTS SOLIDES .....	29
	5.1. Objectif des mesures .....	29
	5.2. Méthodologies .....	29
	5.3. Conclusions et recommandations .....	29
6	SEDIMENTOLOGIE - ANALYSE DES SEDIMENTS PRELEVES AU FOND OU EN TRANSPORT .....	30
	6.1. Objectif des mesures .....	30
	6.2. Méthodologies .....	30
	6.3. Conclusions et recommandations .....	30

### **Annexe 2: Commentaires personnels concernant l'approche des questions morphologiques de la Loire à Ingrandes** .....

<b>Annexe 3:</b>	<b>Objectifs et techniques des mesures de transport solide par charriage</b> .....	33
1	METHODE DE MESURE DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE .....	33
1.1.	Méthode directe.....	33
1.1.1.	Choix de la méthode .....	33
1.1.2.	Choix des types d'appareils .....	34
1.2.	Méthode indirecte .....	34
1.2.1.	Traçage de dunes.....	34
1.2.2.	Méthode par ultrasons .....	34
2	MESURES DU TRANSPORT SOLIDE.....	35
2.1.	Mesures pour identifier les mécanismes .....	35
2.1.1.	Mesures du transport solide dans des verticales isolées .....	35
2.1.2.	Jaugeage solide dans une section transversale .....	35
2.1.2.1.	MESURE DU TRANSPORT DE LA SUSPENSION .....	35
2.1.2.2.	MESURE DU TRANSPORT PAR CHARRIAGE DE CONTACT .....	36
3	INFRASTRUCTURE ET EQUIPEMENT POUR LA MESURE DE TRANSPORT SOLIDE .....	36
3.1.	Mesure à partir d'un bateau .....	36
3.2.	Mesure à partir d'un pont.....	36
<b>Annexe 3.A : Description de la Bouteille de Delft</b> .....		37
1	DESCRIPTION.....	37
2	PROCÉDURE D'ÉCHANTILLONNAGE .....	37
2.1.	Nombre de points de mesure sur la verticale .....	37
2.2.	Opération de la Bouteille de Delft en version suspendue BD-1 .....	38
2.3.	Opération de la Bouteille de Delft en version sur chariot BD-2.....	38
<b>Annexe 3.B : Description du BTMA</b> .....		39
1	DESCRIPTION.....	39
2	PROCEDURE D'ECHANTILLONNAGE .....	39
2.1.	Nombre de prises par station de mesure .....	39
2.2.	Temps de la prise individuelle .....	39
2.3.	Précautions lors de la manoeuvre de l'appareil .....	39

## 1 INTRODUCTION

Notre proposition d'appui formulée en octobre 2001 comporte deux facettes : une analyse des levés bathymétriques et la formulation de propositions pour aménager le protocole de suivi à le Fresnes-sur-Loire / Ingrandes. L'analyse se base sur les levés du printemps 2001, ainsi que sur ceux des années 1998, 1999 et sur des photographies aériennes couleurs de 1995.

## 2 EVALUATION DE LA QUALITE DES DONNEES POUR UNE ETUDE FLUVIOMORPHOLOGIQUE

### 2.1. Levés cartographiques

Les levés bathymétriques nous ont été fournis sur CD-ROM et sous format JPEG. Seul le levé général de 2001 couvre l'entièreté du tronçon de Montjean-sur-Loire à Belle Croix ; il a été acquis par parties, à différents états de crue.

Les levés bathymétriques sont rendus en cotes IGN69, donc sous forme de cartes topographiques (courbes d'égal niveau en lieu et place des lignes d'égal profondeur habituellement utilisées pour les besoins d'études hydrographiques et de navigation). Comme la carte générale de 2001 couvre une distance d'une quinzaine de kilomètres entre Montjean-sur-Loire et Belle Croix, la perte de charge entre les extrémités est de l'ordre de 2 m à l'étiage et de 2.5 m en crue. Cela rend difficile les comparaisons des formes de lit; c'est ainsi qu'une zone en jaune (IGN69 de 6 à 7 m) à Montjean-sur-Loire aurait une profondeur d'eau similaire à une zone en bleu clair (IGN69 de 4 à 5 m) à Belle Croix.

Une représentation en cotes hydrographiques - par isobathes, distinctes des iso-cotes topographiques - donnerait donc une image différente, les mêmes couleurs indiquant pour un débit donné les zones d'égal immersion tout au long du tronçon représenté. Ce problème se pose moins pour des levés de détail, sur des tronçons courts d'une longueur de l'ordre d'un à trois kilomètres, la perte de charge restant en dessous d'un demi mètre, Il serait cependant préférable pour des études de morphodynamique de reproduire les cartes en profondeurs réduites.

Les couleurs entre iso-cotes sont bien choisies, la cote de 6 m (IGN 69) séparant la zone verte de la jaune correspondant environ à l'étiage à Ingrandes. Lors de l'utilisation de cartes topographiques des fonds dans d'autres secteurs, cette gamme de couleurs pourrait être conservée, à condition d'utiliser la ligne séparant le vert du jaune pour la cote d'étiage locale.

Des levés bathymétriques sous forme d'isobathes réduites aux basses eaux (de la profondeur relevée lors du sondage, on soustrait la lecture à l'échelle limnimétrique de référence, c'est-à-dire la hauteur d'eau du moment au dessus de l'étiage). Ces levés renseignent le navigateur sur l'emplacement des hauts fonds dangereux, lorsqu'il ajoute le niveau d'eau (lu à l'échelle locale) à la profondeur de ce haut-fond (lue sur la carte)<sup>1</sup>. Cette représentation, pourtant courante pour les besoins de la navigation, pose néanmoins problème pour l'analyse fluviomorphologique. En effet,

---

<sup>1</sup> Les échelles limnimétriques destinées à la navigation sont installées avec leur zéro au niveau IGN correspondant à la ligne d'eau d'étiage des plus basses eaux. Dans le cas de la Loire, cette ligne d'étiage s'est abaissée progressivement suite à l'enfoncement du lit.

la ligne des basses eaux n'a pas une pente constante et n'est donc pas une droite entre échelles. Elle est une courbe ondulée dont la forme est influencée par les modifications des formes de fond, telles les seuils et les dunes. Ces seuils et dunes changent de forme et de cote au cours des crues, formant des résistances à l'écoulement variables tout au cours de celles-ci. L'effet des formes de fond sur la ligne d'eau est relativement moins marquée aux hautes eaux, la ligne d'eau d'étiage ondulant plus que celle en crue.

En hydrographie, une question fréquente est de savoir s'il faut adapter la ligne d'étiage - ligne passant par les zéros des échelles - à un abaissement ou un relèvement du lit de la rivière. Cette question porte également sur l'adaptation éventuelle de la courbe de jaugeage liquide. La réponse est pragmatique: pour la réduction des sondes, il vaut mieux garder les mêmes zéros d'échelle pendant plusieurs années ou dizaines d'années, car sinon il ne serait plus possible de comparer les cartes entre elles. Par contre, pour les courbes de jaugeage liquide dans une rivière morphologiquement dynamique, il vaut mieux effectuer régulièrement des jaugeages liquides pour retracer la crue, et ne pas utiliser une courbe de jaugeage unique.

La qualité visuelle des cartes fournies par la Cellule de Mesures et Bilans de la Loire estuarienne est très bonne et les documents imprimés sont une aide précieuse pour une analyse qualitative des évolutions. Une étude plus détaillée requiert des documents appropriés, à échelle suffisante pour le tracé précis des formes du lit fluvial (grèves, bancs, chenaux, etc.) avec la possibilité de créer des isobathes intermédiaires à des endroits de faible relief.

La Subdivision des Études et Travaux Fluviaux de la Direction de Nantes (VNF) nous a fourni une bathymétrie de l'île Meslet à l'échelle 1/2.000 — carte obtenue avec le logiciel de traçage des courbes de niveau — ainsi que le semis de points de sonde sans courbe de niveau. Notre évaluation des performances du logiciel et notre interprétation du levé sont donnés séparément.

## 2.2. Les photographies aériennes

Les photographies aériennes de 1995 donnent des informations intéressantes pour l'analyse morphologique, surtout pour la partie haute des grèves. Elles sont prises aux eaux basses et doivent donc être comparées aux levés topo-bathymétriques d'étiage.

## 2.3. Les lignes d'eau

Les lignes d'eau renseignées dans la base de données ont été acquises pour une gamme de débits de 450 à 780 m<sup>3</sup>/s, environ, en dessous du module de la Loire qui est de 800 m<sup>3</sup>/s à Montjean-sur-Loire, station de référence pour ce secteur. Les deux premières figures 2.3-3 et 2.3-4 reproduisent les lignes d'eau relevées entre le 14 juin et le 26 juillet 2001, avec les données de toutes les échelles, telles que fournies par la Cellule de Mesures et Bilans de la Loire estuarienne. On remarque des changements de pente aussi bien en rive gauche qu'en rive droite. Les changements en rive droite sont plus marqués car la densité de points de mesure entre le Pont d'Ingrandes et le Pont Saint-Florent-sur-Loire y est bien plus élevée qu'en rive gauche. Il faut se méfier d'une interprétation hâtive, puisque les incertitudes sur les cotes relevées peuvent être significatives. Mais selon ces figures, les pentes locales pourraient donc passer de 0.10 à 0.50 m par km sur une dizaine de kilomètres, et ce pour des débits moyens. Ces variations de pente

peuvent s'expliquer par la morphologie. Il serait utile d'analyser l'évolution pendant les crues des pentes locales, mesurées à des échelles placées à des endroits judicieusement choisis en fonction de la morphologie du lit fluvial. Les deux figures suivantes (2.3-5 et 2.3-6) ont été tracées en réduisant la densité des points d'observation, les variations des pentes locales disparaissant.

Le coefficient de corrélation d'une régression linéaire des lectures d'échelle sur une dizaine de kilomètres dans le secteur d'Ingrandes passe d'environ 0.955 à 0.985 lorsque le débit liquide passe de 450 à 780 m<sup>3</sup>/s (premier calcul avec les données fournies). Les pentes d'eau sont donc plus égales aux débits élevés, ce qui s'explique aussi par l'effet de la morphologie, les seuils étant alors plus immergés.

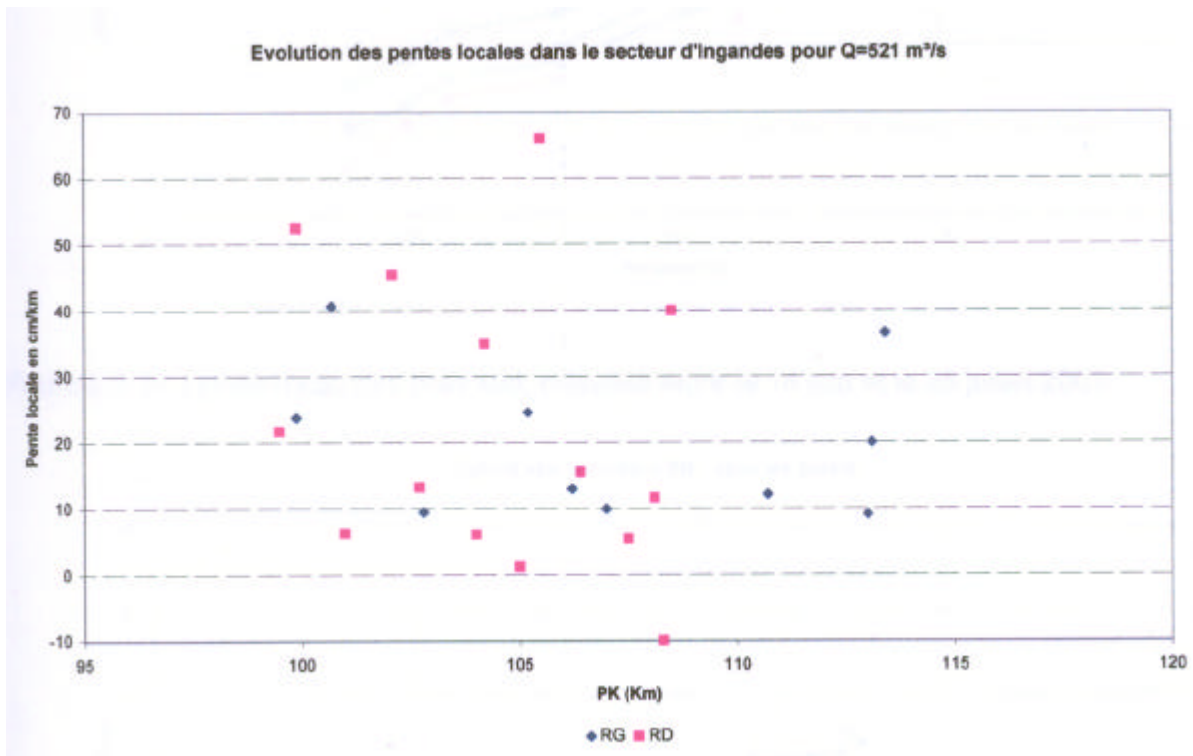


Figure 2.3-1 : Évolution des pentes locales de part et d'autre de l'île Meslet (Q=521 m<sup>3</sup>/s)

Pour l'interprétation de cette évolution, il faut bien entendu considérer les erreurs et les imprécisions, pouvant donner lieu à des valeurs fort imprécises. Néanmoins les changements de pente locale restent fort importants.

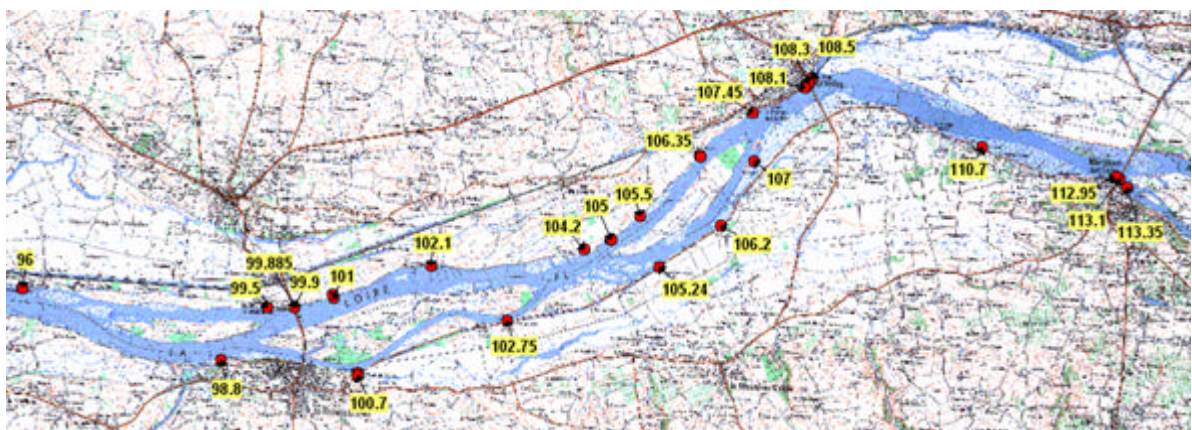


Figure 2.3-2 : Localisation des points de mesure de niveau d'eau

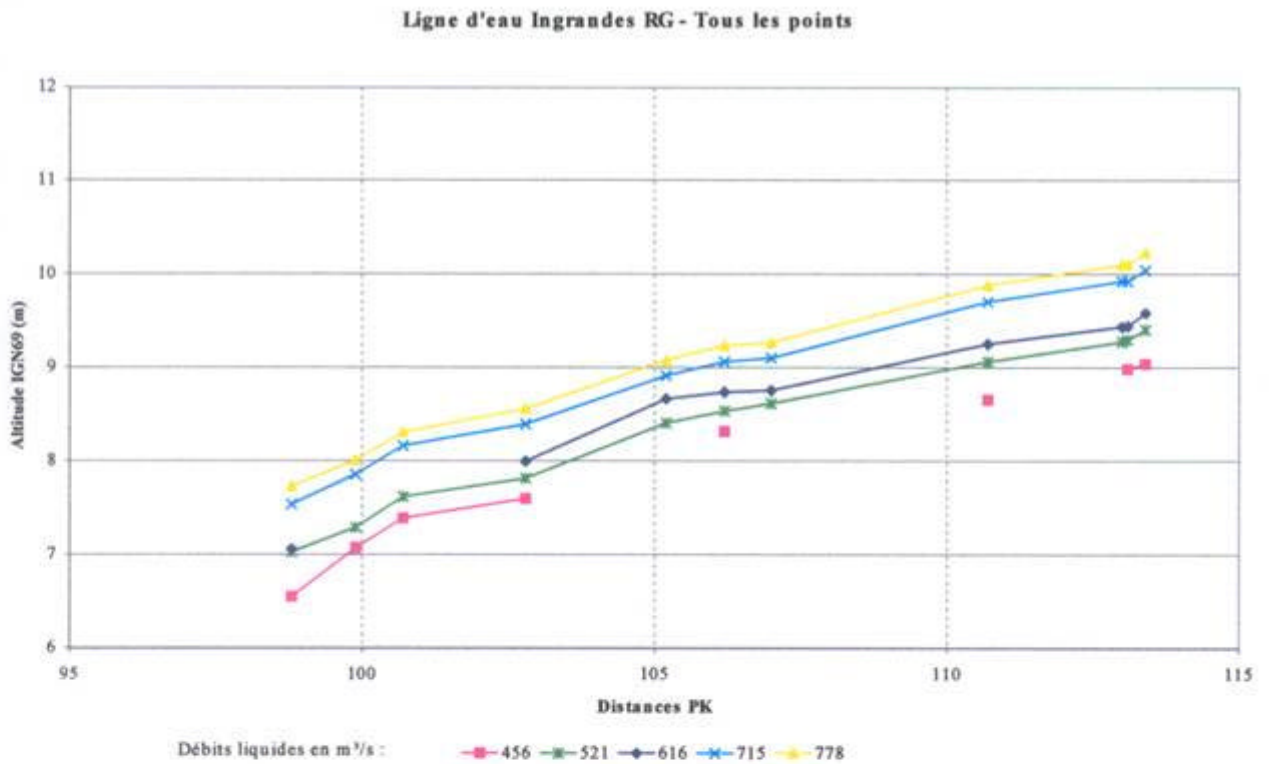


Figure 2.3-3 : Lignes d'eau des bras sud, relevées entre le 14 juin et le 26 juillet 2001

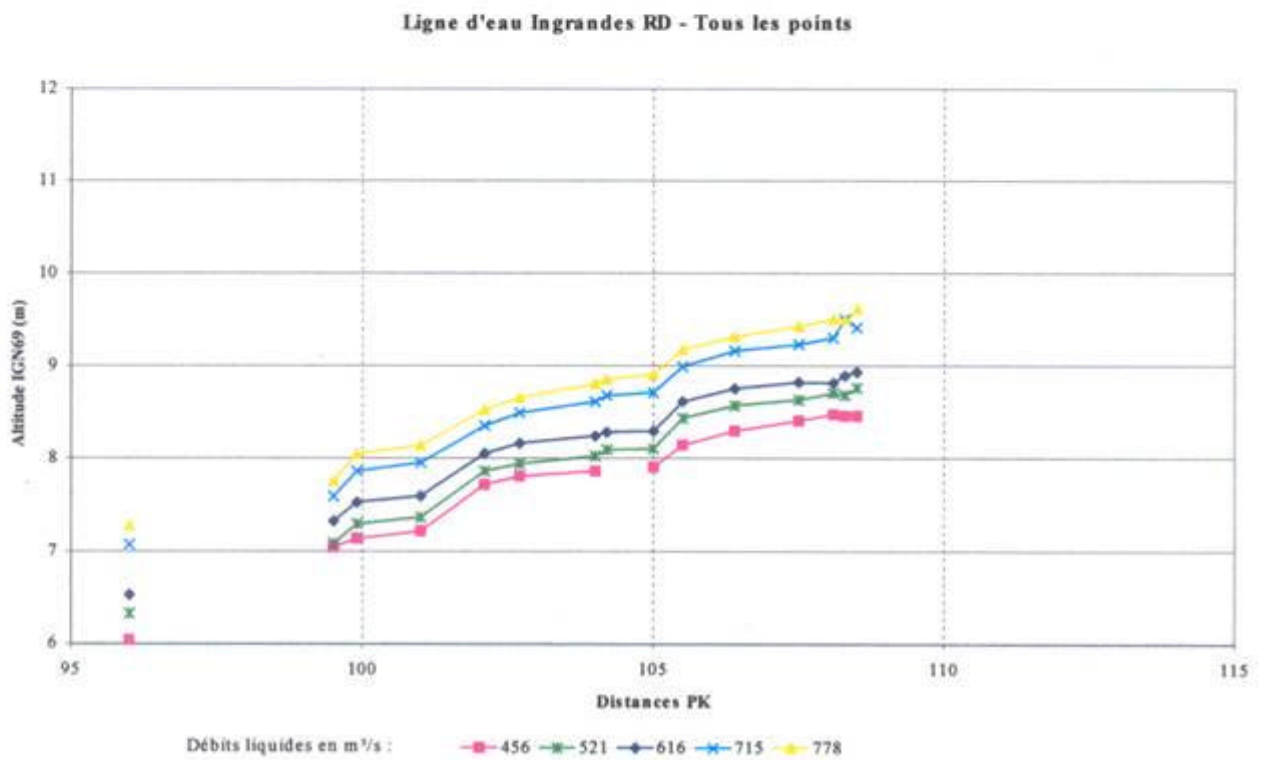


Figure 2.3-4 : Lignes d'eau des bras nord, relevées entre le 14 juin et le 26 juillet 2001

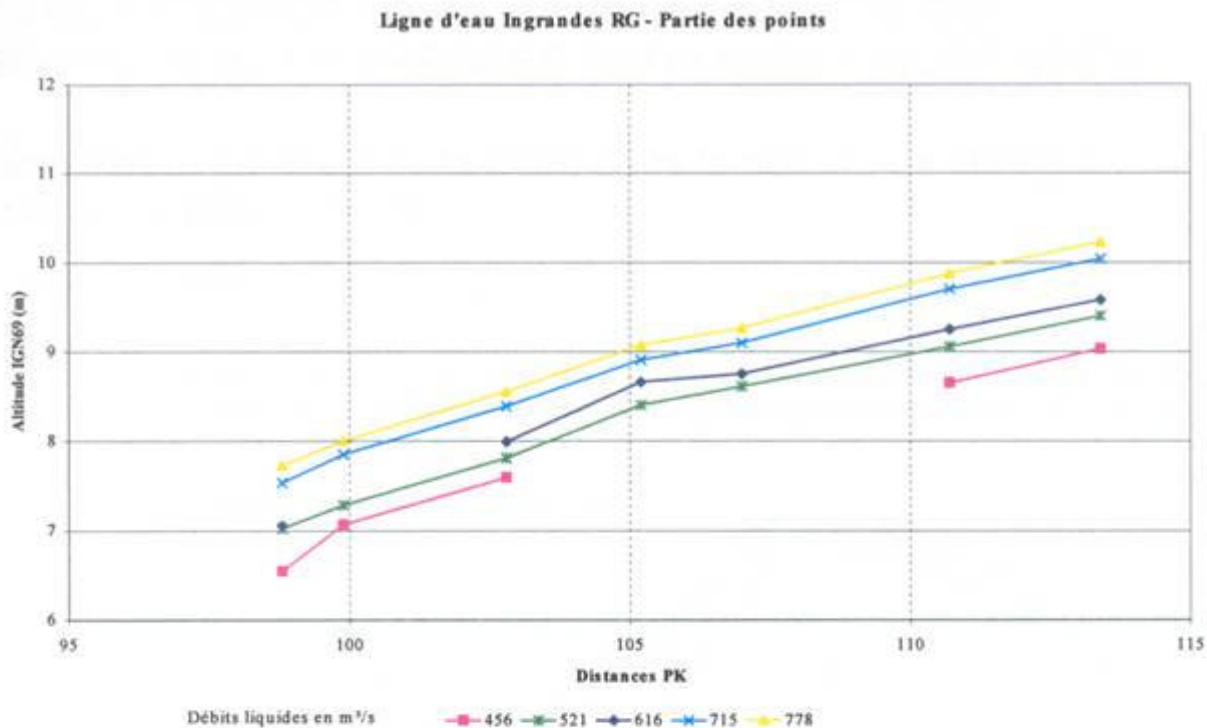


Figure 2.3-5 : Même figure que la figure 2.3-3, mais en réduisant les nombres de points

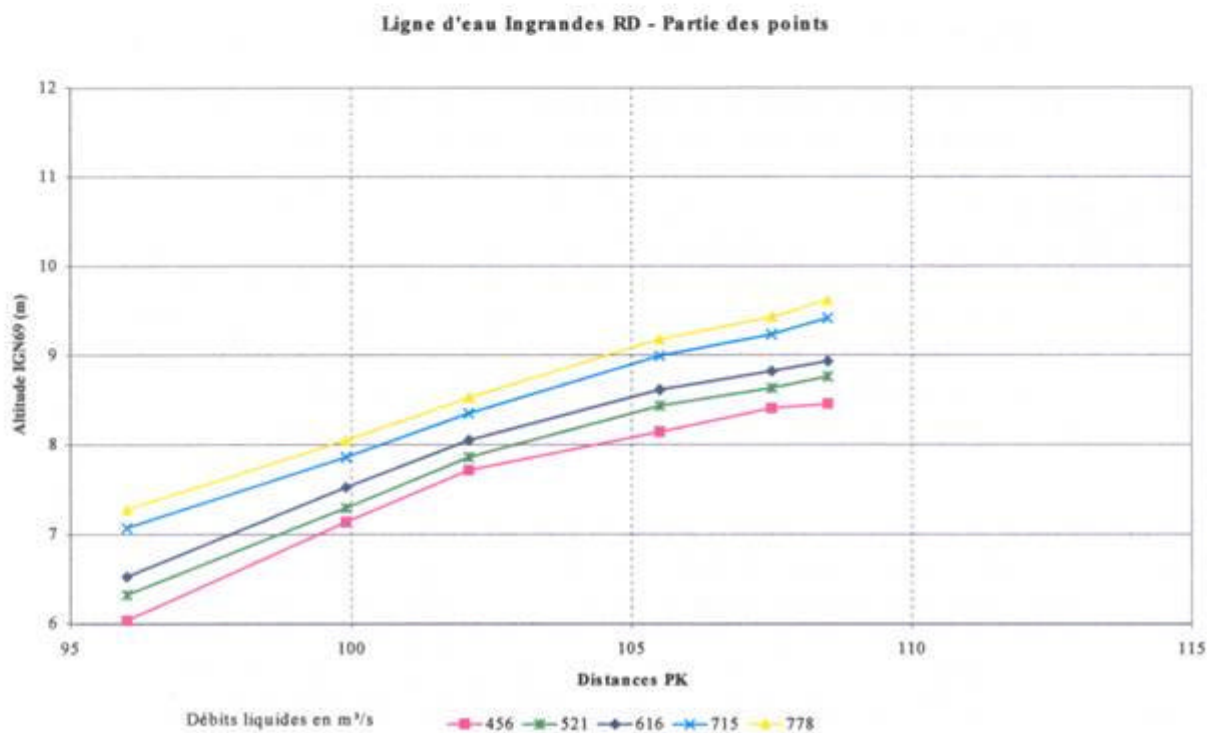


Figure 2.3-6 : Même figure que la figure 2.3-4, mais en réduisant les nombres de points

### 3 EVALUATION DE LA MORPHODYNAMIQUE DU SECTEUR DE LE FRESNES-SUR-LOIRE / INGRANDES

#### 3.1. Évaluation générale de la Loire dans le secteur de Montjean-sur-Loire à Belle Croix

##### 3.1.1. Morphologie et contrôles

Dans le secteur considéré, les ouvrages de stabilisation de la passe navigable ont immobilisé le chenal actif, devenu profond et étroit, laissant les bras secondaires plus ensablés.

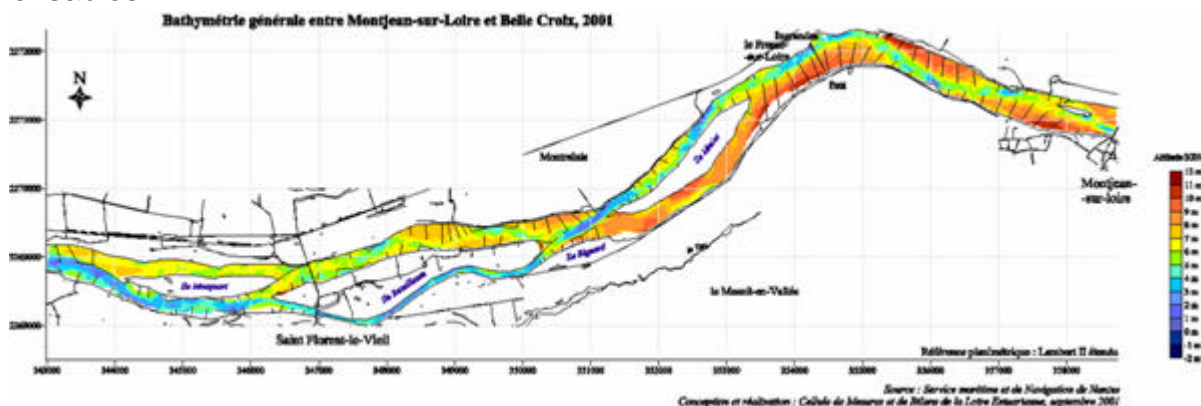


Figure 3.1.1-1: Levé bathymétrique général 2001 de Montjean-sur-Loire à Belle croix

Entre Montjean-sur-Loire et Ingrandes, les épis forcent la formation d'un méandre régulier, dont les grèves sont devenues quasiment immuables, travaillant seulement comme zones de stockage temporaire de sédiments. Les points d'apex en rive gauche et rive droite sont sans doute des points « durs » (affleurements rocheux et/ou argiles ?), et la rive droite au pont d'Ingrandes est une zone rocheuse. La grève située le long de la rive gauche près du pont d'Ingrandes est une zone de stockage pour le sédiment charrié. Par contre, le changement notable de l'orientation générale du fleuve à cet endroit, ainsi que les ouvrages de canalisation forcent le chenal actif dans un tronçon assez rectiligne depuis l'amont du pont d'Ingrandes jusqu'à la bifurcation de l'île Meslet.

En aval du pont d'Ingrandes, les champs d'épis induisent une contre-courbe dont le chenal est orienté vers le bras droit de la bifurcation, alors qu'il aurait pu tout aussi bien être orienté vers le bras gauche. On peut se poser la question de savoir pourquoi les ingénieurs ont choisi le bras droit comme chenal navigable, au lieu du bras gauche qui se raccorderait mieux au méandre? La forme de la grève de rive gauche est morphologiquement peu naturelle et son extrémité aval pénètre dans le bras sud de Cul-de-Boeuf, qu'elle alimente en sables et graviers.

Le bras nord - le chenal navigable - est étroit et les épis réduisent encore plus le chenal actif, provoquant une forte concentration de la puissance hydraulique, surtout lors des crues moyennes (jusqu'à environ 2000 m<sup>3</sup>/s). On constate en rive gauche du bras (à hauteur de « Le Portique » au PK 105.5, voir fig. 2.3-2) l'absence d'une mouille marquée. La crête de la grève en rive droite est d'ailleurs fort basse. L'analyse des pentes (voir fig. 2.3-4) montre l'effet de cet ensablement sur la ligne d'eau. En 1999, la situation était similaire, alors que le chenal y semblait plus ensablé qu'en 1998. Remarquons que ces levés n'étaient pas réalisés aux mêmes états de crue.

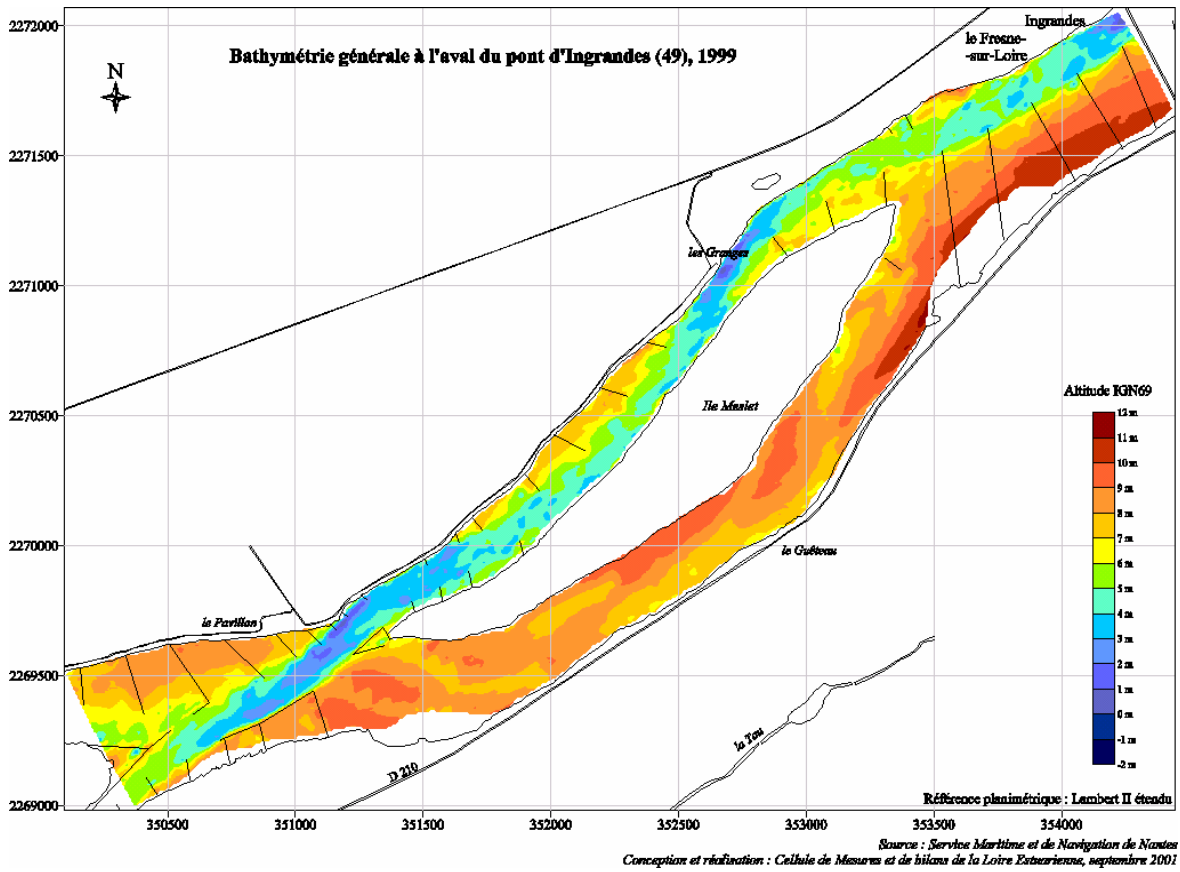


Figure 3.1.1-2 : Levé bathymétrique général 1999 – Île Meslet

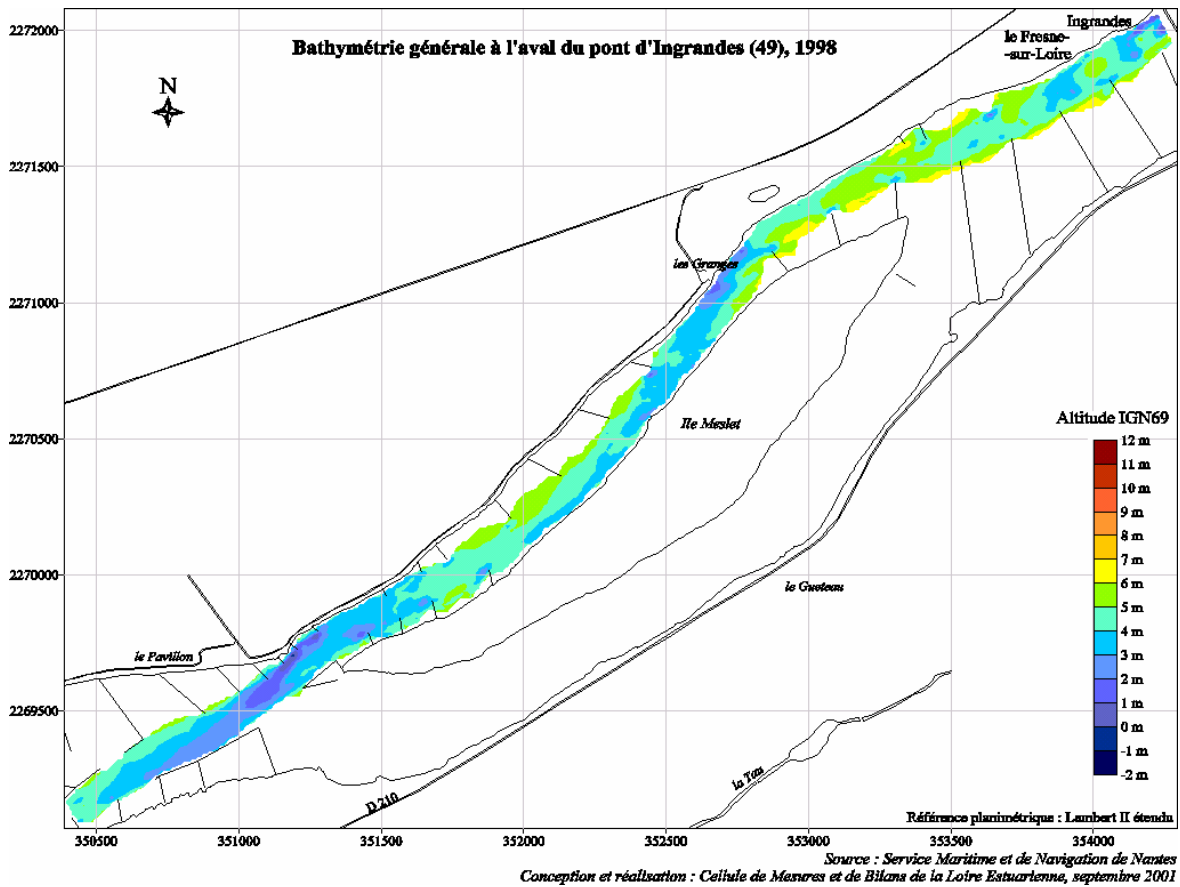


Figure 3.1.1-3 : Levé bathymétrique général 1998 – Île Meslet

Le bras Cul-de-Boeuf est fort peu profond, à l'exception d'une mouille peu marquée en 2001 près de « Le Guêteau » (PK 106.2), en rive gauche. Son existence s'explique par le rejet vers cette rive des courants au sortir du tronçon fort rectiligne dans la partie amont du bras gauche. Face à cette fosse, la grève a une forme différente des deux autres analysées en amont du pont d'Ingrandes. Sur le levé de 1999, la mouille est à peine visible.

On peut décrire le bras Cul-de-Boeuf comme la succession de trois tronçons relativement rectilignes, forme peu favorable au développement naturel d'un méandre traditionnel avec grèves, mouilles et seuils. Un tel bras pourrait être créé par des ouvrages, tels des épis ou autres. Sur le levé de 1999, on peut suivre le thalweg dans le bras sud entre la bifurcation de l'île Meslet et la confluence des deux bras. Partant en rive droite de la pointe amont de l'île, il rejoint « Le Guêteau » par un seuil à bon passage<sup>22</sup>, en rive gauche qu'il longe sur 1 kilomètre, repassant ensuite vers la rive droite par un seuil à mauvais passage, repassant immédiatement vers la rive gauche par un autre seuil à mauvais passage. Le thalweg rejoint finalement le bras droit par un chenal qui est cependant peu marqué. La morphologie du lit dans le partie aval du bras Cul de Boeuf n'est pas constante, tel que le montre une comparaison des levés de 1998, 1999 et 2001, ainsi que la photographie aérienne de 1995.

Lorsqu'on analyse le levé de 2001 du début mai, en début de la crue qui suit celle de mars et avril, on remarque que le thalweg n'est pas aussi bien marqué. Ceci est sans doute dû aux hautes eaux qui l'ont précédé. Pour le comprendre, il faut analyser l'évolution des cartes depuis le 11 avril jusqu'au 23 mai 2001.

### 3.1.2. Bifurcation d'Ingrandes

Nous ne disposons pas de cartes sur un nombre suffisant d'années pour analyser en détail la bifurcation elle-même. Seuls les levés de 1999 et 2001 sont complets. Dans les deux cas, la tête de la fosse en provenance de la rive droite à Ingrandes est bien orientée vers le bras nord. Par contre, l'image photographique de 1995 montre une bifurcation plus marquée, avec des lambeaux de chenal en rive droite du bras sud, sur un kilomètre environ, et ce malgré la présence du champ d'épis. Il est donc possible que la bifurcation, et sa répartition des débits liquides et solides, change en fonction des apports solides d'amont, selon l'importance des crues.

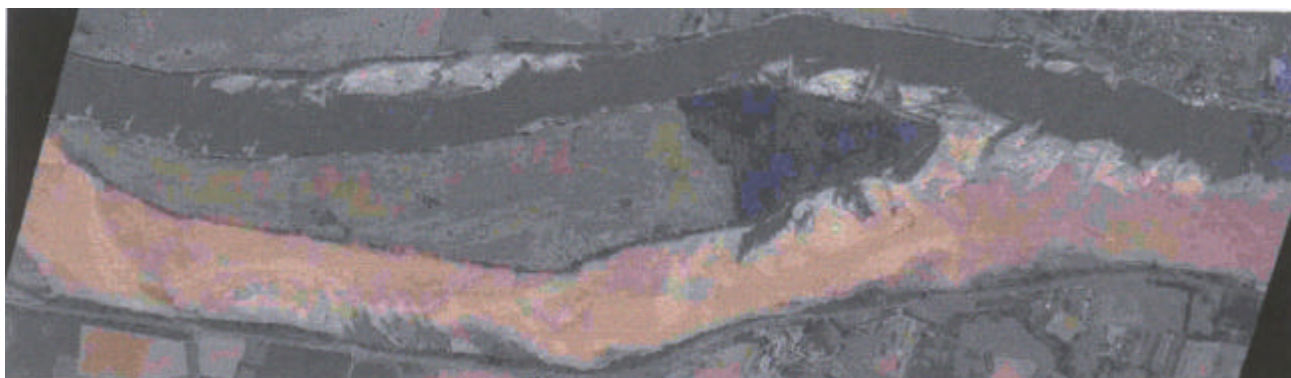


Figure 3.1.2-1 : Photographie aérienne de l'île Meslet, prise en 1995

<sup>22</sup> Dans un seuil « bon passage », les mouilles amont et aval sont alignées. Dans un seuil « mauvais passage », elles passent l'une à côté de l'autre

### 3.2. Analyse des levés bathymétriques dans le secteur le Fresnes-sur-Loire / Ingrandes à Montrelais-sur-Loire (crues avril – mai 2001)

Les bathymétries levées au printemps 2001 l'ont été pendant une période de crue intéressante.

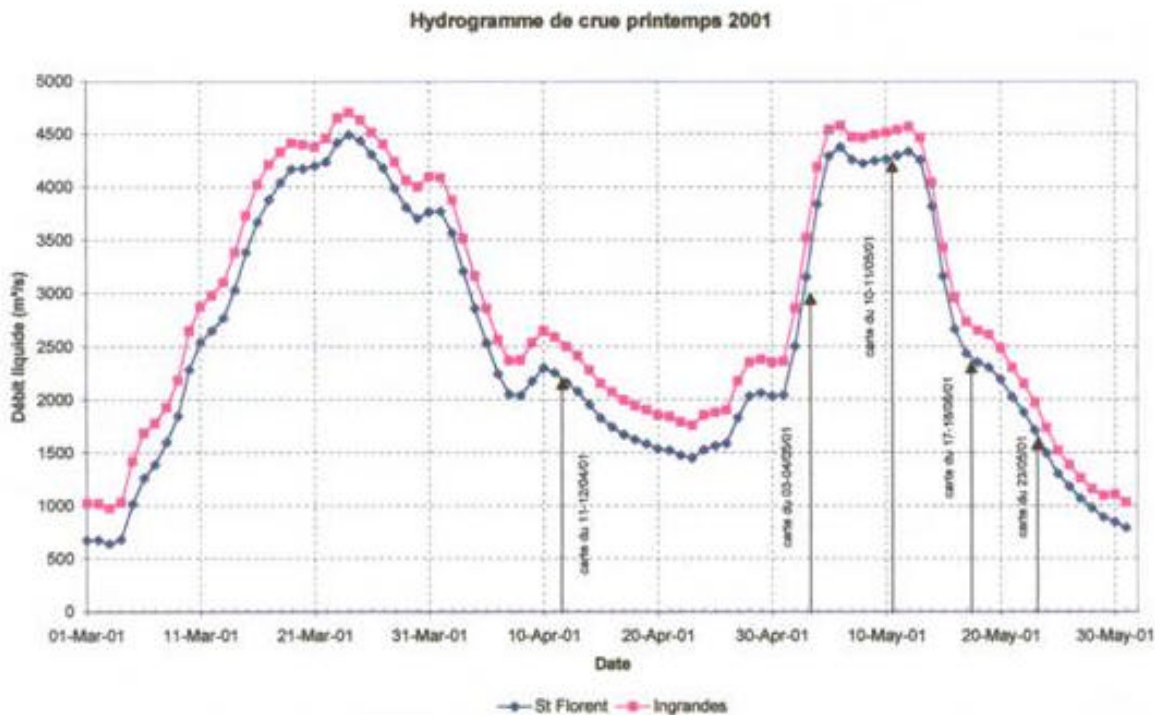


Figure 3.2-1 : Evolution des crues de printemps 2001

Le premier levé du 11-12 avril a été acquis juste après la crue de mars, le débit de la Loire y étant d'environ 2000 m<sup>3</sup>/s. La partie amont du bras navigable (ou nord) est occupé en rive droite par la grève fort étendue, occasionnant avec l'épis de rive droite la formation d'un chenal qui est cependant peu marqué. Dans la partie du bras Cul de Boeuf en amont de « Le Guêteau », le lit est fort égal, alors qu'en aval de ce lieu, la mouille de rive gauche est nette, bien que peu profonde. Le banc de rive droite s'arrête à l'endroit où le chenal repasse en rive droite, par un seuil mauvais passage. Dans sa partie aval, le bras sud a un relief peu marqué.

Le levé des 3 et 4 mai<sup>3</sup> est pris dans la phase ascendante d'une crue à la montée rapide. On voit que la mouille de rive gauche en aval de « Le Guêteau » tend à continuer tout droit, le passage du seuil devenant plus mauvais. Cette situation perdure pendant la phase de plateau de la crue (levé 10-11 mai) et en cours de descente (17-18 mai). On remarque un transit de sable charrié entre la grève de rive droite (face à « Le Guêteau ») et la grève suivante de rive gauche. La mouille s'est assez bien ensablée entre-temps. Le 23 mai, la mouille tend à se rétablir.

L'analyse détaillée des évolutions devrait se faire avec l'ensemble des données : cartes détaillées, formes de fond (dunes, visibles sur les profils en long à l'échosondeur) et mesures de transport solides, surtout de charriage.

<sup>3</sup> Certains levés ne sont pas représentés, ils peuvent être consultés sur le CD-ROM de la Cellule Loire

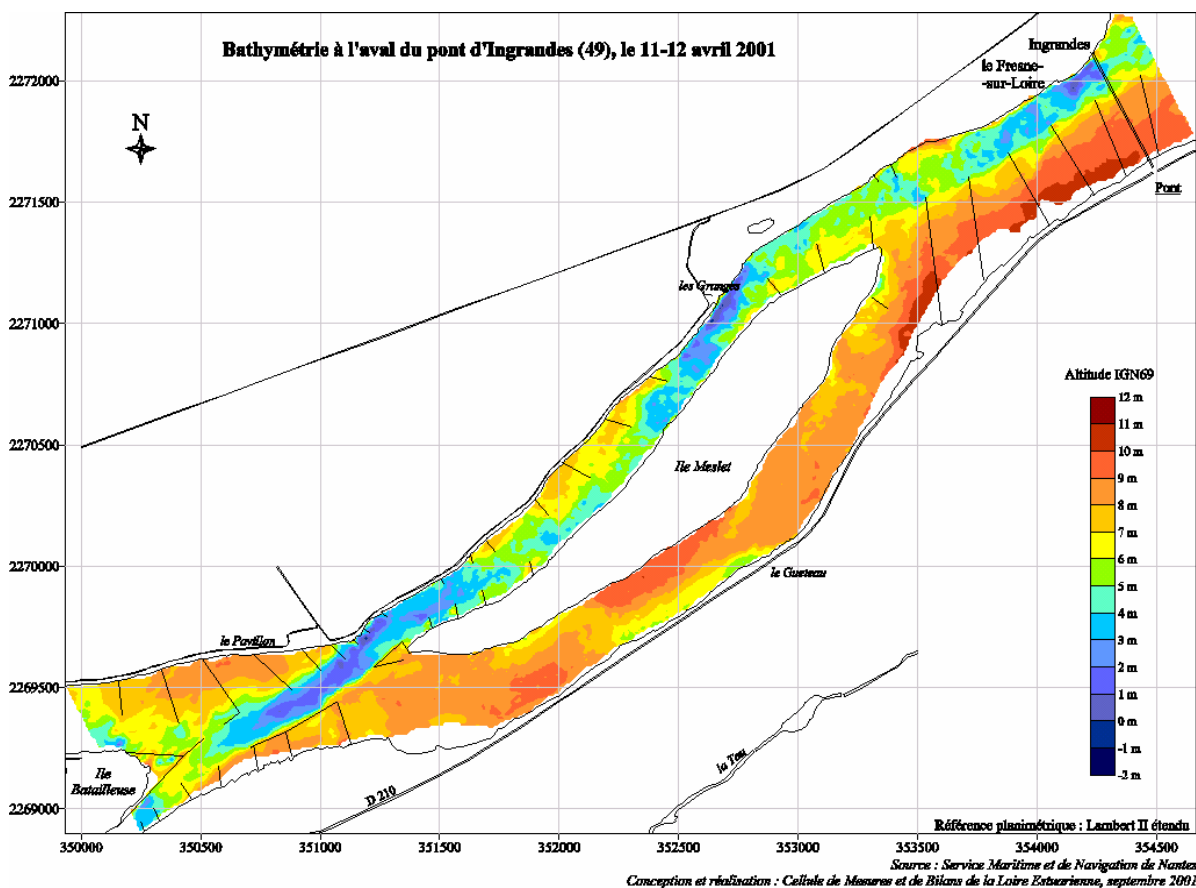


Figure 3.2-2 : Bathymétrie Île Meslet – 11-12 avril 2001

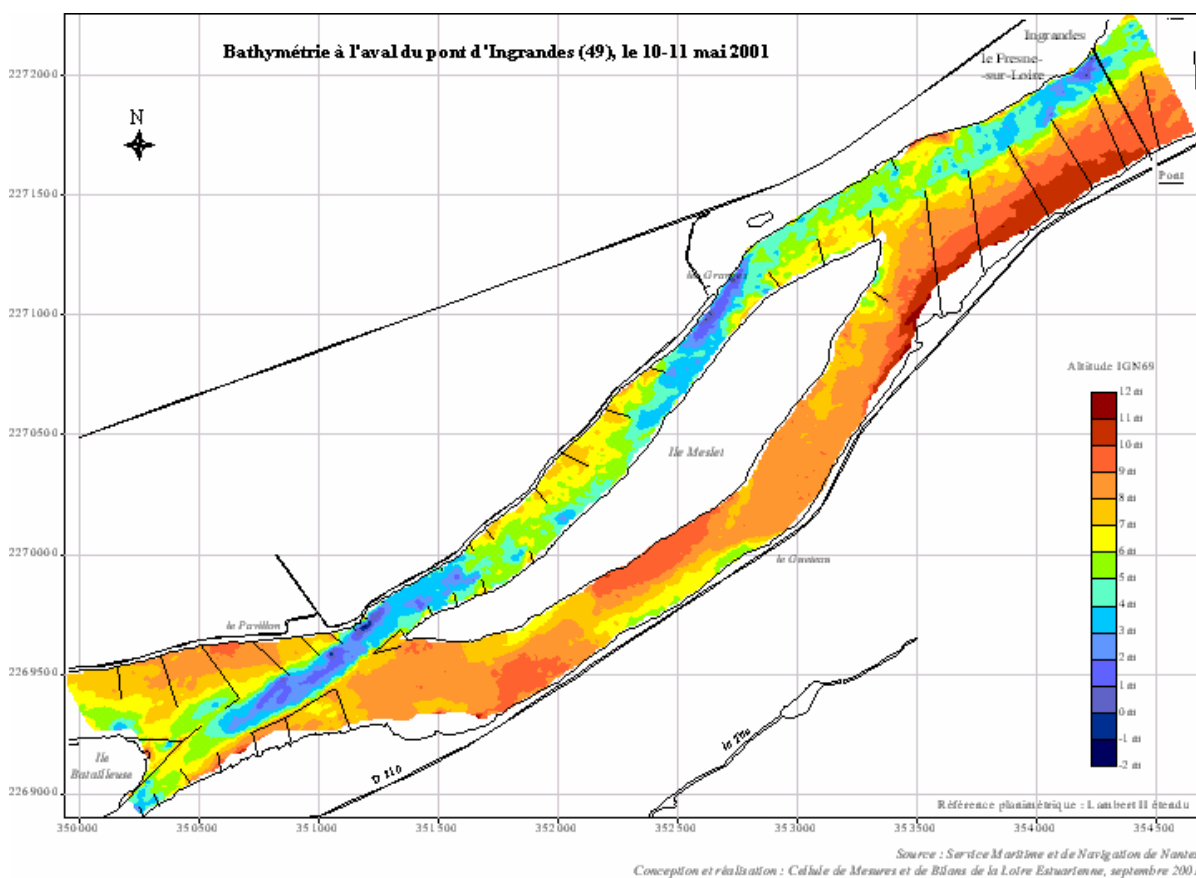


Figure 3.2-3 : Bathymétrie Île Meslet – 10-11 mai 2001

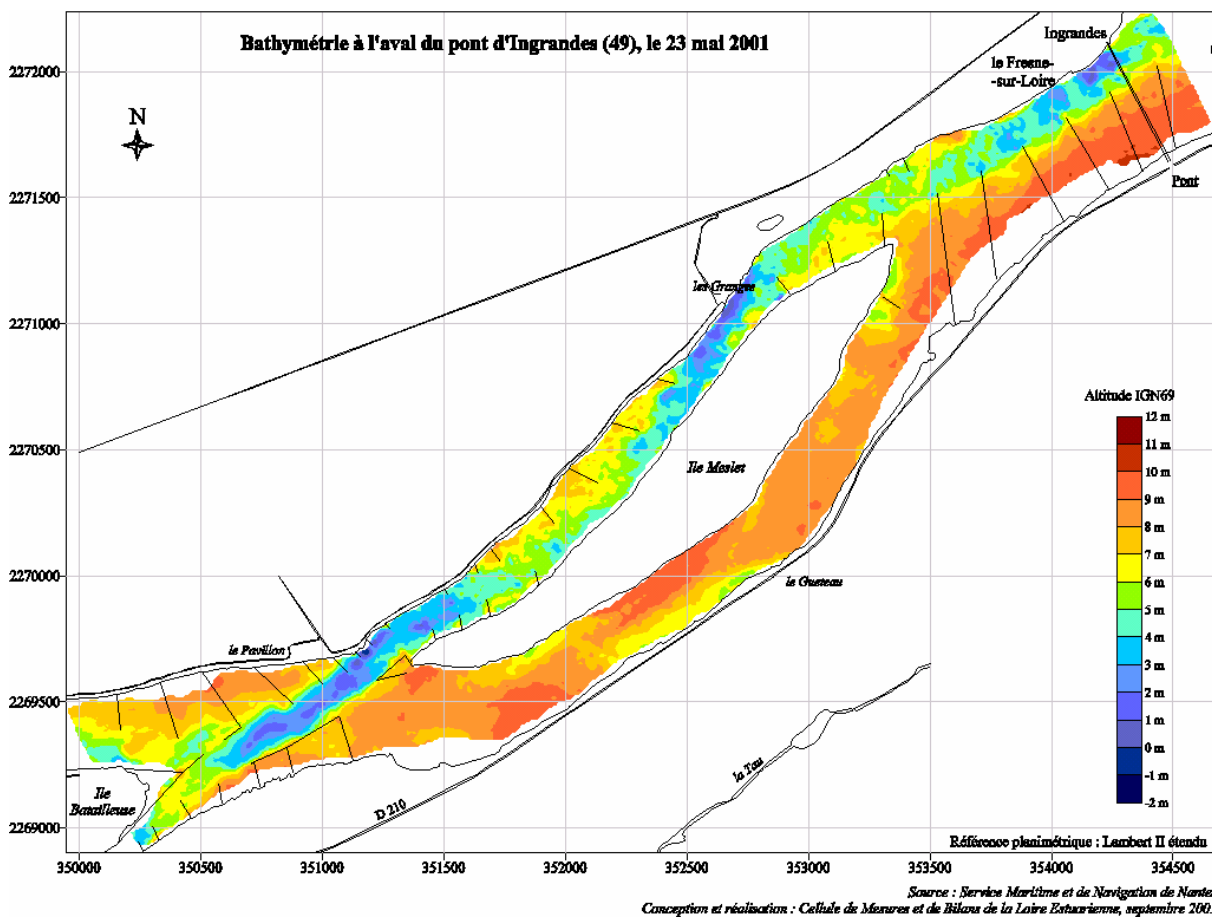


Figure 3.2-4 : Bathymétrie Île Meslet – 23 mai 2001

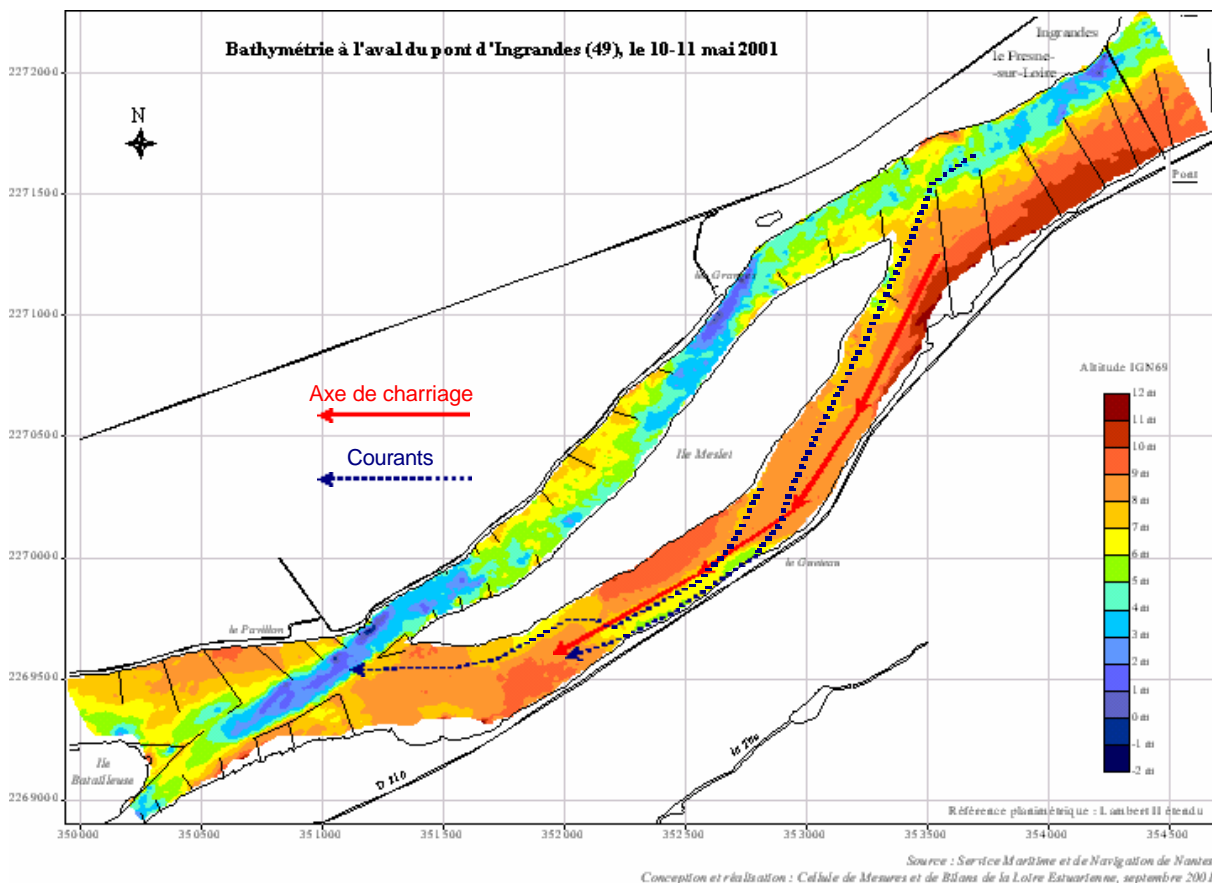


Figure 3.2-5 : Bathymétrie Île Meslet – 10-11 mai 2001

Sur la carte des 10 - 11 mai 2001 (le débit de la Loire variait peu et était proche de 4000 m<sup>3</sup>/s) a été tracé un « axe de charriage », représentant la trace des transports solides de charriage les plus intenses. Cette interprétation est faite non pas par calculs, mais avec notre expérience acquise sur l'analyse des données de terrain dans beaucoup de fleuves. Une image des trajectoires de courant a aussi été dessinée. Ces interprétations devront être vérifiées par des mesures in situ des transports solides et des trajectoires des courants de surface relevés par flotteurs. L'analyse présentée ici pourra être complétée avec ces données et devrait déboucher sur une première évaluation des répartitions de transport solide entre les différents bras en aval du pont d'Ingrandes, pas seulement les débits solides globaux, mais aussi leurs répartitions spatiales. Les mesures avant et après la construction des ouvrages devraient permettre l'évaluation de l'efficacité de ces ouvrages dont la construction est prévue à l'entrée du bras nord de l'île Meslet.

## 4 VISITE DE TERRAIN

Une visite de terrain fut organisée le 24 mai 2002 sur le site de l'île Meslet, en bateau et par terre. Ce fut l'occasion de vérifier certaines constatations de l'analyse sur cartes et d'observer des particularités des sites.

### 4.1. Morphologie et géologie

Le trajet en bateau ont permis d'observer les formations rocheuses aux rives, les schistes et grès renseignés sur la carte géologique (Fig. 4.1-01). Mais il doit y avoir des formations sédimentaires dures plus récentes, qui contrôlent les divagations du lit. C'est ainsi que la rive droite du bras principal est en plusieurs endroits composée de matériaux paraissant argileux, plus résistants à l'érosion. Notre guide nous affirma que cette formation s'appelle une « jalle ». Dans les annales des Ponts et Chaussées de 1940 on lit<sup>4</sup>: *“L'ossature du lit de la Loire maritime est faite de terrains anciens du vieux massif hercynien, gneiss, micaschistes, granulites. Ce substratum offre une topographie tourmentée comme fi convient à son origine montagneuse, mais les accidents du tréfonds disparaissent sous un épais manteau alluvionnaire, essentiellement formé d'argile et de vase compacte mélangée de sable (jalle), accumulés au cours des millénaires.”* Nous n'avons pu accoster à la rive pour prendre un échantillon de cette formation dont il faudrait vérifier la composition et la dureté. Si des formations similaires devaient se retrouver au fond du bras nord, ils pouffaient expliquer le phénomène de seuil bien visible sur la ligne d'eau d'étiage et l'absence de mouille dans ce bras le long de la rive de l'île Meslet.

Le contrôle exercé sur le lit par la géologie et par les ouvrages d'art fluviaux - principalement les épis - est parfaitement visible sur terrain. Certains épis sont abîmés, avec des ouvertures plus ou moins grandes, en plusieurs endroits. De ce fait, les courants sont distribués de façon inégale dans le sens transversal. Cela peut expliquer la morphologie fort irrégulière des fonds observée sur les levés. En amont du bras sud, dans la courbe de la Loire, la forme de la grève en rive droite est régulière, les épis étant en plusieurs endroits complètement ensablés. A l'entrée du bras Cul de Boeuf, la grève en rive droite est très accidentée, du fait des épis placés en quinconce (le dernier de rive gauche juste en amont du premier - et unique - de rive droite). En amont de ce dernier, une petite fosse peu profonde longe la rive depuis la tête de l'île Meslet. Elle est causée par la protection de berge qui provoque une forte turbulence, et donc un affouillement local des fonds. Cet affouillement n'est

---

<sup>4</sup> Information reçue de la Cellule de Mesures et Bilans de la Loire estuarienne

pas visible sur les levés, les profils sondés ne s'approchant pas suffisamment de la rive pour des raisons de sécurité.

En aval des derniers épis, le lit devient plus égal, mais on observe sur les premières centaines de mètres le thalweg, bien que peu profond. Cette zone au relief mal marqué se poursuit jusqu'au deuxième coude, où le bras sud rejoint la route de navigation. Une fosse y longe la levée en rive gauche jusqu'au moment où apparaît une grande grève, face à l'extrémité aval de l'île Meslet. Cette grève s'est formée en partie à cause des champs d'épis à son aval. Dès cet endroit, le bras sud est peu contrôlé en plan et cherche continuellement son lit. La sortie du bras sud a été aménagée avec des champs d'épis (longitudinaux et transversaux) sur chaque bord. Lors de la visite, nous avons pu observer que le niveau du thalweg est bien plus haut dans le bras sud que dans le bras nord, aux basses eaux.

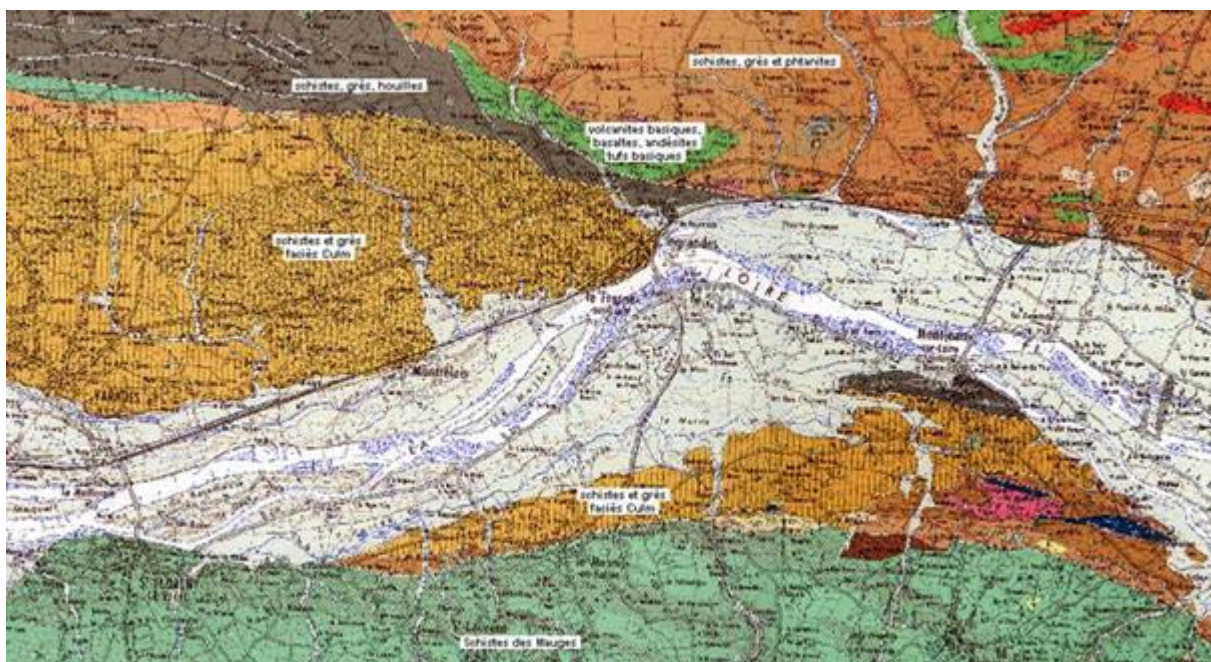


Figure 4.1-1 : Carte géologique des environs d'Ingrandes

## 4.2. Transports solides, formes du lit et axes de charriage

Tout au long du bras sud s'observent des différences de granulométries des sédiments en surface, allant du gravier au sable fin, et même les croûtes de limon séché, résultat du dépôt des matières en suspension dans les zones d'eau mortes. Creusant le lit fluvial, on trouve par endroits des graviers assez grossiers. Nous avons pu observer dans la partie aval du bras Cul de Boeuf la zone décrite plus haut comme « axe de charriage ». Elle est traversée par un chenal de chute, par lequel se sont échappées les eaux de la mouille de rive gauche vers celle longeant la rive de l'île Meslet. Cet écoulement a creusé un petit chenal au travers de la zone de charriage intense (l'axe de charriage) et provoqué la formation d'une « flèche de sable » entrant dans cette dernière mouille. Une passe de courant fort érosif, avec des sédiments plus grossiers, s'observe dans la prolongation de la mouille de rive gauche, presque parallèle à l'axe de charriage. Cette passe aboutit dans le bras nord par une zone à petites dunes, dont la longueur d'onde est de l'ordre d'un à deux mètres et l'amplitude d'environ vingt centimètres. Le bord des dépôts de sable du bras sud sont érodés par les courants du bras principal. On observe les strates, résultat des avancées successives de la grève. Cette zone se fait recouper à la fin de chaque crue par des chenaux de chute.

## 5 DIAGNOSTIC MORPHOLOGIQUE GENERAL

L'analyse des documents mis à notre disposition et des informations obtenues lors des visites de terrain conduisent au diagnostic morphologique suivant:

- La Loire rencontre à Ingrandes en rive droite les formations géologiques dures, des roches qui changent l'orientation générale du cours d'eau par un coude assez prononcé. Le port d'Ingrandes y fut anciennement établi<sup>5</sup> sur la roche et le chenal navigable fut maintenu le long de cette rive droite.
- Le coude du fleuve à Ingrandes, avec son faible rayon de courbure, génère des forts courants hélicoïdaux qui ramènent les sédiments charriés le long de la rive convexe (rive gauche).
- La cause de la formation de l'île Meslet nous est inconnue, mais elle pourrait s'expliquer par l'influence exercée par des formations géologiques (roches dures ou couches sédimentaires récentes résistant à l'érosion, telles des argiles).
- Une recherche dans les archives devrait nous éclairer sur les raisons pour lesquelles le bras nord fut aménagé comme voie navigable, et non le bras sud. Une des raisons pourrait être l'apport plus important vers le bras Cul de Boeuf de sables et graviers en provenance de la grande grève de rive gauche située face à Ingrandes.
- La stabilisation du lit fluvial par des ouvrages hydrauliques les champs d'épis, les protections de berges et les levées en amont de l'île Meslet ont sans doute renforcé la tendance qu'avaient les sédiments à longer la rive gauche pour y former cette grève, source des solides engorgeant le bras sud.
- L'aménagement du bras nord de l'île Meslet aura provoqué une augmentation de la capacité de transport solide et un surcreusement par rapport au lit naturel, contrairement au bras sud. Ce dernier se serait ensablé du fait de sa capacité de transport solide relativement faible, ceci du fait de la largeur du lit, proportionnellement plus grande que dans le bras nord.
- Il faudrait vérifier la présence éventuelle de formations résistantes à l'érosion sous le lit du bras nord, telle que signalé précédemment. Ces couches géologiques pourraient avoir été mises à nu lors de l'abaissement du lit fluvial.
- La levée en rive gauche du bras sud bloque le développement d'un méandre plus ample et « attire » le courant et y maintient une mouille assez stable. Le courant venant d'amont a été dévié par la rive droite (lie Meslet) assez rectiligne. L'aménagement de la Loire a dès lors créé un bras sud dont la forme en plan est composée de trois tronçons fort droits, une forme en plan peu favorable au développement d'une succession de mouilles et de seuils.
- En période de basses eaux, les épis situés à l'entrée du bras Cul de Boeuf orientent les courants — et la fosse vers le chenal navigable (bras nord) et limitent les débits d'entrée dans le bras sud. Lors des eaux hautes, les courants hélicoïdaux entraînent des quantités appréciables de sédiments principalement les sédiments charriés vers le bras Cul de Boeuf. Ils s'y déposent en aval des champs d'épis par l'étalement des courants (suite au manque de concentration des vitesses sur une partie de la largeur du lit seulement).

---

<sup>5</sup> Dion R. 1961 : « Les agglomérations du Port de Chalonnnes, du Rivage de Montjean, du Port d'Ingrandes, de la Patache près Champtoceaux, ... reposent sur la roche en place, au bas du coteau... »

- L'épis unique situé en rive droite à l'entrée du bras Cul de Boeuf a un effet fort négatif sur le développement d'un chenal à méandre, et par voie de conséquence sur l'évacuation des sédiments qui pénètrent dans le bras.
- En aval des épis à l'entrée du bras Cul de Boeuf, la disposition des berges du lit est défavorable au développement d'un lit à méandre. L'influx de sédiment charrié dépend de l'histogramme de crue, mais le transit lent du charriage au travers du bras provoque sans doute son engraissement.
- Les dimensions des grèves dans le bras sud les zones d'accumulation temporaire de sédiment changent au gré des crues. Les chenaux de chute se forment par déversement des eaux entre mouilles à la fin des ondes de crue.
- La morphologie dans la partie aval du bras Cul de Boeuf est fort instable suite à l'évacuation irrégulière des sédiments. Le chenal de chute qui rejoint le bras principal en fin de bras Cul de Boeuf se positionne différemment d'une année à l'autre, au gré des mouvements des grèves dans la partie aval du bras sud. Si les champs d'épis à la confluence des bras sud et nord ont un effet positif sur le maintien d'un chenal navigable, elles influencent négativement la capacité hydraulique et de transport solide de ce bras sud.

Commentaires concernant les impacts possibles des ouvrages à construire :

- La construction des ouvrages type déversoir épis à l'entrée du bras nord n'affecterait pas ou peu le développement d'un chenal à méandre dans le bras sud, dont la capacité d'évacuation des sédiments restera faible comparé à ce qu'elle pourrait être dans un bras mieux contrôlé en plan.
- Ces nouveaux ouvrages vont modifier les mouvements des sédiments à l'amont de la bifurcation (pointe de l'île Meslet), mais n'affecteront pas tant l'effet des courants hélicoïdaux pendant les crues. Ces courants continueront à envoyer plus de sédiments charriés dans le bras Cul de Boeuf.
- Une question clé pour le succès de l'opération est de savoir si la modification du rapport des débits liquides entre les deux bras pourra augmenter la capacité d'évacuation des sédiments dans le bras sud? Malheureusement, ces mesures n'auront pas lieu avant la mise en place des ouvrages.
- Une autre question clé est de savoir si l'alimentation des sédiments charriés par dessus des ouvrages épis-déversoir, augmentera au point de dépasser de façon significative la capacité de transport solide du bras nord. Dans le cas contraire, ce bras ne s'ensablerait pas aussi rapidement qu'espéré, après la mise en place des ouvrages.
- Ce serait une erreur de construire des champs d'épis dans le bras sud pour y former un chenal à méandres. Il serait préférable soit d'aménager les rives, soit de construire des ouvrages guides, tels que nous en avons conçus et réalisés sur d'autres grandes rivières.

Bruxelles, 17 juin 2002.

## **Annexe 1: Protocoles de suivi morphologique à Le Fresnes-sur-Loire / Ingrandes - Justification et adaptation**

Le protocole de suivi d'Ingrandes prévoit un certain nombre de mesures à exécuter avant et après la construction des seuils. Suite à des difficultés d'ordre administratif, certaines mesures ne pourront être réalisées avant cette construction. On peut se poser la question de la nécessité ou de l'opportunité de réaliser complètement le programme de mesure, tel qu'il fut établi antérieurement. Après la réunion du 24 mai 2002 à Mantes se pose aussi la question de savoir si certaines mesures seraient soit superflues, soit complémentaires, notamment dans le domaine de la courantométrie.

### **1 MORPHOLOGIE TOPO-BATHYMETRIE**

#### **1.1. Objectif des mesures**

L'objectif des levés topo-bathymétriques est de suivre les changements de forme du lit en fonction de l'évolution des débits, et aussi de fournir les données de base pour l'analyse et la prédiction des changements morphologiques, qu'elles soient naturelles ou en réponse à des travaux fluviaux.

La restitution des données sous forme de cartes nécessite le traitement des données pour les rapporter à une cote de référence. Si la donnée utilisée dans les modèles numériques ou réduits est la cote topographique du lit, celle utile pour une interprétation fluviomorphologique est la profondeur réduite. Les cartes anciennes étaient toutes représentées en cotes hydrographiques. La Cellule de Mesures et Bilans de la Loire estuarienne devra chercher un consensus à ce sujet, mais nous conseillons vivement l'utilisation de la carte « hydrographique », avec les cotes référées à une ligne d'eau (d'étiage ou autre).

#### **1.2. Méthodologies**

Les sondages se font traditionnellement avec un échosondeur le long de profils transversaux, de rive à rive. La distance entre profils est fonction de la complexité de la morphologie du lit, mais aussi de l'échelle désirée. On prend généralement des distances entre profils qui sont d'environ 1 cm pour une carte avec un facteur d'échelle supérieur à 5,000 (soit une distance de 100 m sur une carte à l'échelle de 1/10,000), et de 2 à 2.5 cm pour une carte à facteur d'échelle inférieur ou égal à 5,000 m (soit une distance de 40 à 50 m sur une carte à l'échelle de 1/2,000).

Les points de sonde reportés sur la carte ont généralement une densité plus grande dans le sens transversal (donc le long du profil sondé), soit un point tous les 2 ou 3 mm. Ceci se justifie par le relief du lit fluvial, les variations de niveau dans le sens transversal étant habituellement plus fortes que dans le sens longitudinal. Un espacement des points de sonde différent dans les sens transversaux et longitudinaux ne pose pas de problèmes particuliers aux hydrographes pour le traçage manuel des iso-bathes. Ces experts connaissent les formes rencontrées d'habitude sur terrain et utilisent cette connaissance pour interpréter les fonds à vue. Par contre, le traitement des données par ordinateur donne lieu à des tracés pas toujours « naturels », du fait des algorithmes et des procédures utilisées, qui n'ont pas une « logique morphodynamique » avancée.

Des profils de mesures longitudinaux servent quant à eux à mieux définir les formes de fond, telles les dunes, dont les caractéristiques servent à interpréter les transports solides, ou les fosses locales provoquées par des ouvrages hydrauliques tels les épis. Il ne faudrait pas combiner les profils longitudinaux et transversaux pour l'établissement des cartes topo-bathymétriques, car cela peut prêter à confusion suite aux erreurs et incertitudes sur les données acquises. Ces erreurs se retrouvent surtout dans la position en plan (X-Y), mais aussi dans la cote verticale (Z). Une erreur fréquente est celle causée par le retard sur le relevé de la donnée. Elle décale les points de sonde dans un sens ou dans l'autre suivant la direction dans laquelle a été levé le profil (sens de navigation du canot de sondage).

Signalons aussi que les sondages longitudinaux peuvent fournir une information qualitative intéressante concernant la nature des fonds, à condition d'avoir un enregistrement analogique (sur papier). En effet, l'onde ultrasonique est plus ou moins absorbée selon la consistance des sédiments. Un fond composé de sable peu compacté va réfléchir moins d'énergie ultrasonique qu'une couche d'argile ou qu'une roche. Cette information ne se retrouve pas dans les données analogiques. S'il est acceptable de supprimer l'enregistrement analogique pour les profils transversaux, il est par contre plus qu'utile de le garder pour les profils longitudinaux. Le « double » écho la deuxième réflexion de l'ultrason émis avec une seule fréquence donne une autre information que l'enregistrement avec deux émetteurs de fréquences différentes (par exemple 30 et 210 kHz), qui permettent de distinguer la vase du sable ou de la roche.

La comparaison des levés de 2001 avec le levé (général) de 1999 montrent que la morphologie reproduite par ce dernier est plus « logique », avec des formes du lit telles qu'on s'attend à en trouver dans ce fleuve. Il est donc probable que l'utilisation simultanée des profils en long et en travers crée problème.

### 1.3. Conclusions et recommandations

- Reproduire les cartes topo-bathymétriques en profondeurs réduites par rapport à une ligne d'eau de référence. Il faudra convenir quelle ligne utiliser: soit du débit d'étiage (utilisé traditionnellement), soit d'un autre débit plus élevé, tel celui de plein bord (ou une ligne d'eau parallèle à cette ligne de plein bord, éventuellement pour le module interannuel).
- Garder les densités de points de sondes telles que dans le levé du 11-12 avril 2002, mais établir la carte uniquement avec les profils transversaux.
- Ne pas utiliser les profils longitudinaux pour établir la bathymétrie, mais les conserver pour l'analyse des dunes. Enregistrer ces profils en analogique et en digital. Les profils utilisés actuellement sont bien placés.
- Il est préférable de ne pas réduire la fréquence des levés bathymétriques, car malgré une apparente faible mobilité du lit lors des crues observées en 2001, une comparaison des photographies aériennes de 1995 avec les cartes de 2001 montre des modifications inter-annuelles dans le bras sud Cul de Boeuf.

## 2 MORPHOLOGIE - CHAINES D'EROSION

### 2.1. Objectifs des mesures

Dans le cadre du suivi morpho-sédimentologique, l'implantation de chaînes pourra permettre de mieux cerner les processus d'érosion/dépôt de la méthode encore relativement expérimentale et rarement utilisée en complétant efficacement les simples mesures topobathymétriques.

### 2.2. Méthodologie

Le principe consiste à faire pénétrer dans le plancher alluvial, sur environ 2 m de profondeur, des chaînes métalliques dont les maillons font environ 1 cm de diamètre (voir figure 1). Ces chaînes sont repérées en x,y,z puis sont relevées, en fonction de l'objet de la recherche, après une crue, n crues, une années complète, etc.

Par rapport à une simple comparaison de données topographiques, cette méthode offre l'intérêt de fournir des éléments concernant les processus d'érosion/dépôt s'étant produits entre les deux périodes.

La figure ci-dessous montre qu'avec de simples mesures topographiques, on a une image tronquée des processus.

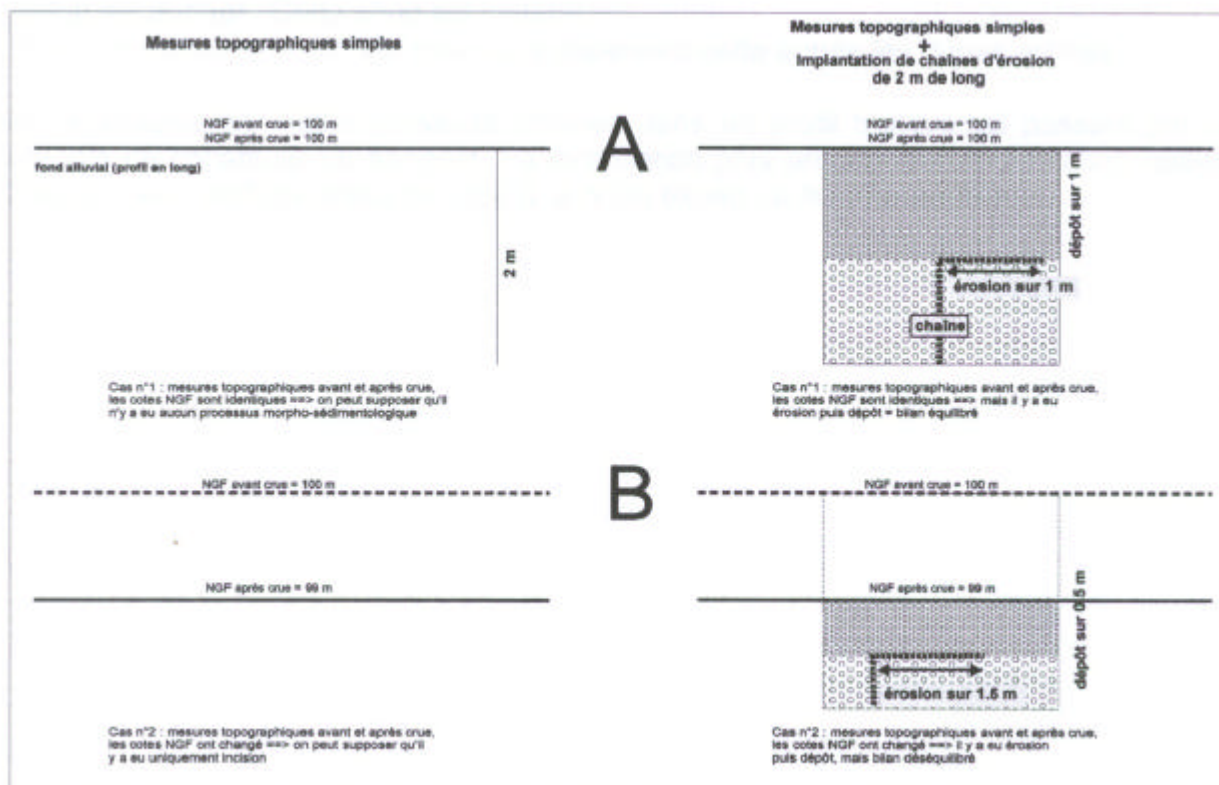


figure 1 : Intérêt de la "méthode de la chaîne" pour comprendre les processus d'érosion/sédimentation

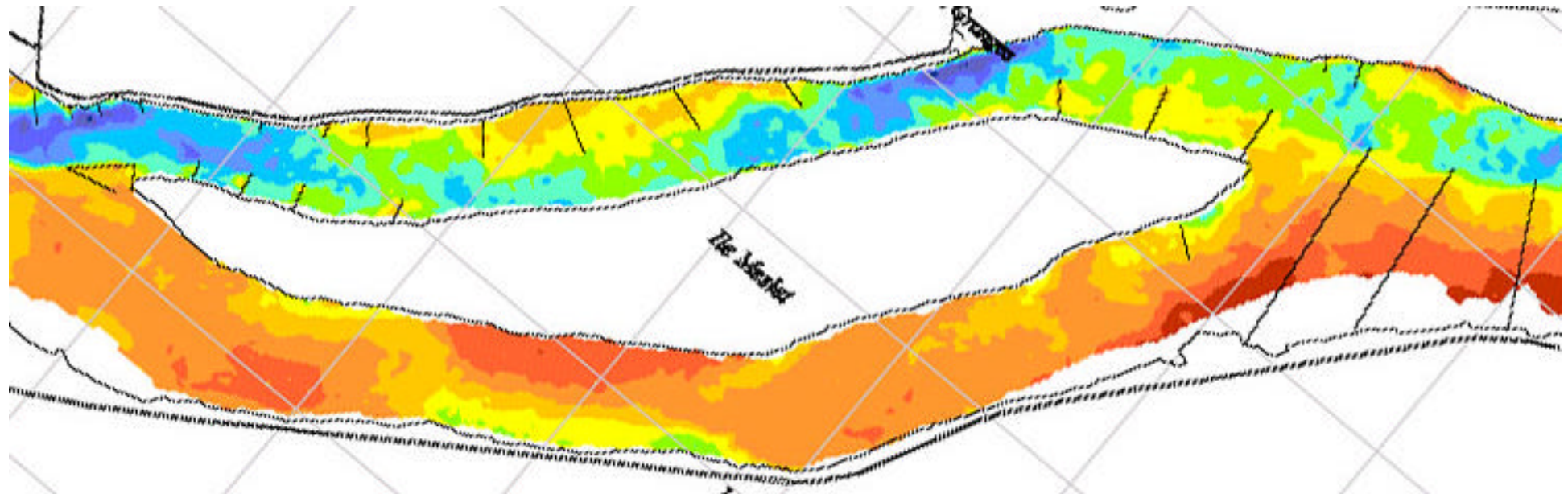
- En A, on peut imaginer, sans application de la méthode de la chaîne, que l'on a eu aucun mouvement: stabilité des fonds? Avec la chaîne, on sait que l'on a eu une érosion du fond sur 1 m et un remblaiement sur la même épaisseur. Le bilan local est toujours équilibré mais on saisit mieux les processus d'équilibrage.
- En B, on sait que l'on a eu un abaissement du fond sur 1 m dans les 2 cas, mais avec la chaîne on comprend que l'incision a été plus intense que la simple différence de cote (1.5 m) et qu'elle a été en partie compensée par un dépôt.

## 2.3. Conclusions et recommandations

Lors de l'élaboration du protocole en 2001, sans données ni reconnaissance de terrain, différents sites d'implantation de chaînes ont été proposés. À partir de l'analyse des données bathymétriques de 2001, des photographies aériennes plus anciennes et des observations faites le 24 mai 2002 lors d'une visite sur le site, les modifications suivantes de sites d'implantations des chaînes d'érosion sont proposées:

- Site A : les apports solides charriés venant d'amont se déposent au début de la crue devant la pointe de l'île Meslet dans une zone où les courants recreusent lors des eaux hautes et que le courant devient plus actif dans le bras Cul de Boeuf. Il faudrait mettre la chaîne assez proche de la fosse qui longe la pointe de l'île, fosse provoquée par les turbulences créées par la protection de la pointe.
- Site B: Cette zone est fort chahutée lors des crues. Je propose de prendre un endroit haut entre deux dépressions, à la cote de +/- 8 m IGN.
- Site C et D: Il se trouve dans un chenal actif lors de chaque crue. On pourra ainsi évaluer le recreusement éventuel.
- Site E, F et G: Ils se trouvent sur l'"axe de charriage" qui suit une ligne (environ droite) qui passe le long du bord gauche du banc situé actuellement le long de l'île Meslet puis le long du bord droit de celui longeant la rive sud du bras Cul de Boeuf, à l'aval de la mouille.
- Site H : cet endroit est dans une zone où se retrouve soit un bras actif, soit un banc, selon les années. Cette zone est instable.
- Site 1 : Il correspondrait à la zone où s'observent cette année les dunes actives.

Il est nécessaire de mettre plusieurs chaînes dans un profil transversal passant par ces points afin de constituer un transect. La localisation plus précise de l'implantation relèvera de l'appréciation de l'opérateur de terrain, a priori expert en fluviomorphologie.



11-12/04/01

## 3 HYDRAULIQUE - LIMNIMETRIE

### 3.1. Objectif des mesures

Les mesures de niveau d'eau dans des stations de référence servent à établir les lignes d'eau moyennes aux différents débits liquides (courbe de remous, c'est-à-dire le niveau d'eau en fonction de la distance longitudinale) et les hydrogrammes (évolution du niveau d'eau en fonction du temps). Les distances entre échelles de référence sont généralement grandes, de l'ordre de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres. L'information obtenue permet de connaître la résistance moyenne à l'écoulement (appelé de façon impropre la « rugosité »).

La surface de l'eau dans des fleuves comme la Loire est moins régulière qu'on ne le pense généralement. Les pertes de charges localisées par exemple sur les seuils provoquent des changements de pente hydraulique sur des distances parfois courtes; ces variations diffèrent selon le débit liquide suite aux adaptations morphologiques; les pertes de charge se modifient continuellement. Aux basses eaux, les seuils créent aussi bien des rétentions à leur amont que des écoulements plus rapides avec des pentes plus fortes à l'endroit même du seuil. Par contre, la pente d'eau sera plus constante en crue car les dénivellations créées par les seuils sont proportionnellement moins fortes qu'aux basses eaux. Les lignes d'eau seront donc une donnée fort utile pour l'analyse morphologique.

### 3.2. Méthodologies

Sur un site expérimental, tel celui d'Ingrandes, des mesures occasionnelles servent à relever les lignes d'eau aux différents débits (étiage et crue). Elles utilisent les limnigraphes et des mesures ponctuelles avec des appareils topographiques, sur chaque rive.

Des mesures continues par enregistrement des niveaux (limnigraphes enregistreurs) dans des endroits judicieusement choisis devraient renseigner sur l'existence des zones de résistance plus grande, ou plutôt, d'ensablement ou de manque d'érosion. Il faudrait pour cela adapter la distance entre points de mesure en fonction des formes observées sur les lignes d'eau.

Le traitement des données se ferait en portant en graphique les différences de niveau mesurés de part et d'autre d'un seuil (naturel ou artificiel) en fonction de la lecture d'échelle située à l'aval du seuil, selon la méthode d'analyse des pentes proposée lors de la réunion du 30 avril 2002, à Nantes. Cela fournirait une indication d'un ensablement ou d'un creusement éventuel d'un seuil particulier. L'analyse de pentes dans les deux bras de l'île Meslet nous informera sur l'efficacité des ouvrages et sur les endroits de plus grande résistance à l'écoulement qu'ils provoquent.

### 3.3. Conclusions et recommandations

- Les lignes d'eau établies jusqu'à présent dans le bras nord sont bien détaillées et conviennent pour l'analyse morphologique. Par contre, il faudrait augmenter le nombre de points d'observation le long du bras sud (Cul de Boeuf).
- Il faudrait installer quelques limnigraphes enregistreurs dans le bras Cul de Boeuf, afin de mieux suivre les phénomènes d'ensablement et d'érosion des seuils. Les appareils

seraient placés sur chaque rive dans les zones de mouille (voir carte). Nous recommandons des sondes de pression, autonomes, avec enregistrement sur système d'acquisition de données électronique (data logger).

- Mettre rapidement en pratique l'interprétation des pentes locales.

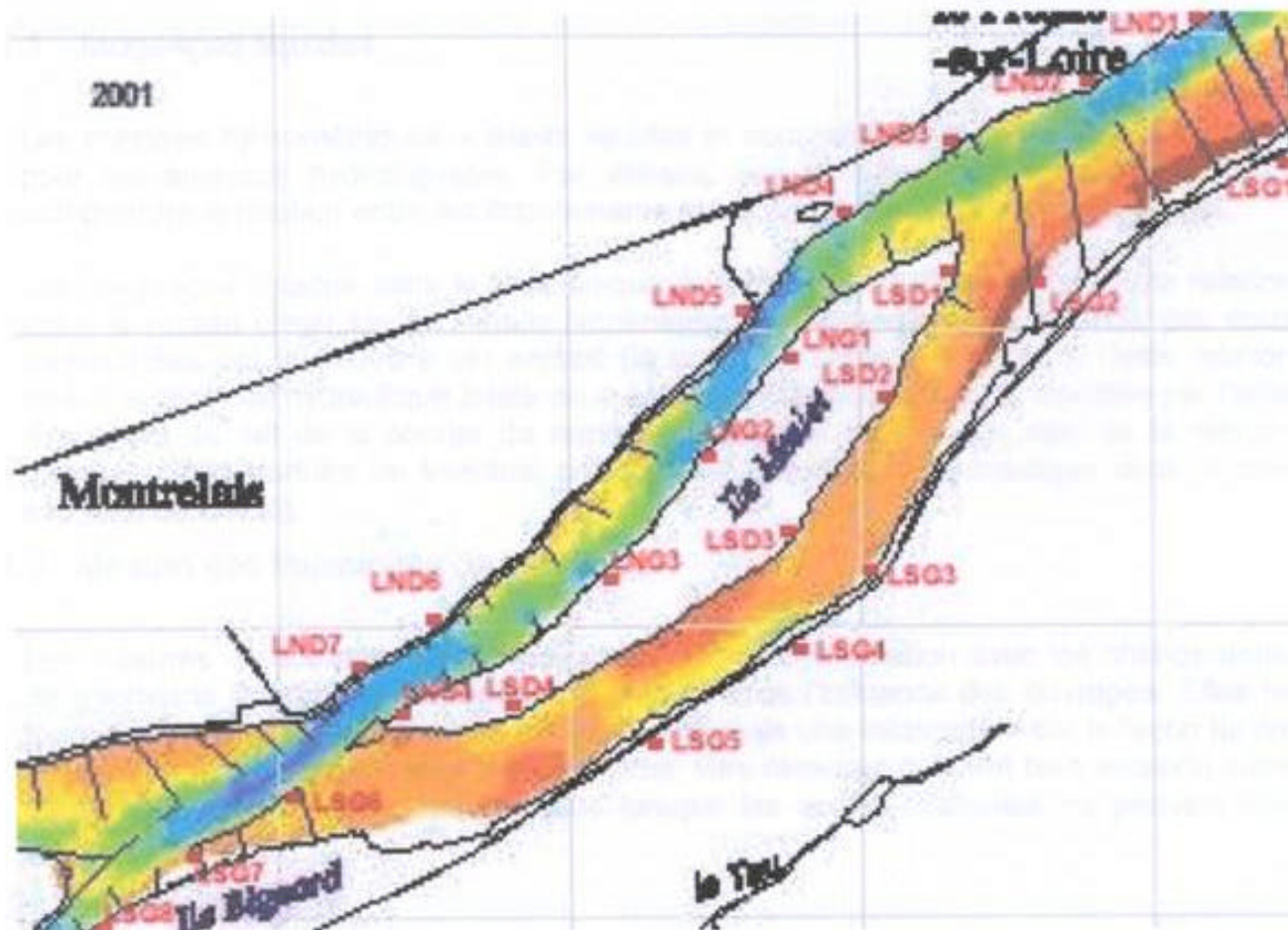


Figure A1-01 : Carte 2001 avec une proposition de points de mesure de niveau d'eau

## 4 HYDRAULIQUE - DEBITS LIQUIDES ET COURANTS

### 4.1. Objectif des mesures

#### 4.1.1. Jaugeages liquides

Les mesures hydrométriques débits liquides et courants sont des données de base pour les analyses hydrologiques. Par ailleurs, ces mesures peuvent aider à mieux comprendre la relation entre les écoulements et les processus fluviomorphologiques.

Les jaugeages liquides dans le bras unique en amont de l'île Meslet fournit la relation entre le niveau d'eau lue à l'échelle limnimétrique d'Ingrandes et la quantité des eaux transportées par le fleuve à cet endroit (la courbe « hauteur débit »). Cette relation traduit la capacité hydraulique totale de la Loire à Ingrandes. Elle sera modifiée par l'effet des seuils du fait de la courbe de remous induite par ceux-ci. Le suivi de la relation niveau débit traduira un éventuel changement de capacité hydraulique dans le bras sud (Cul de Boeuf).

#### 4.1.2. Mesure des trajectoires de courant

Les mesures de courants (de surface) sont à mettre en relation avec les changements de géométrie (morphologie) pendant la crue et sous l'influence des ouvrages. Elles ne fournissent donc pas une donnée hydrologique, mais une information sur la façon qu'ont les écoulements à entrer dans tel ou tel bras. Ces mesures peuvent bien entendu aussi servir pour calculer des débits liquides lorsque les autres méthodes ne peuvent être utilisées.

### 4.2. Méthodologies

#### 4.2.1. Jaugeages liquides

La DIREN dispose depuis peu de la technologie ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) qui permet une mesure rapide du champ de vitesse dans une section transversale et fournit une valeur du débit liquide. La méthode a été appliquée de façon routinière dans les fleuves et rivières depuis le début des années quatre-vingt-dix seulement, bien qu'elle fut développée bien avant en océanographie. Celle technique du « bateau mobile » utilise des signaux ultrasons envoyés par quatre émetteurs/récepteurs orientés en oblique par rapport à la verticale. La vitesse de l'eau par rapport au bateau est mesurée grâce à l'effet Doppler sur les particules solides en mouvement dans l'eau. La vitesse du bateau par rapport au fond est obtenue par différence de cette vitesse et celle du bateau déterminée également par l'effet Doppler sur le fond du cours d'eau.

L'expérience montre que la technique est parfaitement au point pour la détermination du débit liquide passant par une section de mesure, pour autant que le transport solide par charriage ne soit pas trop intense. Dans ce dernier cas la vitesse du bateau par rapport au fond doit être déterminée par un positionnement DGPS. La plupart des appareils travaillent maintenant selon ce principe. La mesure de la vitesse de l'eau se fait à différentes hauteurs au dessus du fond, dans des « cellules » dont l'épaisseur peut être choisie. La mesure de la vitesse n'est pas possible près du fond ni près de la surface, dans des tranches dont l'épaisseur dépend de la fréquence des ultrasons. La distribution des vitesses dans la section transversale peut être visualisée pendant la

mesure. Elle est reproduite avec beaucoup de précision, donnée fort utile pour le positionnement préalable des verticales de mesures du transport solide et du courant au moulinet hydrométrique. Signalons que des analyses de profils verticaux de vitesse dans le Projet « River Survey Project », au Bangladesh ont montré que ces profils diffèrent de ceux obtenus avec moulinet hydrométrique. Bien qu'à notre connaissance, la raison exacte de cette différence ne soit pas connue, on peut supposer que l'effet Doppler diffère selon la variation dans une verticale des dimensions des particules solides en suspension. Si l'erreur ainsi créée sur le débit liquide total est minime, il n'en va pas de même de l'erreur sur un calcul de la vitesse tractrice  $V^*$  à partir du profil vertical de la vitesse. Or, cette vitesse tractrice sert à calculer la force tractrice qui est utilisée dans la plupart des formules de transport solide. Une étude tridimensionnelle du transport solide fera donc plutôt appel à la mesure par moulinet hydrométrique et utilisera de préférence les profils verticaux acquis avec le moulinet hydrométrique. Il faut aussi savoir que le profil vertical de vitesse obtenu par moulinet hydrométrique se calcule avec des vitesses ponctuelles intégrées sur des temps de plusieurs dizaines de secondes, alors que l'ADCP moyenne ces vitesses sur un temps de quelques secondes seulement. Le profil vertical ainsi obtenu avec l'ADCP a une forme plus irrégulière que celui relevé au moulinet. L'ADCP sera utilisé pour l'acquisition des données « hydrologiques » (relation hauteur débit ou répartition des débits), mais cela en complément aux méthodes traditionnelles pour les mesures hydrauliques et sédimentologiques.

#### 4.2.2. Mesure des trajectoires de courant

Des mesures aux flotteurs sont utiles et à notre avis fort nécessaires pour les études morphologiques détaillées, telles qu'à l'Île Meslet. Les mesures de trajectoires de courant fournissent des informations qualitatives et quantitatives complémentaires aux levés topo-bathymétriques. Elles servent à la compréhension des mécanismes sédimentaires et à l'interprétation des changements morphologiques suite à des travaux en rivière. Les trajectoires de courants sont obtenues par le suivi dans le temps de la position de flotteurs, sur de grandes distances. L'avantage de la détermination de la trajectoire des courants par flotteurs vient du fait de travailler en coordonnées de Lagrange. On obtient une trajectoire moyenne, dans laquelle sont éliminées en grande partie les déviations latérales dues à la turbulence. Or, cette turbulence est fort élevée dans la Loire à hauteur d'Ingrandes. Le relevé des trajectoires de courant aux différents états de crue, simultanément avec les relevés bathymétriques, permet de suivre la manière dont les débits et les courants se répartissent entre les deux bras, et cela en fonction des modifications de la forme du lit. Les mesures ADCP sont en coordonnées d'Euler et l'appareil donne la vitesse intégrée sur un laps de temps fort court.

Les mesures aux flotteurs peuvent aussi servir d'alternative aux jaugeages ADCP ou par moulinet hydrométrique, lorsque ces techniques sont difficiles ou dangereuses à mettre en oeuvre (en forte crue avec des vitesses trop élevées, en présence de débris flottants, etc.). Le jaugeage liquide aux flotteurs consiste à lancer ceux-ci en amont d'une section transversale, de prendre le temps et la position dans (ou près) d'une section de lancement « amont », et de reprendre la position et le temps dans une section de repêchage aval, ou à proximité de celle-ci. La distance entre ces deux sections est fonction des dimensions du fleuve et de la vitesse de l'écoulement (grandeur et turbulence). Pour la Loire Moyenne, une distance entre profils de 300 mètres aux basses eaux et de 600 mètres aux hautes eaux est recommandée. La méthode requiert un relevé de la géométrie de la section transversale à mi-distance entre les profils de lancement et de repêchage. Il existe plusieurs manières de mettre en oeuvre la technique, à partir de ponts ou à partir de bateaux (voir aussi les normes ISO).

A Ingrandes, les flotteurs peuvent être lancés depuis le pont et les temps relevés au passage d'alignements mis en place par marqueurs sur les rives. Dans des conditions extrêmes, les flotteurs peuvent être simples et bon marchés (par exemple avec des planches en bois) et il ne faut pas les repêcher (nous sommes disposé à répondre à d'éventuelles questions sur la mise en oeuvre de cette technique que nous avons souvent utilisée, avec succès).

#### 4.3. Conclusions et recommandations

Les mesures de débits et courants sont indispensables à l'analyse et à la prévision des évolutions morphologiques. Il faudrait:

- Meure rapidement en oeuvre les mesures des trajectoires de flotteurs de surface pour compléter les informations topo-bathymétriques.
- L'utilisation conjointe des jaugeages de débit liquide à l'ADCP et au moulinet hydrométrique requiert une formation des techniciens. Nous recommandons l'organisation d'un atelier de formation, avec des personnes parfaitement au courant des techniques classiques et nouvelles, et surtout conscients des avantages et des limites de chacune dans les conditions rencontrées dans la Loire.
- Les mesures traditionnelles au moulinet hydrométrique sur des verticales doivent accompagner les mesures de transport solide et des formes du lit (dunes ou autre).
- Examiner l'opportunité de jaugeages liquides aux flotteurs dans des conditions extrêmes, lorsque la mise en oeuvre d'autres techniques s'avérerait difficile ou dangereuse.

## 5 SEDIMENTOLOGIE - TRANSPORTS SOLIDES

### 5.1. Objectif des mesures

Les mesures de transport solides devraient avoir trois objectifs:

- Aider à comprendre les mécanismes de transport solide.
- Servir de donnée d'entrée aux modèles
- Servir à expliquer des évolutions morphologiques du lit fluvial.

Un élément critique pour la compréhension des processus fluviaux est la distinction entre le transport par charriage et celui en suspension.

Notre première analyse fluviomorphologique montre l'importance de la fraction granulométrique supérieure aux limons. Elle renseigne aussi des transports solides importants sur et près du fond, dans des proportions changeant avec le niveau de crue. L'évaluation de l'efficacité des ouvrages à construire se basera sur les changements de taux de transport, et surtout la proportion charriage | suspension.

### 5.2. Méthodologies

Des jaugeages sur profil transversal (par exemple à hauteur du pont d'Ingrandes) devraient fournir les courbes de tarage débit liquide débit solide, aussi bien pour le charriage que pour la suspension. La mesure devrait se faire aussi bien à l'étiage que pendant une crue, de préférence lorsque seront relevés les fonds. Les verticales échantillonnées seraient choisies à l'aide des résultats d'une mesure ADCP (aussi bien la vitesse donnée par effet Doppler que la donnée « solide » donnée par la réfraction des ultra-sons).

Nous proposons dans le cas d'Ingrandes d'utiliser les appareils hollandais « Bed Load Transport Metre Amhem » (BTMA) et « Bouteille de Delft » (BD), et l'échantillonneur chinois ANX3. Les appareils utilisés pour la mesure de la fraction plus grossière que les limons seraient le BTMA et la BD. L'ANX3 servirait à établir la proportion de cette fraction par rapport à la charge totale. Le protocole de mesure avec le BTMA et la BD est présenté en Annexe 3.

### 5.3. Conclusions et recommandations

- Nous regrettons que les mesures de transport solide n'aient pas été effectuées avant construction des ouvrages épis déversoir. Les seules références en crue seront donc les calculs de transport solide effectués avec des modèles mathématiques dont on connaît l'imprécision dans ce domaine.
- Il faudrait mettre en oeuvre au plus vite les mesures de transport solide, quitte à trouver une solution temporaire avec des équipements disponibles en Europe.

---

## 6 SEDIMENTOLOGIE - ANALYSE DES SEDIMENTS PRELEVES AU FOND OU EN TRANSPORT

### 6.1. Objectif des mesures

Lors de la visite de terrain, nous avons pu constater sur le lit émergé des granulométries fort diverses, selon les endroits. Elles sont le résultat des processus de transport pendant les crues: érosion, transport et dépôt sélectifs, écoulements de vidange des boires, sédimentation des fines dans les eaux piégées entre seuils.

### 6.2. Méthodologies

Il faudra combiner des échantillonnages d'étiage sur les parties émergées avec des prises d'échantillons sur les parties immergées pendant les crues. Pour ces dernières, nous recommandons le US BM-54 (une coquille à 1800). Cet échantillonneur est mieux adapté que les grappins type « Van Veen » (deux coquilles à 90°) pour les sables et graviers. Le grappin à 90° perd une partie des fines lorsque les mâchoires ne se referment pas complètement et dans ce cas, l'échantillon n'est pas représentatif.

### 6.3. Conclusions et recommandations

- Des études de sédimentologie peuvent fournir des renseignements utiles à l'analyse fluviomorphologique, à condition de bien choisir les points de prélèvement, sur base d'une étude des cartes.
- Les prises d'échantillons et leur analyse devra se faire avec d'autres partenaires, qu'il faudra consulter au sujet de la stratégie à suivre.
- Nous recommandons l'utilisation aux eaux hautes de l'échantillonneur US BM-54, à défaut d'une drague à main.

## **Annexe 2: Commentaires personnels concernant l'approche des questions morphologiques de la Loire à Ingrandes**

Les changements morphologiques de la Loire sont préoccupants et il est évident que les services en charge de la gestion et de la maintenance de ce grand fleuve désirent trouver au plus vite des solutions pour rendre à ce grand fleuve une morphologie et une dynamique plus adéquates. Notre travail s'inscrit dans l'approche générale, mais nous pensons utile de rendre plus claire les options que nous proposons. Il nous semble aussi utile de commenter les approches choisies par d'autres.

La morphologie fluviale est un domaine extrêmement complexe. Les ingénieurs n'ont pas à leur disposition tous les outils dont ils auraient besoin pour décider les interventions ou les mesures à prendre pour mieux aménager le cours d'eau. Les décisions sont alors prises sur base d'hypothèses et d'appréciations subjectives. Dans ce domaine, l'expérience est un élément clé du succès.

Le site expérimental de Le Fresne-sur-Loire / Ingrandes est un exemple type d'un tronçon de fleuve où la morphologie du cours d'eau s'est adaptée avec le temps aux interventions humaines (construction d'épis, stabilisation de berges, etc.). L'approche suivie actuellement par les services gestionnaires du cours d'eau consiste à essayer une solution technique la construction de seuils déversoirs destinée à modifier la répartition des débits liquides. L'idée première est que la nouvelle répartition des débits liquides (espérée) provoquera une remontée des fonds dans le bras principal et relèvera en conséquence la ligne d'eau. Un suivi avec des mesures in situ devrait permettre d'évaluer l'efficacité de la solution. Sur base des résultats de cette expérimentation seront alors décidés des travaux à effectuer sur d'autres sites.

Lors de la réunion du 30 avril 2002, à Nantes, j'ai essayé de donner une première interprétation des documents en ma possession, mais j'ai également tenté de démontrer avec d'autres exemples la complexité d'une bifurcation. Ces exemples étaient pris dans des rivières et fleuves sans doute différents, mais qui ont malgré tout, de nombreuses similitudes de comportement avec les sites sur la Loire. J'ai apprécié à sa juste valeur le commentaire fait par le modélisateur mathématique (DHI-France), qui trouvait mon exposé fort intéressant du point de vue scientifique, mais qu'il fallait bien entendu maintenant utiliser les outils dont on disposait pour trouver rapidement les solutions d'ingénieur

Il faut faire un constat: il n'existe actuellement sur le marché aucun modèle qu'il soit numérique ou réduit capable de reproduire correctement une évolution morphologique complexe comme celle du lit de la Loire. On assiste à des développements remarquables dans la modélisation numérique, mais même un modèle unidimensionnel n'est pas en mesure de reproduire correctement les transports solides, l'élément de base pour toute modélisation morphologique. On peut bien entendu « calibrer » les modèles, de façon à ce que les résultats se rapprochent de la réalité, mais cela ne prouve pas qu'ils la reproduisent correctement. Les modèles numériques bi-dimensionnels commerciaux existants et il n'y en a pas beaucoup sont basés sur un certain nombre d'hypothèses qu'il n'est actuellement pas possible de vérifier. C'est le cas pour la reproduction des courants secondaires, en particulier les courants hélicoïdaux dans les courbes. Les développeurs de ces modèles ont dû inclure une hypothèse sur la déviation de la direction de la force tractrice par rapport à celle de la vitesse. D'autre part, il faut généralement donner aux coefficients de calibrage dans des situations complexes comme dans les bifurcations des valeurs peu réalistes peu « logiques » et variant fortement sur de courtes distances alors que les fonds restent les mêmes.

---

Je n'ai pas encore vu une seule simulation réellement convaincante. Malgré cela, ces outils avec leurs imperfections sont un appui certain dans les analyses des comportements morphologiques des fleuves et rivières. L'approche devrait être dans tous les cas une combinaison d'outils, chacun ayant ses points forts et ses points faibles: la simulation par modèles numériques, la simulation par modèles réduits, les études de terrain (à ne pas confondre avec la collecte de données in - situ pour alimenter les modèles). Ces études de terrain ont la réputation d'être difficiles et coûteuses, mais il faut savoir quels sont les enjeux, techniques et financiers. Enfin, il faut bien constater que la plupart des développeurs de modèles ne jouent pas cartes sur table; ils ne fournissent pas aux clients les explications nécessaires les dessous des cartes surtout sur ce que peut, et ce que ne peut pas faire leur modèle.

Partant du constat qu'il nous manque les connaissances, les concepts de base notamment au sujet du transport solide et de sa relation avec l'écoulement et avec la forme du lit j'ai tenté d'expliquer lors de la réunion du 30 avril 2002 l'utilité d'une approche faisant appel à des outils multiples, mais dans laquelle l'étude de terrain vient en premier. Avec cette approche, nous avons obtenu des succès prouvés, menant à des solutions d'ingénieur efficaces et justifiées du point de vue économique.

## **Annexe 3: Objectifs et techniques des mesures de transport solide par charriage**

Les campagnes de mesure dans la Loire à Le Fresne-Ingrandes ont plusieurs objectifs. La qualité des études dépendra de la compréhension des processus sédimentaires et de la relation de ceux-ci avec les changements morphologiques.

Le premier objectif est de connaître les mécanismes de transport solide selon l'endroit et les conditions d'écoulement. En particulier, l'importance relative du transport par charriage par rapport à celui en suspension est un élément clé, de même que l'interaction entre la suspension et le charriage. On parle parfois de la saltation, mais cette notion devrait être mieux précisée.

Le deuxième objectif est de vérifier s'il existe des relations entre les débits liquides et les débits solides. Ces relations doivent aider dans les études, en particulier pour l'analyse des données et leur utilisation comme conditions aux limites dans des modèles réduits ou numériques.

Le troisième objectif est d'identifier les relations entre le transport solide et la géomorphologie du fleuve. Cette connaissance doit servir à mieux concevoir les travaux fluviaux. Elle doit illustrer la relation entre la morphologie, les écoulements et transports solides (dans des phénomènes comme les érosions en pied de levée), la création de zones préférentielles de dépôt de sédiment, la formation des chenaux et des seuils.

Les campagnes de jaugeage doivent être organisées de manière flexible, profitant au mieux des conditions de terrain. Les campagnes ayant pour objectif la compréhension des processus de transport solides doivent se faire à différents états de crue, mais ne devraient pas être répétées trop souvent dès que les résultats sont suffisants pour préciser les protocoles de mesures de routine.

Les campagnes de jaugeage solide dans des sections transversales doivent être réparties dans le temps, tout au long d'une crue. La fréquence des mesures sera adaptée en fonction des relations trouvées entre le débit solide et le débit liquide. Si la relation est stable et/ou univoque, la fréquence pourra être diminuée. Si par contre la relation est instable et variable, les campagnes de mesures devront être plus fréquentes.

## **1 METHODE DE MESURE DU TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE**

### **1.1. Méthode directe**

#### **1.1.1. Choix de la méthode**

Le choix de la méthode de mesure est basé sur l'objectif de la mesure, sur la donnée attendue. Dans le cas d'Ingrandes, ces objectifs sont en relation avec l'étude des évolutions morphologiques du lit du fleuve sous l'effet d'ouvrages d'art hydrauliques. La mesure de la fraction fine de la charge sédimentaire c'est-à-dire celle aux dimensions inférieures aux limons est peu utile pour l'étude comportement morphologique de la Loire dans la zone étudiée, puisque ses eaux y charrient principalement du sable et des graviers; une erreur sur la détermination de la fraction granulométrique la plus fine n'affectera que fort peu le résultat de l'étude fluviomorphologique.

Deux types de mesures sont proposées. La première est la détermination de la distribution du transport solide dans des sections transversales; la seconde est la mesure en des endroits particuliers, de façon à obtenir une distribution spatiale. L'important est d'obtenir des données sur le transport sélectif des différentes fractions granulométriques et d'identifier d'éventuels axes de charriage, c'est-à-dire des cheminements préférentiels du matériau du lit. Les mesures doivent tenir compte de la présence des formes du lit, surtout des dunes.

### **1.1.2. Choix des types d'appareils**

Beaucoup d'experts considèrent la mesure directe du charriage comme difficile, même impossible dans certains cas. Cependant, des échantillonneurs appropriés peuvent fournir de bons résultats, fiables pour autant que leur mise en oeuvre soit correcte. Ces instruments peuvent donner des informations fort utiles pour les analyses morphologiques des fleuves et rivières, surtout sur la distribution spatiale du transport par charriage.

Les appareils pour la mesure directe du transport solide par charriage sont des pièges à sédiment, avec des tamis. Ils ne recueillent que la partie grossière du sédiment, les particules les plus fines passant au travers des mailles. Ces instruments sont parfaitement adaptés aux fleuves et rivières dont les alluvions sont composées de sables ou de graviers. Un appareil utilisé fréquemment est le piège à sable Helley-Smith, dont une version est le US BL-84 des services officiels américains. Il a l'avantage d'être peu encombrant, mais sa mise en oeuvre peut donner lieu à des erreurs importantes par rapport à l'échantillonneur BTMA (Bedload Transport Metre Arnhem) dont il a été inspiré. Ce dernier est plus fiable et reste le meilleur choix, malgré sa grande taille qui rend sa manipulation plus laborieuse.

## **1.2. Méthode indirecte**

Il n'existe pas de méthodes ou d'appareils fiables pour la mesure indirecte du transport solide par charriage. Certaines méthodes peuvent donner une idée de la distribution du transport solide par charriage, mais seulement dans certaines conditions.

### **1.2.1. Traçage de dunes**

Certains experts recommandent le traçage de dunes lorsque les alluvions sont transportés sous cette forme sur le lit. Le principe a été décrit par Hubble (1967) et la méthode a été testée dans plusieurs fleuves et rivières, notamment le Congo, le Missouri/Mississippi, le Rhin. Les dimensions et la position des dunes sont mesurées à intervalles réguliers de façon à connaître leurs vitesses de déplacement. Le taux de transport est obtenu en multipliant le volume des dunes par leur célérité. Ceci est valable pour autant que le transport par charriage est en contact permanent avec le fond et que les particules solides ne sautent pas au delà d'une longueur de dune. Sauf dans des cas exceptionnels, la méthode est peu fiable pour la mesure des taux de transport solide par charriage.

### **1.2.2. Méthode par ultrasons**

L'appareil BB-ADCP permet de se faire une idée de la vitesse avec laquelle se déplacent les particules solides au fond. Cette méthode est fort utile en complément à d'autres méthodes directes par échantillonnage, puisqu'elle donne rapidement une vue qualitative de la distribution dans la section transversale du transport solide en suspension.

## 2 MESURES DU TRANSPORT SOLIDE

### 2.1. Mesures pour identifier les mécanismes

Les mécanismes de transport solide dépendent de beaucoup de facteurs, notamment de la nature des sédiments, des conditions d'écoulement (vitesse moyenne et turbulence), de la présence de zones d'érosion et de sédimentation, de la morphologie (ta forme du cours d'eau et les formes du lit telles les dunes), de la présence de points durs naturels (seuils ou bancs rocheux, ouvrages d'art hydrauliques).

Il faut souligner la difficulté d'établir un protocole unique, chaque tronçon de fleuve ayant des caractéristiques particulières. Le programme doit donc être établi par une ou des personnes possédant une bonne compréhension de la géo-fluviomorphologie.

#### 2.1.1. Mesures du transport solide dans des verticales isolées

Des mesures seront programmées pour chaque état de la crue dans des points particuliers :

- dans un chenal entre seuils, sur la crête d'une dune/barre (en cas de présence de dunes/barres)
- dans un chenal entre seuils, dans le creux d'une dune/barre (en cas de présence de dunes/barres)
- sur un seuil (éventuellement en plus d'un endroit)
- sur un haut-fond/banc/grève
- au bord d'un banc, dans sa partie amont
- au bord d'un banc, dans sa partie médiane, où les trajectoires de courants suivent ce bord
- au bord d'un banc, dans sa partie aval, où les trajectoires de courants suivent ce bord ou le quittent

Le nombre d'échantillonnages sera suffisant pour permettre une analyse statistique.

#### 2.1.2. Jaugeage solide dans une section transversale

La méthodologie à suivre pour le jaugeage solide devra tenir compte des mécanismes de transport solide observés par les campagnes d'orientation, Il faut distinguer entre le cas où le transport solide par charriage est parfaitement distinct de celui en suspension, de celui où il ne l'est pas. Dans ce dernier cas, on assiste à une transition continue entre le transport par charriage pur (la « charge de contact ») et le transport en suspension pure (la « charge de lavage »).

##### 2.1.2.1. MESURE DU TRANSPORT DE LA SUSPENSION

Dans ce cas, la suspension est constituée à tous les niveaux de solides ayant la même distribution granulométrique, seule la concentration varie du fond à la surface. L'échantillonnage se fera soit par intégration sur la verticale, soit par mesures ponctuelles à différents niveaux dans la verticale. L'appareil sera un des suivants :

- échantillonneur à bouteille, par intégration (type US DHS-59 ou similaire);
- échantillonneur à bouteille, ponctuel (type US DHS-59 ou similaire);
- échantillonneur à sac souple (type ANX-3 ou similaire).

Alternativement, la Bouteille de Delft pourra être utilisée si le pourcentage de la fraction argileuse du sédiment est faible.

#### 2.1.2.2. MESURE DU TRANSPORT PAR CHARRIAGE DE CONTACT

Le transport du solide par charriage étant de contact, un piège à sable ou gravier sera utilisé, du type Helley-Smith/US BL-84 ou BTMA, ou similaire.

### 3 INFRASTRUCTURE ET EQUIPEMENT POUR LA MESURE DE TRANSPORT SOLIDE

#### 3.1. Mesure à partir d'un bateau

Les mesures simultanées du transport solide en suspension, de celui par charriage, et de la vitesse doivent se faire avec trois davieres équipés de treuils. L'utilisation simultanée de deux bouteilles de Delft BD-1 et BD-2 requiert un davier supplémentaire. Pour permettre une manoeuvre aisée, les davieres doivent avoir la poulie au moins à 1.5 m au dessus de la rambarde, ou au dessus du pont si la rambarde peut être enlevée à l'endroit où est manié l'appareil.

Les treuils seront équipés d'un compteur de profondeur, de préférence avec une précision centimétrique. La poulie de suspension du treuil aura un indicateur d'angle du câble, de façon à pouvoir appliquer la correction de ligne mouillée et de ligne sèche.

#### 3.2. Mesure à partir d'un pont

La mesure à partir de ponts sera évitée autant que possible. En effet, les ponts, en particulier les culées et les piles, produisent des remous qui perturbent le transport solide. Cependant, une mesure à partir d'un pont est parfois nécessaire. La plus grande difficulté provient de la hauteur du tablier au dessus du niveau d'eau. Les appareils seront opérés avec des potences/grues dont le bras devra s'avancer suffisamment loin du bord du pont.

## Annexe 3.A : Description de la Bouteille de Delft

### 1 DESCRIPTION

La bouteille de Delft est un appareil ancien, conçu il y a plus d'un demi-siècle pour les mesures de transport solide dans les cours d'eau des Pays-Bas. Le corps de cet échantillonneur a une forme profilée particulière, fruit de longues recherches au laboratoire de Delft. La prise d'eau est un embout cylindrique qui est orienté dans le courant de façon à ce que l'eau y entre à une vitesse similaire au courant environnant. Il amène l'eau dans des chambres qui forment un labyrinthe dans le corps. Le diamètre du corps s'élargit progressivement et il se termine par une face aval droite, perpendiculaire à son axe longitudinal. L'embout amovible existe en deux versions: l'une d'une section de 1.9 cm<sup>2</sup>, l'autre de 3.8 cm<sup>2</sup>. La vitesse de l'eau diminue progressivement dans le labyrinthe et les particules solides d'une dimension supérieure à 50 microns s'y déposent. La fraction la plus fine s'échappe par des ouvertures dans la face arrière. L'embout de 1.9 cm<sup>2</sup> est utilisé dans des courants rapides, généralement au dessus de 2.5 m/s et deux des quatre ouvertures de sortie doivent alors être obturées par des bouchons.

Si le corps de la bouteille est resté inchangé depuis sa conception, par contre le système de suspension de la BD a été modifié par les fabricants consécutifs. La bouteille en mode suspendu BD-1 est attaché au câble porteur et équipé d'un gouvernail équipé de deux ailerons horizontaux et d'un gouvernail vertical. La bouteille sur chariot BD-2 est fixée par une barre de suspension pouvant être déplacée en plusieurs positions, l'embout pouvant être mis respectivement à 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 et 0.5 m de la base (donc du fond). Cette base est constituée de trois supports: deux à l'avant et un à l'arrière, ce dernier équipé d'un aileron horizontal et d'un gouvernail vertical. Une position d'embout à 0.05 m du fond est recommandée. Dans les positions basses, jusque et y compris 0.3 m du fond, le corps de la bouteille est maintenu inclinée, de façon à ce qu'il perturbe le moins possible le transport solide près du fond. La bouteille est alors équipée d'embouts courbes, de façon à ce que l'extrémité en soit bien orientée horizontalement dans le courant.

### 2 PROCÉDURE D'ÉCHANTILLONNAGE

#### 2.1. Nombre de points de mesure sur la verticale

Le nombre de points sur la verticale sera choisi en fonction de l'état de la crue. Aux étiages, seule la fraction la plus fine de la charge solide sera transportée en suspension et un gradient de concentration serait observé seulement dans les premiers centimètres du fond. Au fur et à mesure de l'augmentation des débits lors d'une crue, une plus grande proportion de particules grossières sera transportée à distance du fond. Il apparaît alors une distribution plus hétérogène du transport solide dans la section transversale. Aux forts débits, une proportion importante des particules grossières peuvent être transportées loin du lit, donnant ainsi une distribution assez régulière dans la section transversale.

Des mesures d'orientation en début de campagne permettent de se faire une idée de la distribution des solides dans la section et de préciser le nombre de niveaux de mesure.

Bien que la donnée ne soit pas indispensable au calcul du taux de transport solide, il est recommandé de mesurer simultanément les courants pour connaître le profil de vitesse.

## 2.2. Opération de la Bouteille de Delft en version suspendue BD-1

La bouteille suspendue BD-1 est d'abord amenée à la surface de l'eau et le compteur de profondeur (ou tout autre système permettant d'ajuster la profondeur de mesure) est mis à zéro. L'échantillonneur est amené à la profondeur désirée et le chronomètre est déclenché. La durée de la mesure est généralement de cinq minutes, de façon à collecter un volume de sédiment suffisant pour analyse, mais aussi pour avoir un échantillon représentatif. L'échantillonnage intègre suffisamment de fluctuations de concentration, le volume d'eau ainsi « filtré » étant de plusieurs dizaines ou même centaines de litres. Le temps de collecte peut être plus long, jusqu'à dix minutes, lorsque la concentration est faible. A la fin de l'échantillonnage, l'appareil est ramené rapidement à la surface et vidé dans un système conique de collecte, après avoir ouvert une porte aménagée dans la face arrière du corps de la bouteille. L'échantillon est recueilli dans une éprouvette graduée permettant de lire le volume avec précision. Il faut s'assurer que le sédiment soit bien tassé, en donnant des petits chocs à l'éprouvette. Il faut bien rincer le corps de la bouteille avec de l'eau propre (éventuellement celle de la rivière après l'avoir fait décanter). Refermer le couvercle de la face arrière et amener la bouteille dans sa nouvelle position d'échantillonnage.

## 2.3. Opération de la Bouteille de Delft en version sur chariot BD-2

La bouteille sur chariot BD-2 doit être suspendue de façon à ce que les supports avant soient plus hauts que le support arrière. En effet, la force d'entraînement produite par l'écoulement provoque une dérive faisant basculer l'appareil vers l'avant. Il est impératif d'amener la bouteille au fond sans que les supports avant touchent en premier, car cela provoquerait une remise en suspension de sédiments et éventuellement une entrée de l'embout dans le lit, si celui-ci est meuble. Commencer par la mesure près du fond. Le choix de l'embout y est plus difficile, car le gradient vertical de la vitesse y est élevé.

## **Annexe 3.B : Description du BTMA**

### **1 DESCRIPTION**

Le BTMA (Bedload Transport Metre Arnhem) fut conçu en 1934. Une nasse est posée au fond pour récolter les particules solides qui s'y déplacent dans une couche de 0.05 m au dessus du fond. L'embouchure, d'une largeur d'environ 0.07 m, a la forme d'un tube rectangulaire qui est raccordé à une forme divergente métallique, elle-même connectée à une forme convergente constituée de mailles aux ouvertures de 0.250 mm. La différence de pression entre l'entrée de l'appareil et l'arrière de la nasse équilibre environ la perte de charge provoquée par l'écoulement dans la nasse.

La nasse est suspendue dans un cadre doté de deux supports à l'avant et d'un aileron à l'arrière. Le système de suspension est particulièrement efficace pour amener la nasse au fond sans choc, ce qui évite la prise intempestive, telle qu'observée avec l'échantillonneur Helley-Smith, qui lui ressemble.

### **2 PROCEDURE D'ECHANTILLONNAGE**

#### **2.1. Nombre de prises par station de mesure**

Comme le transport solide par charriage est pulsant et fort irrégulier, le nombre de prises d'échantillons doit être adapté à ses caractéristiques. Les mesures d'orientation pour identifier les mécanismes de transport solides donnent une idée de la variabilité du transport par charriage.

#### **2.2. Temps de la prise individuelle**

Le temps d'échantillonnage est fonction du taux de transport. Il doit être suffisamment long pour éviter une erreur trop grande sur le temps de mesure. Il ne peut par contre pas être trop long, sinon la nasse se remplirait trop de sédiment, ce qui aurait pour effet de diminuer son efficacité.

#### **2.3. Précautions lors de la manoeuvre de l'appareil**

L'échantillonneur BTMA doit être suspendu avec ses pattes avant plus hautes que la base arrière, ceci afin que cette dernière se pose en premier sur le fond. Le chronomètre est enclenché dès que l'appareil touche le fond. Le câble de suspension est déroulé de quelques mètres en plus pour éviter des effets de traction sur l'appareil, comme lorsque le bateau de mesure tourne sur son ancre. Le câble doit être remis en tension quelques secondes avant la fin de l'échantillonnage, de façon à ce que la base décolle du fond au bon moment.