



carte : www.geoportail.fr; photo : hydratec ©



RAPPORT DE PHASE 1

Tome 2 : Annexes

		11, rue Hoche 49100 ANGERS Email : hydratec_angers@hydra.setec.fr T : 02 51 47 05 73			N°affaire : 28439 Directeur de projet : B.CORTIER Responsable d'affaire : P. PEETERS Secrétaire : Réf fichier : PHASE_2-V0.docx	
Version	Date	Etabli par	Vérfié par	Nb pages	Observations	
V0	18/01/2013	CTB / PPE	CTB	138 + annexes	Emission initiale (Rapport principal + 4 annexes)	
V1	19/12/2013	CTB / PPE	PPE	138 + 6 annexes	Prise en compte des observations du GIP Loire	

SOMMAIRE

- ❑ Annexe 1 : Campagne de prélèvements granulométriques réalisées en 2011
- ❑ Annexe 2 : Campagne de mesure des débits par transect ADCP et des lignes d'eau entre La Pointe et Bellevue
- ❑ Annexe 3 : Présentation du modèle hydrosédimentaire et de son architecture
- ❑ Annexe 4 : Résultats de calage du modèle hydrosédimentaire
- ❑ Annexe 5 : Bilans sédimentaires
- ❑ Annexe 6 : Cartographie des enjeux environnementaux



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

ANNEXE 1 : CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS GRANULOMETRIQUES REALISEES EN 2011



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

SOMMAIRE

1	DONNEES EXISTANTES	2
2	PRELEVEMENT COMPLEMENTAIRES	3
3	ANALYSE DES RESULTATS	13
4	CONCLUSIONS	18

1 DONNEES EXISTANTES

Les données existantes les plus récentes portent sur les mesures d'Hydro-expert et d'Astérie réalisées en 1998 (1^{ère} campagne) et 2006 (2^{ème} campagne) sur 12 transects (profil 2 à 75) répartis entre la Pointe et le seuil de Bellevue. Sur chaque transect, 8 prélèvements ont été réalisés (5 dans le chenal principal et 3 dans le bras secondaire ou dans les bancs entre épis). Le tableau ci-après récapitule les prélèvements de matériaux réalisés.

Au total, 93 prélèvements ont été réalisés, dont 65 dans le chenal principal, 22 dans les bras secondaires, et 9 entre épis.

N° de site	N° de profil	commune	Nbre de prélèvements		
			Chenal principal	Bras secondaire	banc entre épis
1	2	Ponts de Cé	5	3	
2	6	Bouchemaine	4	4	
3	8	Denée	5		3
4	15	Chalonnnes	5	3	
5	25	Monjean	5		3
6	30	Ingrandes	5	3	
7	39	Anetz	5	3	
8	46	Ancenis	5		3
9	52	Saint Géréon	5	3	
10	59	la varenne	5	3	
11	65	le Cellier	7		
12	75	Bellevue	6		
Total		93	62	22	9

Les échantillons prélevés ont principalement porté sur des matériaux proches de la surface dans les chenaux en eau. Seuls 9 prélèvements portent sur des bancs entre épis.

Il est remarquable de noter qu'Hydroexpert a détecté la présence du substratum rocheux sur 5 sites de prélèvement sans pour autant les préciser.

Il est probable que 3 des 5 profils concernés soient :

- P46 : seuil rocheux en amont d'Ancenis (queue de l'île Bernardeau)
- P52 : Rocher Cocheline (Aval Ancenis)
- P75 : seuil rocheux de Bellevue

2 PRELEVEMENT COMPLEMENTAIRES

L'objectif de la campagne de prélèvements complémentaires est de pouvoir caractériser la granulométrie des alluvions piégées entre les anciens épis de navigation.

Les sites de prélèvements sont localisés sur les cartes jointes à la fin de la note. Ils sont tous accessibles à pied sec en période d'étiage de Loire.

Les sites concernent pour l'essentiel les bancs d'alluvions présents entre les épis se situant sur des tronçons de lit à bras unique ou dans des bras secondaires.

Le tableau ci-après récapitule les différents sites de prélèvement.
Pour chaque site, 5 points de prélèvements ont été réalisés.

Le mode opératoire a été le suivant :

- Forage à la tarière à main d'un trou de diamètre 7-10 cm ;
- Prélèvement d'échantillon remanié à 0.5m, 1.5m et 2.5 m de profondeur ;
- Mise en sachet des échantillons prélevés (2-3 kg) ;

Le nombre total de prélèvements a été de 156 au total (52 x 3)

Les granulométries ont été effectuées sur les échantillons.

Les analyses granulométriques sur les échantillons prélevés ont été réalisées selon la norme AFNOR NF P 94-056 et respectent les tailles de tamis suivantes :

- Pour la fraction graveleuse (mm) : 20-16-12.5-10-8-6.3-5-4-3.15-2.5
- Pour les sables grossiers à fins (mm) : 2-1.6-1.25-1-0.8-0.63-0.5-0.4-0.315-0.250-0.2-0.160-0.125-0.10-0.08

Elles ont été confiées à deux laboratoires différents afin de raccourcir les délais d'analyse.

- GINGER CEBTP a analysé les 83 échantillons de la moitié amont entre Bouchemaine et Saint Florent le Vieil ;
- CETU ELMIS Ingénieries (Centre d'Expertise et de Transfert de l'Université François Rabelais à CHINON) a analysé les 70 échantillons de la moitié aval entre Saint Florent le Vieil (Bras de Varades) et Bellevue.

Tableau récapitulatif des sites de prélèvement

N° site	PK Loire	Commune	Nbre prélèvements	description sommaire	observations
1	136	Béhuard	5	Banc RG dans bras des Lombardières	aménagement des épis datant des années 1980
2	129	La Possonnière	5	banc situé en aval de la chevrette de l'Alleud dans bras de Saint George	banc fixé par végétation en aval de la chevrette
3	114	Ingrandes	5	banc RD en amont du pont	
4	111.5	Le Mesnil en vallée	5	banc RG en aval du pont d'Ingrandes	mesures effectuées sur bras de Cul de Bœuf (chaines d'érosion,...)
5	105.5	Varades	3	banc RD du bras de Varades	creusement d'un chenal dans les alluvions suite à rupture d'épis
6	100	Varades	5	banc RD aval bras de la Meilleraie	chevrette fermant l'aval du bras de la Meilleraie
7	90.5	Liré	3	banc RG en amont du pont d'Ancenis	
8	89.5	Ancenis	2	Banc rive droite en aval du pont d'Ancenis	
9	87	Oudon	3	banc dans bras de l'île Neuve-Macrière	
10	80.5	Oudon	5	banc RG en aval du pont (île perdue)	banc fixé par végétation pionnière
11	72.5	Mauves sur Loire	5	banc RG	banc végétalisé - profil hydroexpert existant (P65). Intérêt de la mesure pour comparaison avec données hydroexpert (1998 et 2006)
12	70.5	Thouaré sur Loire	6	aval chevrette île Arrouix (RD)	

Site N°1 – Bras des Lombardières – commune de Béhuard



Site N°2 : Bras de Saint georges – commune de la Possonnière



Sites 3 et 4 : Ingrandes



Site 5 : bras de Varades



Site 6 : bras de la Meilleraie – commune de Varades



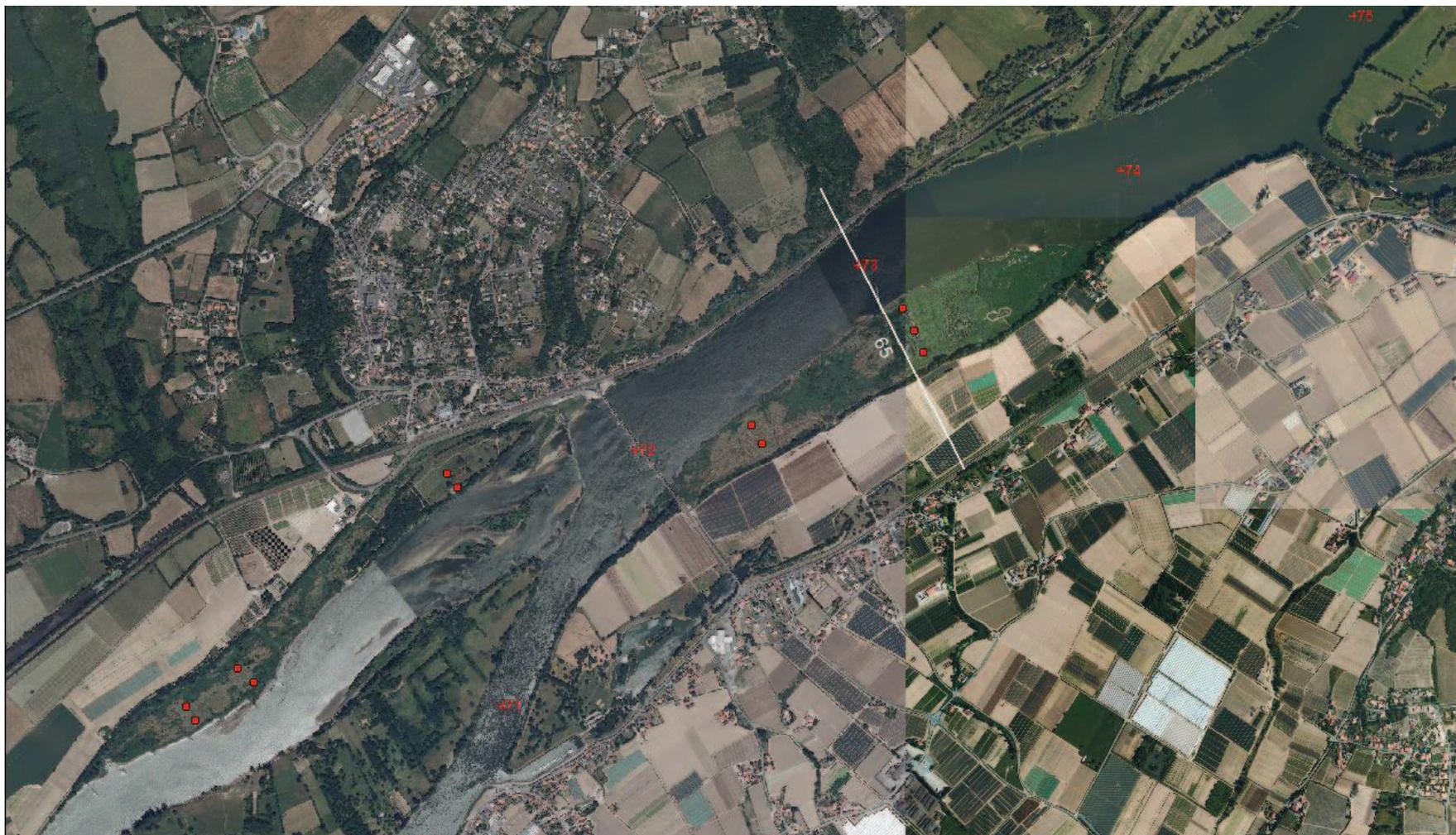
Sites 7, 8 et 9 : Secteur de Ancenis et de Oudon



Site 10 : île Perdue – aval pont de Oudon



Sites 11 et 12 : Secteur de Mauves sur Loire et de Thouaré sur Loire



3 ANALYSE DES RESULTATS

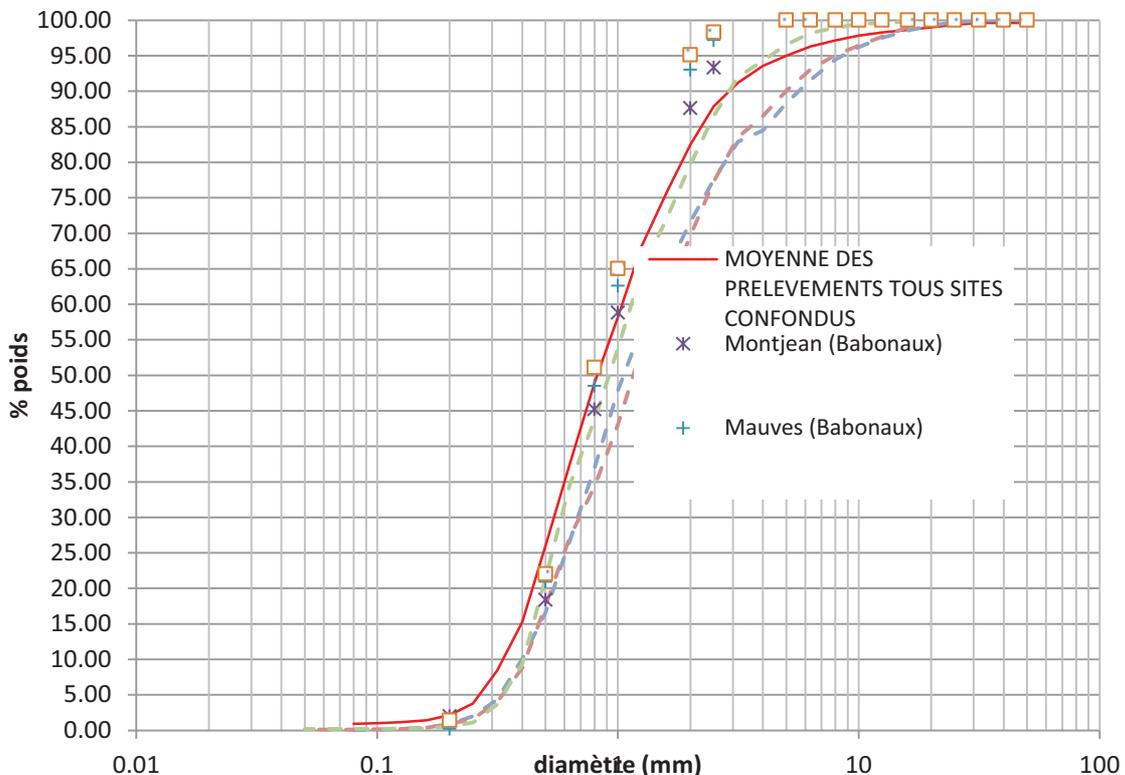
Les analyses des mesures effectuées site par site et par classe de profondeur sont indiquées dans les tableaux et sur les figure ci-après :

Granulométrie moyenne des matériaux prélevés sur les sites 1 à 11

PK	136.00	129.00	114.00	112.00	106.00	100.00	91.00	90.00	87.00	81.00	73.00	
site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	MOYENNE
d30 (mm)	0.58	0.34	0.59	0.61	0.46	0.66	0.55	0.62	0.62	0.45	0.64	0.56
d50 (mm)	0.91	0.47	0.90	0.96	0.65	1.01	0.86	0.89	0.82	0.63	0.92	0.82
d70 (mm)	1.59	1.03	1.48	1.54	1.04	1.49	1.41	1.30	1.19	0.98	1.36	1.31
d90 (mm)	3.91		3.20	3.28	2.32	1.26	2.38	1.93	2.23	1.92	2.45	2.49

Granulométrie moyenne (tous sites confondus) par classe de profondeur

	0.5 m	1.5 m	2.5 m
d30 (mm)	0.54	0.56	0.51
d50 (mm)	0.8	0.85	0.75
d90 (mm)	2.6	2.85	3.05



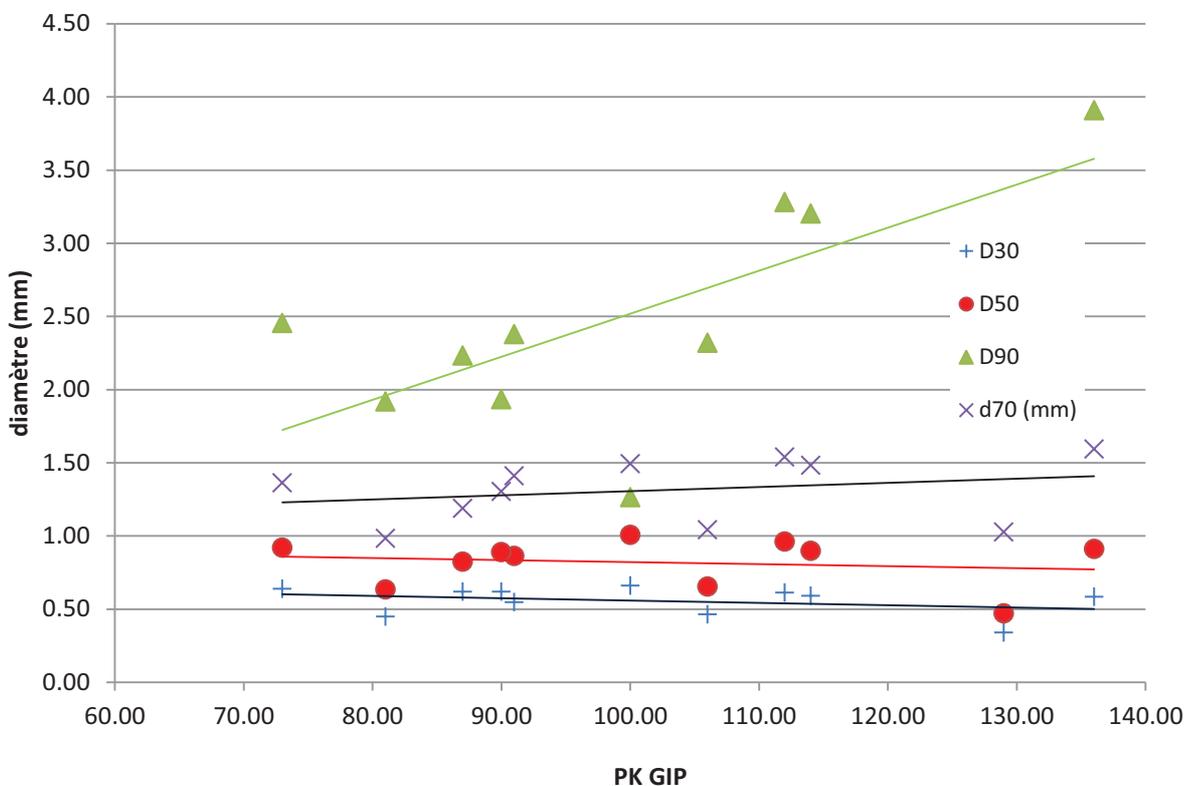
Excepté le site 2 (aval chevrette de l'Alleud) qui correspond à un banc végétalisé et qui se caractérise par une granulométrie avec de fortes proportions de matériaux grossiers dans une matrice d'éléments fins, les courbes granulométriques s'inscrivent dans un fuseau relativement resserré mettant en évidence une même origine et un même processus d'érosion des matériaux. Cela traduit l'inexistence d'apports solides provenant d'affluents importants charriant des alluvions différenciées, et le fait que l'origine principale de ces matériaux provient essentiellement de la charge amont du fleuve.

Il est intéressant de noter la faible différenciation de la taille des grains en fonction de la profondeur. Cela s'explique par l'absence d'un phénomène de pavage ou d'armure de surface et confirme la granulométrie relativement resserrée des alluvions. Le processus de dépôt et de reprise des matériaux dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaire se fait ainsi sans phénomène de tri granulométrique.

Nous nous sommes également interrogés sur des différenciations possibles liées à la localisation des prélèvements et en particulier leur situation le long du profil en long. On note en effet que le diamètre des matériaux supérieur au d_{45} pour les prélèvements correspondant à la moitié aval est plus petit que celui correspondant à la partie amont.

Pour essayer d'y voir plus clair sur une éventuelle relation entre le diamètre des matériaux et le PK Loire, nous avons reporté sur le graphique suivant les diamètres caractéristiques des grains en fonction du PK de prélèvement en Loire.

Evolution des diamètres caractéristiques en fonction du PK Loire

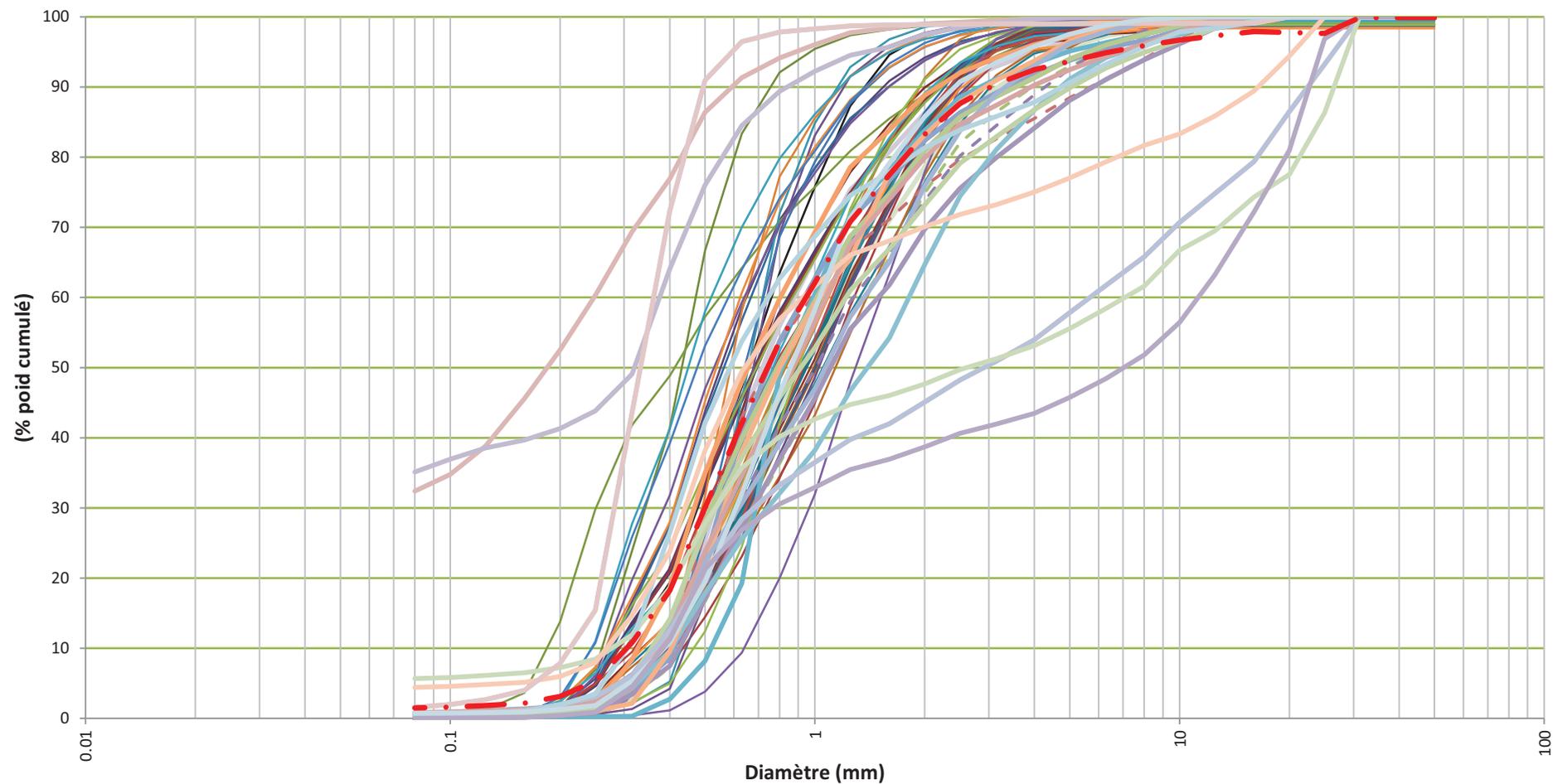


Le graphique ne met pas en évidence d'effet significatif, excepté pour le d_{90} , correspondant aux éléments grossiers.

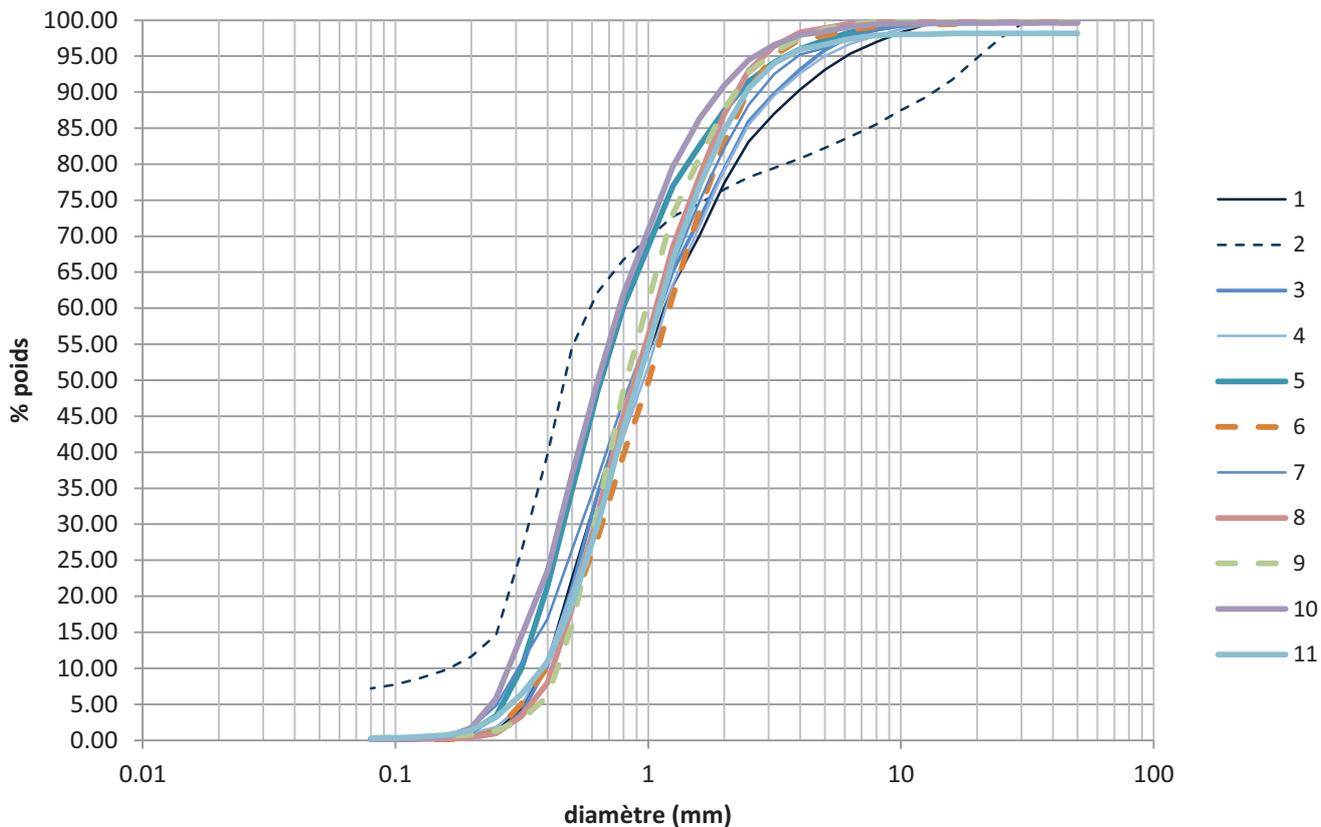
Nous avons reporté ci-après les courbes granulométriques correspondantes à des mesures antérieures dans le chenal principal et sur les grèves. Les résultats appellent les principales observations ci-après :

- ❑ Les mesures effectuées par Astérie en 2006 principalement dans le chenal principal sur les mêmes secteurs, montrent également une différenciation avec une même logique amont-aval dans la taille des diamètres.
- ❑ Les courbes correspondantes aux mesures de 2011 s'inscrivent globalement dans le fuseau des courbes des mesures antérieures.

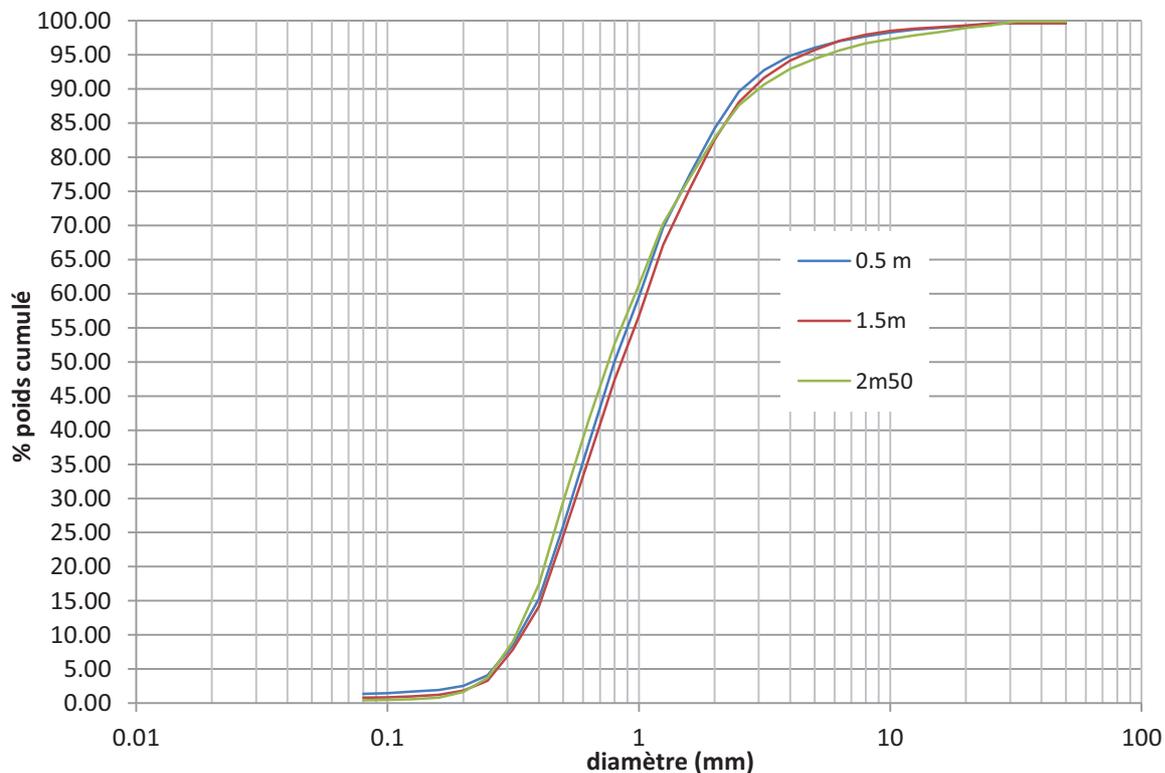
Courbes granulométriques tous prélèvements confondus (campagne septembre 2011)



Courbes granulométriques par site de prélèvement



Granulométrie tous sites confondus par classe de profondeur



4 CONCLUSIONS

Les 153 échantillons prélevés sur 11 sites répartis de l'amont vers l'aval et trois classes de profondeurs différentes (0.5, 1.5 et 2.5 m de profondeur) ont permis de caractériser les matériaux de Loire situés dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaires.

Les résultats appellent les principales observations ci-après :

- Les diamètres caractéristiques de matériaux prélevés correspondent aux valeurs (mm) ci-après :

Granulométrie moyenne (tous sites et toutes profondeurs confondus)

	Moyenne
d30	0.55
d50	0.82
d90	2.92

	Ginger CEBTP	CHINON	Moyenne
d30	0.54	0.55	0.55
d50	0.85	0.80	0.82
d90	3.79	2.33	2.92

Le d_{50} moyen obtenu est de 0.82 mm. Il correspond à une valeur inférieure aux valeurs mesurées lors des campagnes précédentes.

- 0.92 mm (Astérie 2006)
 - 1.44 mm (Hydroexpert 1998)
- Le diamètre moyen des sédiments dans les épis et dans les bras secondaire est légèrement plus petit que celui des sédiments situés en bordure du chenal principal (0.82 mm contre 1.23 mm). Cela peut s'expliquer par des conditions de vitesses plus faibles dans les marges du lit avec pour conséquence une granulométrie plus fine des matériaux s'y déposant. Ce résultat est néanmoins à prendre avec certaines précautions liées aux méthodes de prélèvement des matériaux qui ne permet pas de garder les particules les plus fines lors des échantillonnages immergés.
- Les courbes granulométriques montrent une homogénéité des matériaux qui s'inscrivent dans un fuseau resserré. Cette homogénéité des matériaux devrait faciliter la remobilisation du stock alluvial mais peut rendre leur dépôt dans l'axe principal du lit plus difficile que pour des matériaux à granulométrie plus étendue et plus grossière.
- L'absence de différenciation du diamètre moyen en fonction de la profondeur confirme le caractère plutôt homogène des matériaux rencontrés.
- Il ne semble pas y avoir de relation clairement établie entre le diamètre des matériaux et l'abscisse curviligne de leur situation en Loire. Ils représentent une même entité sédimentaire, le

stock en place résultant du dépôt progressif des matériaux provenant de la charge amont. Ces résultats ne correspondent donc pas aux résultats trouvés par Hydroexpert en 1998 sur les matériaux prélevés majoritairement dans le chenal et en bordure du chenal en eau. Ces derniers suivent en effet une loi de distribution granulométrique linéairement décroissante avec les PK. Nous n'avons pas d'explication satisfaisante pour justifier ces différences. On peut seulement avancer que les dépôts de matériaux entre les épis et dans les bras ont sans doute intéressé de façon préférentielle une classe de matériaux représentée par un mode principal proche de 0.8 mm, ce processus de piégeage ayant occulté les autres caractéristiques sédimentaires.



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

ANNEXE 2 : CAMPAGNE DE MESURE DES DEBITS PAR TRANSECT ADCP ET DES LIGNES D'EAU ENTRE LA POINTE ET BELLEVUE



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

SOMMAIRE

1	OBJECTIFS	2
2	MESURES DE NIVEAUX ET DE DEBITS DE LOIRE	3
2.1	CONDITIONS DE DEBIT	3
2.2	MODE OPERATOIRE	4
2.2.1	<i>Lignes d'eau</i>	4
2.2.2	<i>Transect ADCP</i>	5
2.3	PRESENTATION DES RESULTATS BRUTS.....	6
2.3.1	<i>Lignes d'eau</i>	6
2.3.2	<i>Transect ADCP</i>	7
3	RAPPORTS DE CAMPAGNE REALISE PAR LE CENTRE UNIVERSITAIRE DE CHINON	

1 OBJECTIFS

Les données limnographiques existantes sont insuffisantes pour représenter finement les variations des lignes d'eau liées à la succession de tronçons à lit unique et à bras multiples dans le ce bief de Loire. Ainsi hydratec a réalisé un levé du fil d'eau et de débits de la Loire au GPS pour 3 types débits à Montjean : 150, 910 et 2260 m³/s.

2 MESURES DE NIVEAUX ET DE DEBITS DE LOIRE

2.1 CONDITIONS DE DEBIT

Compte tenu des conditions hydro-météorologiques de la période d'étude, nous avons pu réaliser un levé du fil d'eau et de débits de la Loire au GPS pour 3 types débits à Montjean et des conditions de marée de vive-eau à Saint-Nazaire, soit environ :

- ❑ 150 m³/s, les 27 et 28/09/2011 (coef. de marée 114, le 28/09) pour le levé de la ligne d'eau et 120m³/s du 04/10 au 06/10/2011 pour les transect ADCP
- ❑ 900 m³/s, du 24/01 au 26/01/2012 (coef. de marée 96, le 25/01)
- ❑ 2300 m³/s, du 10/01 au 12/01/2012 (coef. de marée 91, le 11/01)

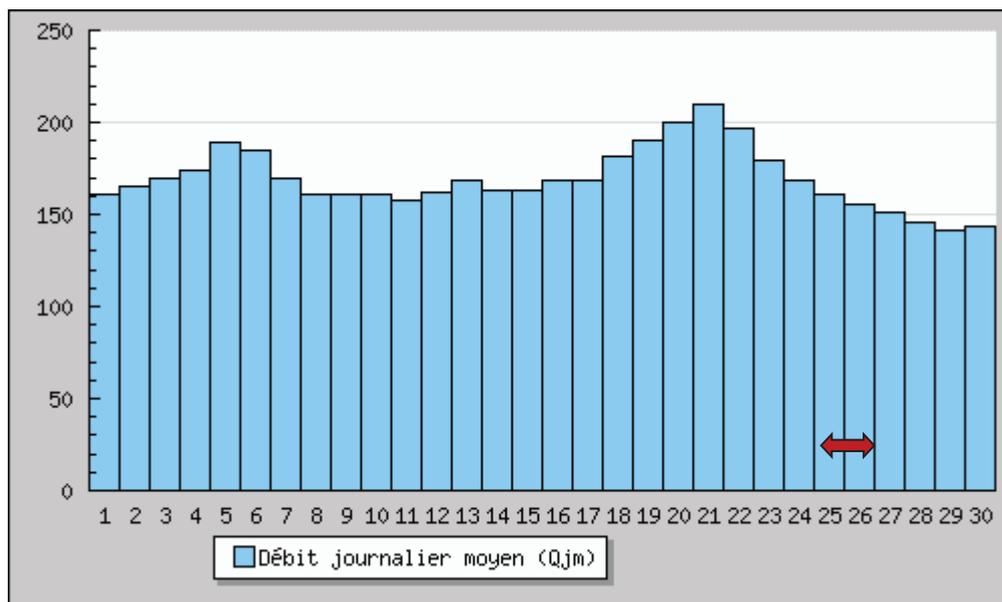


Figure 1 : Débits journaliers du mois de septembre à la station de Montjean -www.hydro.eaufrance.fr

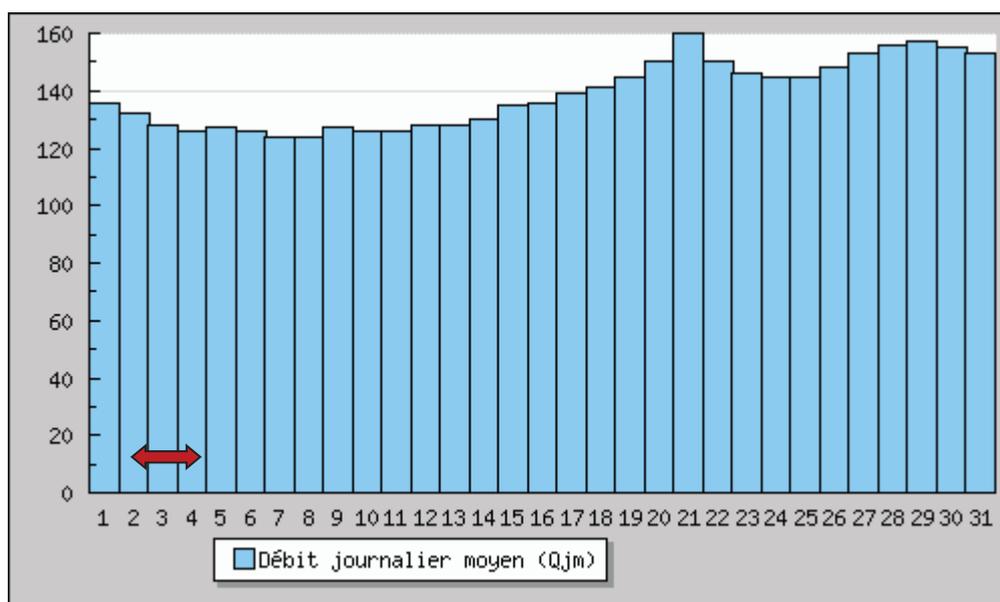


Figure 2 : Débits journaliers du mois d'octobre à la station de Montjean -www.hydro.eaufrance.fr

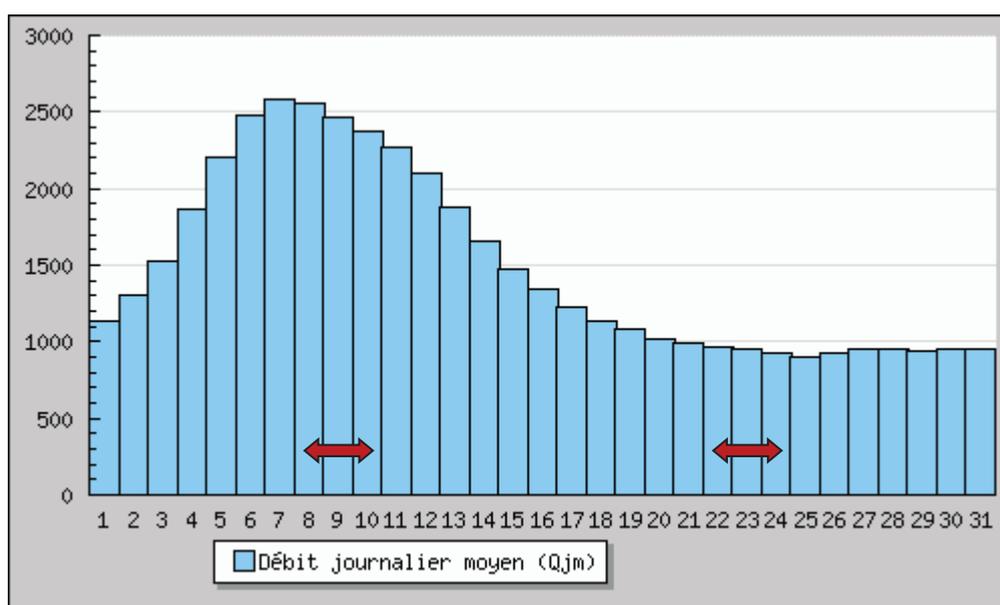


Figure 3 : Débits journaliers du mois de Janvier à la station de Montjean -www.hydro.eaufrance.fr

2.2 MODE OPERATOIRE

2.2.1 Lignes d'eau

Les mesures de ligne d'eau ont été réalisées à l'aide d'une embarcation équipée d'un GPS de type Leica GS 1200 utilisant le réseau GPS permanent de type Orphéon (précision altimétrique 2 cm). L'acquisition a été réalisée en continu, avec un point tous les 5 à 10 m, lors du trajet du bateau depuis Saint-Julien-de-Concelles jusqu'à La Pointe.

Les mesures ont ensuite été globalement compensées à l'aide des données aux limnigraphes qui équipent le tronçon de Loire entre Bellevue et les Ponts de Cé (Sainte-Luce, Thouaré, Mauves-s/-Loire, Oudon, Saint-Florent, Ingrande, Montjean, Chalennes-s/-Loire, La Possonnière)



Figure 4 : système GPS Leica GS 1200 équipant le bateau de M. Janin lors de la campagne du 12/01/2012

2.2.2 Transect ADCP

L'équipe de terrain était constituée de Philippe Jugé et Yann Guerez du CETU Elmis Chinon de l'Université de Tours et de Pierre Peeters de la société hydratec.

L'ADCP River Surveyor M9 de la marque SunTek a été mis en oeuvre depuis une embarcation légère de type Neveu Secu 12. Le suivi du fond a été réalisé par Bottom Track ou par l'asservissement d'un DGPS Proflex 500 RTK équipé du système différentiel Orphéons (précision altimétrique 2 cm).



Figure 5 : mise à l'eau du Neveu Secu 12 équipé de l'ADCP River Surveyor M9 de la marque SunTek (photo de Philippe Jugé)

2.3 PRESENTATION DES RESULTATS BRUTS

2.3.1 Lignes d'eau

Les 3 campagnes d'acquisition de ligne d'eau sont reportées sur le graphique ci-dessous :

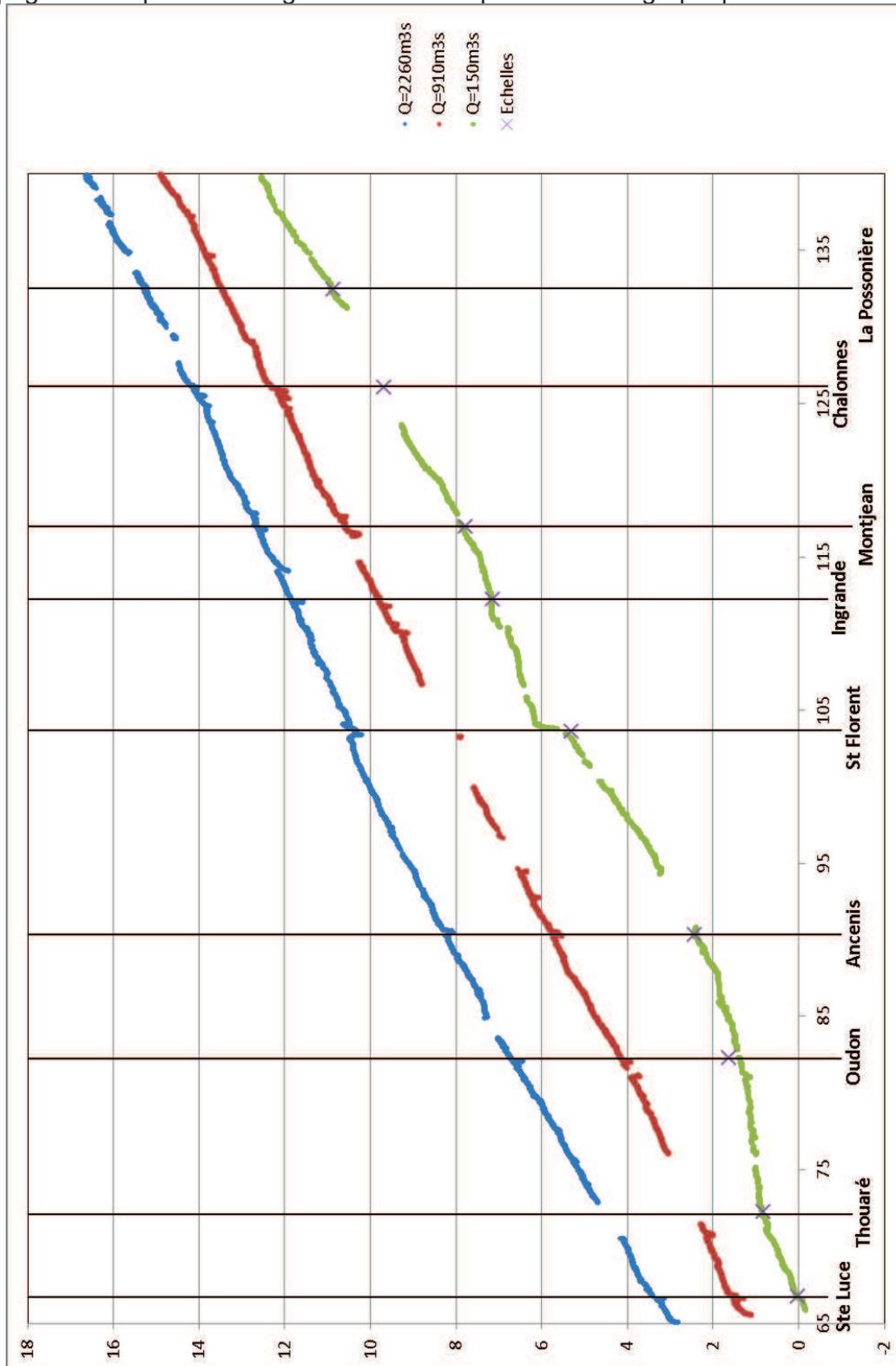


Figure 6 : Lignes d'eau de la Loire entre Sainte-Luce et La Pointe pour des débits de 150, 910 et 2260 m³/s à Montjean (Z exprimé en m IGN69)

2.3.2 Transect ADCP

L'ensemble des résultats des campagnes ADCP sont présentés ci-dessous sous forme de tableaux de résultats synthétiques.

Tableau 1 : Résumé de la campagne N°1

Campagne ADCP Basse Loire Mesure débit (m3/s)								
Ancenis	Champtoceaux Loire bras	Thouaré sur Loire principal	Thouaré sur Loire bras secondaire	Saint Florent le Vieil Loire	Saint Florent le Vieil Bras	Montjean bras principal	Béhuard Bras des Lombardièr	Béhuard Loire
04/10/2011	04/10/2011	04/10/2011	04/10/2011	05/10/2011	05/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011
143.3	6.08	510.93	-8.95	145.65	132.96	130.91	113	136.73
141.32	8.18	523.32	-4.69	145.13	130.38	131.51	106.51	138.15
144.4	3.63	539.24	-8.63	144.89	131.25	134.89	111.77	131.04
142.79	3.09	557.41	-9.63	144.89	132.95	131.59	104.77	135.3
141.67	-1.42	574.99	-8.61	144.46	132.67	130.11	110.22	124.94
142.74	-4.79	570.43	-13.71	145.24	132.4	130.13	104.05	133.34
141.13	-10.43	585.28	-18.27	144.09	134.26	131.11	104.04	126.51
144.97	-13.99	588.63	-18.24		135.17		109.55	125.03
		590.28	-16.64				108.41	128.26
		597.13						128.41
		586.63						
		594.48						
143	de 6 à -14	de 511 à 594	de -8 à -16	145	133	131	108	131

Tableau 2 : Résumé de la campagne N°2

Campagne ADCP Basse Loire Mesure débit sup 1500 m3/s débit Montjean environ 2410 m3/s										
Ancenis	Champtoceaux Loire bras	Thouaré sur Loire sud aval	Thouaré sur Loire bras nord aval	Saint Florent le Vieil Loire	Saint Florent le Vieil Bras	Montjean bras nord	Montjean bras sud	Béhuard Bras des Lombardièr	Béhuard Guillemette	Louet bras amont pont Behuard
10/01/2012	10/01/2012	10/01/2012	10/01/2012	11/01/2012	11/01/2012	12/01/2012	12/01/2012	12/01/2012	12/01/2012	12/01/2012
2275	1752	1874	309	2330	769	1217	909	1320	418	192
2250	1725	1975	319	2262	758	1205	913	1312	423	192
2232	1714	1830	309	2273	752	1218	927	1322	412	202
2326	1711	1872	315	2254	760	1195	870	1324	411	197
2276	1665	1930	315	2328	774	1223	892	1324	422	198
2340	1699	1883	319	2235	751	1203	893	1318	421	195
		1875					885			
							886			
2283	1711	1891	314	2270	761	1210	897	1320	418	196

Tableau 3 : Résumé de la campagne N°3

Campagne ADCP Basse Loire Mesure débit 800 m3/s débit Montjean environ 900m3/s												
Ancenis	Champtoceaux Loire bras	Thouaré sur Loire sud aval	Thouaré sur Loire bras nord aval	Thouaré sur Loire sud amont	Thouaré sur Loire bras nord amont	Saint Florent le Vieil Loire	Saint Florent le Vieil Bras	Montjean bras nord	Montjean bras sud	Béhuard Bras des Lombardièr	Béhuard Guillemette	Louet bras amont pont Behuard
24/01/2012	24/01/2012	24/01/2012	24/01/2012	24/01/2012	24/01/2012	25/01/2012	25/01/2012	25/01/2012	25/01/2012	26/01/2012	26/01/2012	26/01/2012
925	874	1054	-12	680	269	887	408	357	502	569	195	100
896	855	1057	-10	663	260	886	404	364	517	585	196	106
909	851	1037	-11.5			880	394	354	510	585	197	104
902	870	1035	-11			885	390	356	516	576	195.5	108
913	861	1046	-11			887	404	354	520	588	198	106
900	851	1031	-12			879	395	355	521	587	192	101
908	860	1043	-11	672	265	883	399	357	514	582	196	104

Les rapport plus détaillés du CETU Elmis sont fournis ci-après.

Campagne de mesures ADCP sur la Loire entre Angers et Nantes.

Campagne N°1 2011



Monsieur Pierre Peeters

HYDRATEC
11, rue Hoche
49100 ANGERS

Le 18 décembre 2011

Philippe Jugé (juge@univ-tours.fr)

Ingénieur d'étude CETU Elmis

Centre Universitaire de Chinon - Université F Rabelais - Tours

Sommaire

Déroulement de la campagne	4
Equipe de terrain et matériel	4
Calendrier d'intervention :	4
Conditions hydrauliques :	4
Mesures ADCP	5
Secteur d'Ancenis	6
Secteur Champtoceaux	7
Secteur Thouaré sur Loire : bras secondaire	8
Secteur Thouaré sur Loire bras principal	9
Secteur de Saint Florent le Vieil amont chevrette	10
Secteur de Saint Florent le Vieil aval de la chevrette	11
Secteur de Montjean bras principal	12
Secteur de Montjean bras secondaire	13
Secteur de Béhuard amont chevrette Loire	14
Secteur de Béhuard aval chevrette bras des Lombardières	15

Tables des illustrations

Figure 1 Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009	6
Figure 2 Profil ADCP N° 20111004101402	6
Figure 3 Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009	7
Figure 4 Profil ADCP N°20111004121847	7
Figure 5 Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009	8
Figure 6 Profil ADCP N°20111004153033	8
Figure 7 Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009	9
Figure 8 Profil ADCP N°20111004161708	9
Figure 9 Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009	10
Figure 10 Profil ADCP N°20111005105714	10
Figure 11 Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009	11
Figure 12 Profil ADCP N°20111005113627	11
Figure 13 Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009	12
Figure 14 Profil ADCP N°20111006103743	12
Figure 15 Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009	13
Figure 16 Profil ADCP N°20111006110705	13
Figure 17 Localisation des profils ADCP Loire amont de Béhuard sur la photo aérienne SIEL 2009	14
Figure 18 Profil ADCP N°20111006152454	14
Figure 19 Localisation des profils ADCP bras des Lombardières de Béhuard sur la photo aérienne SIEL 2009 (bouée rive gauche n°325).....	15
Figure 20 Profil ADCP N°20111006163129	15

Tableaux

Tableau 1 Résumé de la campagne N°1	5
---	---

Conformément à votre commande de septembre 2011, nous avons réalisé dans le lit mineur de la Loire, une campagne de mesure ADCP sur les sites sélectionnés entre la confluence avec la Maine et Nantes.

Déroulement de la campagne

Equipe de terrain et matériel

L'équipe de terrain était constituée de Philippe Jugé et Yann Guerez du CETU Elmis Chinon de l'Université de Tours et de Pierre Peeters de la société Hydratec

L'ADCP River Surveyor M9 de la marque SunTek a été mis en œuvre depuis une embarcation légère de type Neveu Secu 12. Le suivi du fond a été réalisé par Bottom Track ou par l'asservissement d'un DGPS Proflex 500 RTK équipé du système différentiel Orphéons (précision altimétrique 2 cm).

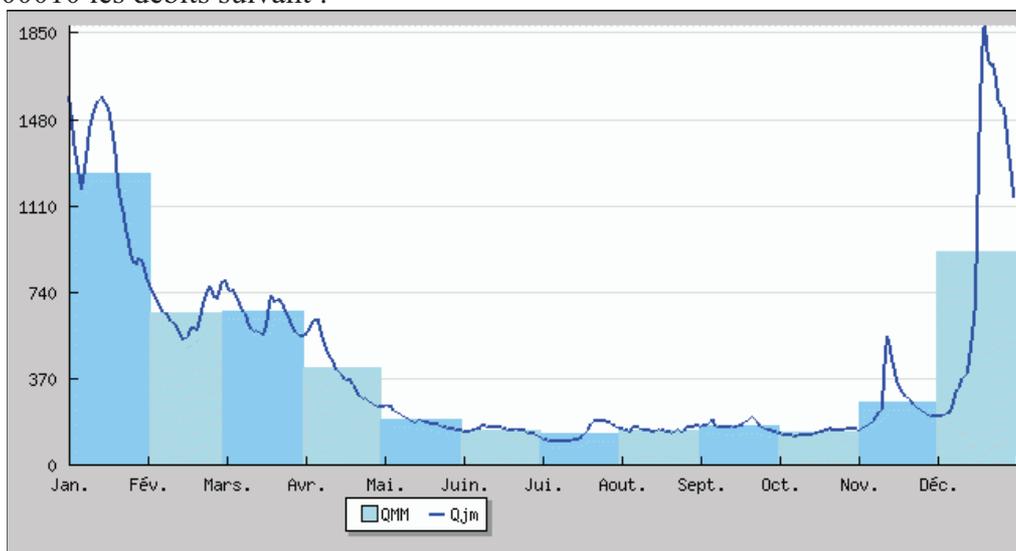
Calendrier d'intervention :

Les campagnes de mesures ont été réalisées :

- Le 04 octobre 2011 Ancenis, Ile de Thouare, Champtoceaux
- Le 05 octobre Saint Florent le Vieil,
- Le 06 octobre Montjean, Béhuard,

Conditions hydrauliques :

La banque HYDRO de la DIREN édite pour la station de Montjean sur Loire n°M5300010 les débits suivant :



Campagne N°1:

Le 04 10 2011	126	m3/s
Le 05 10 2011	127	m3/s
Le 06 10 2011	126	m3/s

Mesures ADCP

Tableau 1 Résumé de la campagne N°1

Campagne ADCP Basse Loire Mesure débit (m3/s)									
Ancenis	Champtoceaux Bras secondaire	Champtoceaux Bras secondaire	Thouaré sur Loire bras principal	Thouaré sur Loire bras secondaire	Saint Florent le Vieil Loire	Saint Florent le Vieil Bras sud	Montjean bras principal	Béhuard Bras des Lombardières	Béhuard Loire
143.3	6.08	111.69	510.93	-8.95	145.65	132.96	130.91	113	136.73
141.32	8.18	109.97	523.32	-4.69	145.13	130.38	131.51	106.51	138.15
144.4	3.63	107.06	539.24	-8.63	144.89	131.25	134.89	111.77	131.04
142.79	3.09	109.92	557.41	-9.63	144.89	132.95	131.59	104.77	135.3
141.67	-1.42	109.65	574.99	-8.61	144.46	132.67	130.11	110.22	124.94
142.74	-4.79	108.66	570.43	-13.71	145.24	132.4	130.13	104.05	133.34
141.13	-10.43	111.61	585.28	-18.27	144.09	134.26	131.11	104.04	126.51
144.97	-13.99	106.81	588.63	-18.24		135.17		109.55	125.03
			590.28	-16.64				108.41	128.26
			597.13						128.41
			586.63						
			594.48						
143	de 6 à -14	109	de 511 à 594	de -8 à -16	145	133	131	108	131

Secteur d'Ancenis



Figure 1 Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite

Rive gauche

Le profil ADCP (levé le 04/10/2011) est situé entre l'épi rive gauche et l'escalier des quais rive droite (ce transect est soumis à la marée)

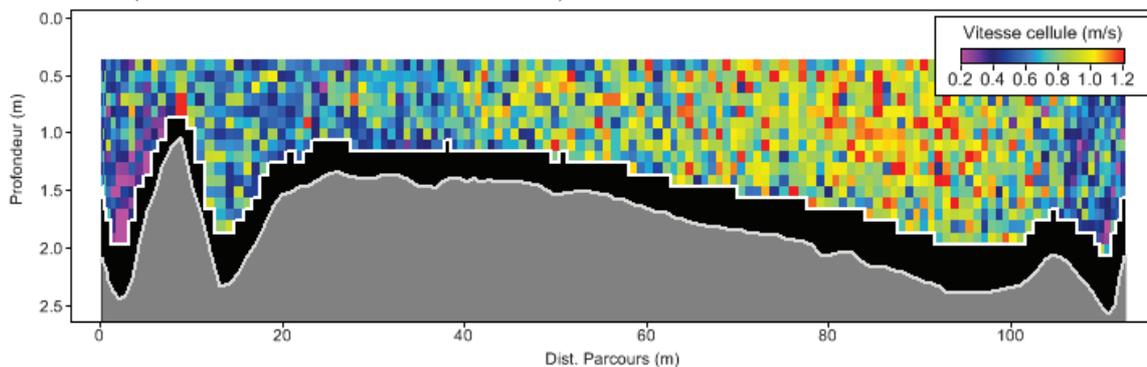


Figure 2 Profil ADCP N° 20111004101402

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 8

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 112 m

Débit moyen : 143 m³/s levé le 04/10/11 Montjean (126 m³/s)

Secteur Champtoceaux



Figure 3 Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009

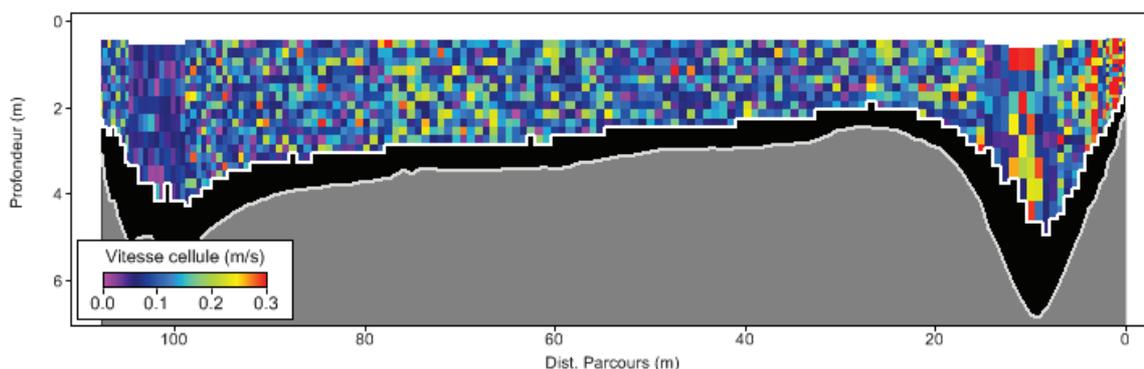


Figure 4 Profil ADCP N°20111004121847

Le profil ADCP (levé le 04/10/2011) a été levé dans le bras principal, au niveau de l'épi rive gauche (percé), en fin de levé, nous avons un flot rive gauche et un jusant rive droite.

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 8

Marée : inversion durant le jaugeage

Largeur moyenne de la section en eau : 110 m

Débit moyen : profil N°5 débits 3.63 m³/s fin de levé -13.99 m³/s Montjean (126 m³/s)

Secteur Thouaré sur Loire : bras secondaire

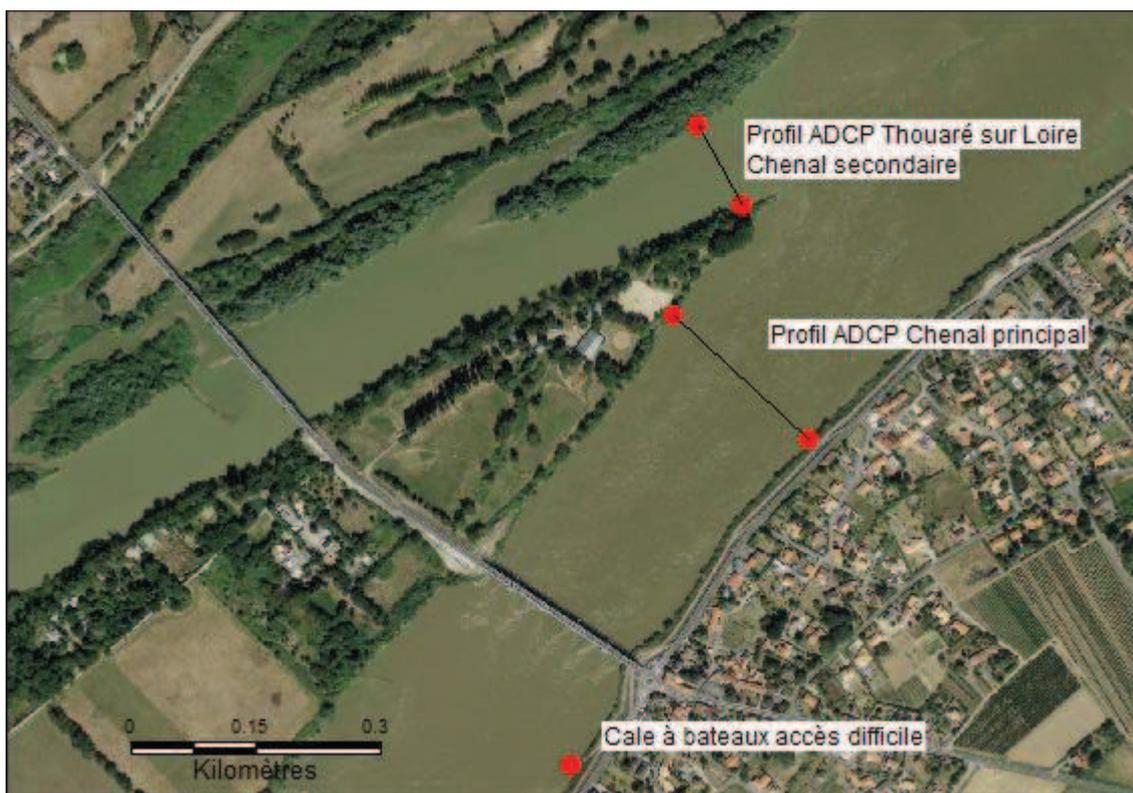


Figure 5 Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009

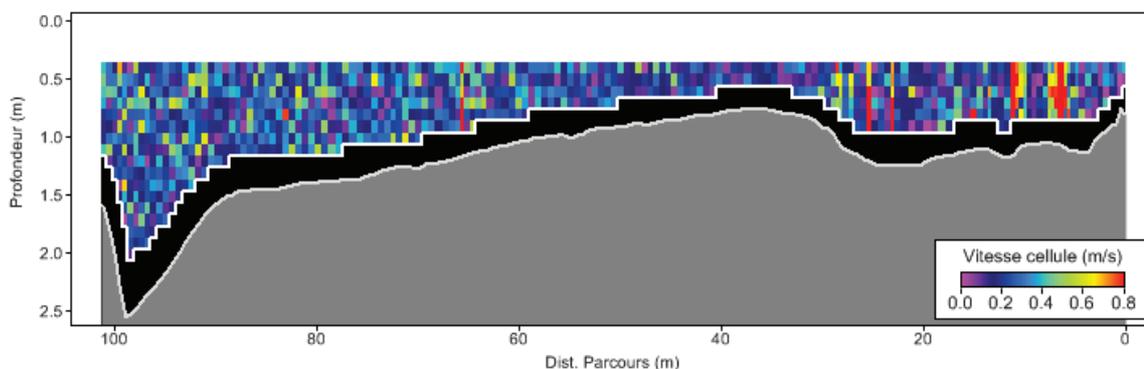


Figure 6 Profil ADCP N°20111004153033

Le départ du profil ADCP chenal secondaire (levé le 04/10/2011) est situé à 8m de la rive gauche en alignement sur le panneau de navigation rive droite

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 8

Marée : descendante

Largeur moyenne de la section en eau : 100 m

Débit moyen : profil N°2 débits - 5 m³/s fin de levé -16 m³/s Montjean (126 m³/s)

Secteur Thouaré sur Loire bras principal

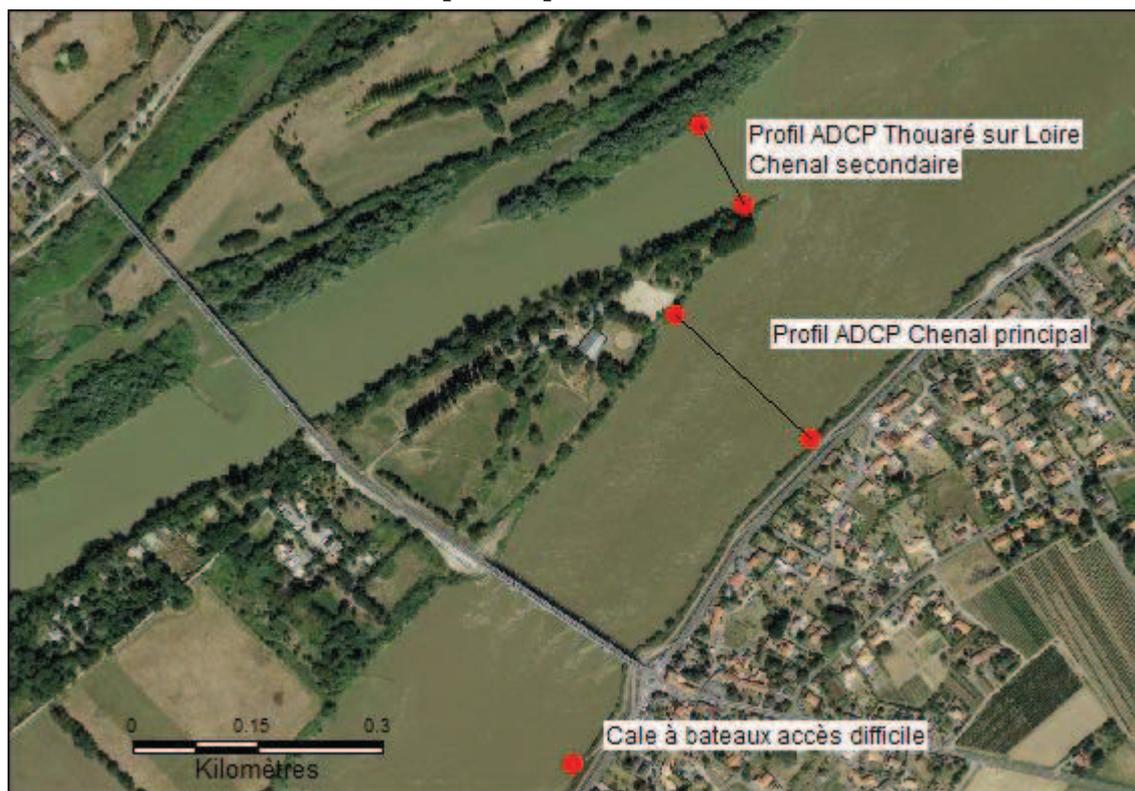


Figure 7 Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009

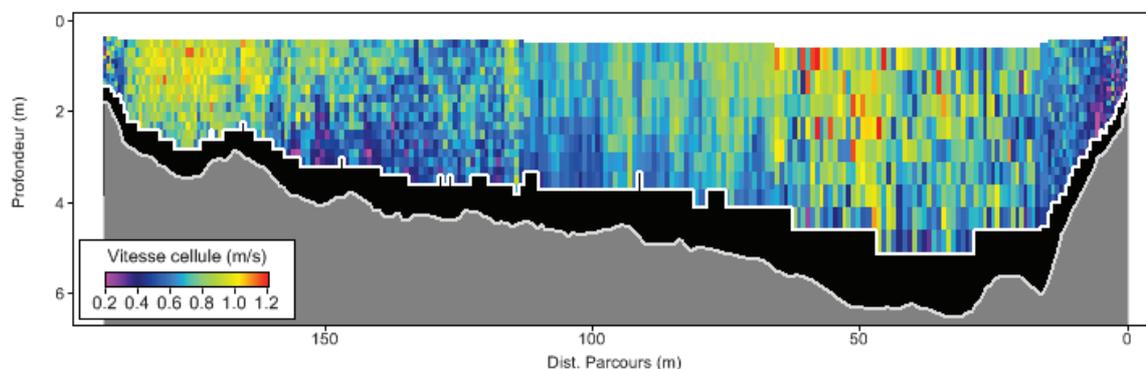


Figure 8 Profil ADCP N°20111004161708

Le départ du profil ADCP chenal principale (levé le 04/10/2011) est situé au droit de la deuxième descente sur la levée en amont du pont

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 12

Marée : descendante

Largeur moyenne de la section en eau : 190 m

Débit moyen : profil N°1 débits 511 m³/s fin de levé 594 m³/s Montjean (126 m³/s)

Secteur de Saint Florent le Vieil amont chevrette

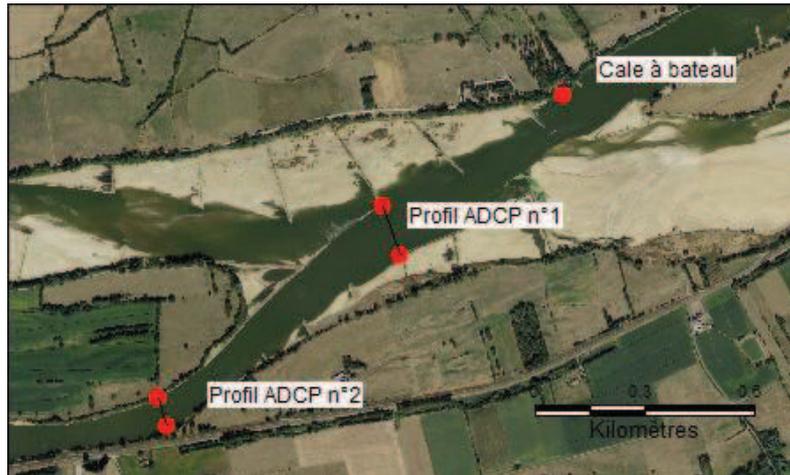


Figure 9 Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009



Localisation profil St Florent le Vieil amont levé du 05/10/11 (bouée N°189 rive gauche et N°204 en rive droite)

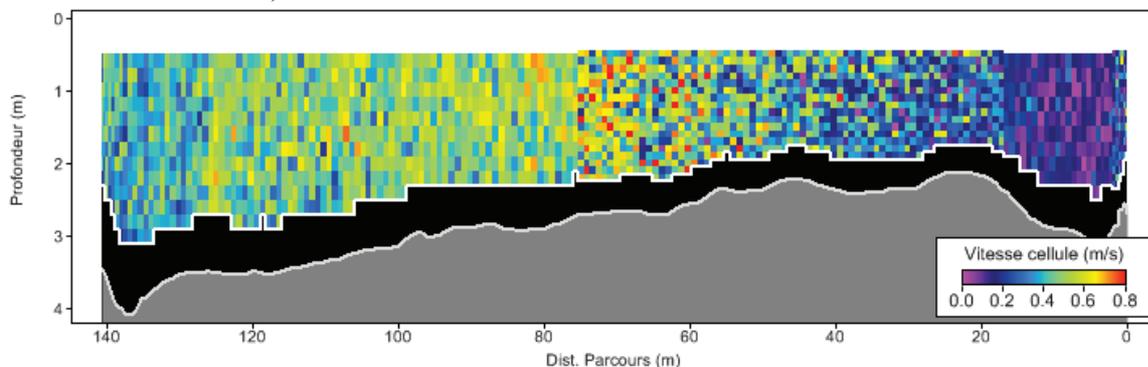


Figure 10 Profil ADCP N°20111005105714

Le départ du profil ADCP chenal principale (levé le 04/10/2011) est situé en rive droite au droit de la bouée n° 204 et en rive gauche au droit de la bouée n°189.

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 7

Marée : sans

Largeur moyenne de la section en eau : 140 m

Débit moyen : 145 m³/s Montjean (127 m³/s)

Secteur de Saint Florent le Vieil aval de la chevrette

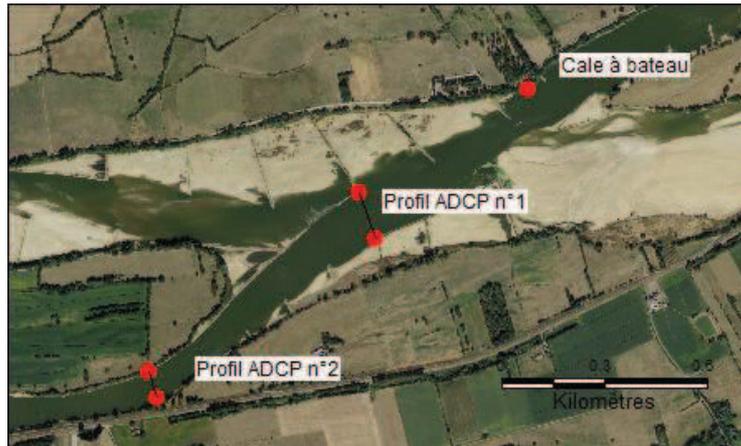


Figure 11 Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009



Localisation profil St Florent le Vieil aval levé du 05/10/11 (rive droite échelle limnimétrique)

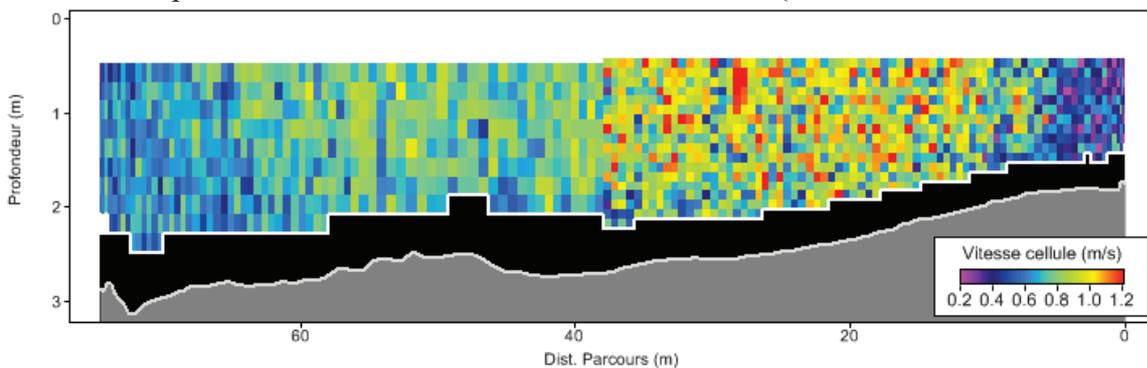


Figure 12 Profil ADCP N°20111005113627

Le départ du profil ADCP chenal principale (levé le 04/10/2011) est situé en rive droite au droit de l'échelle limnimétrique.

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 8

Marée : sans

Largeur moyenne de la section en eau : 71.5 m

Débit moyen : 133 m³/s Montjean (127 m³/s)

Secteur de Montjean bras principal

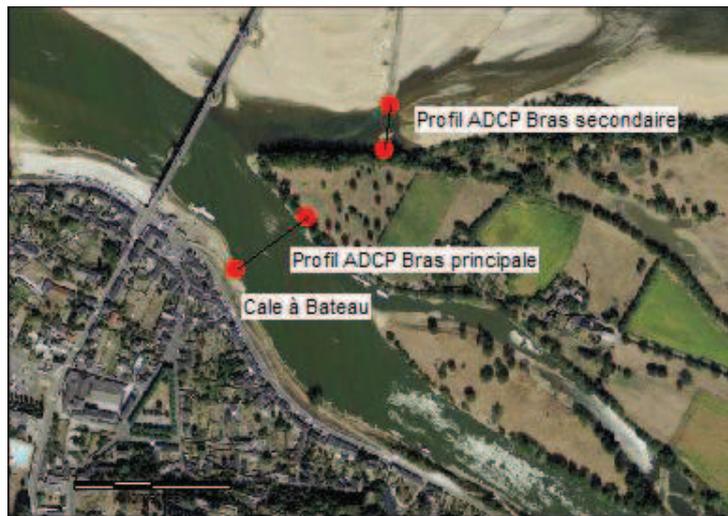


Figure 13 Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009



Localisation du profil ADCP à Montjean sur Loire sur le bras principal, levé du 06/10/11 (rive droite entre le chêne et frêne, alignement rive gauche sur escalier du quai)

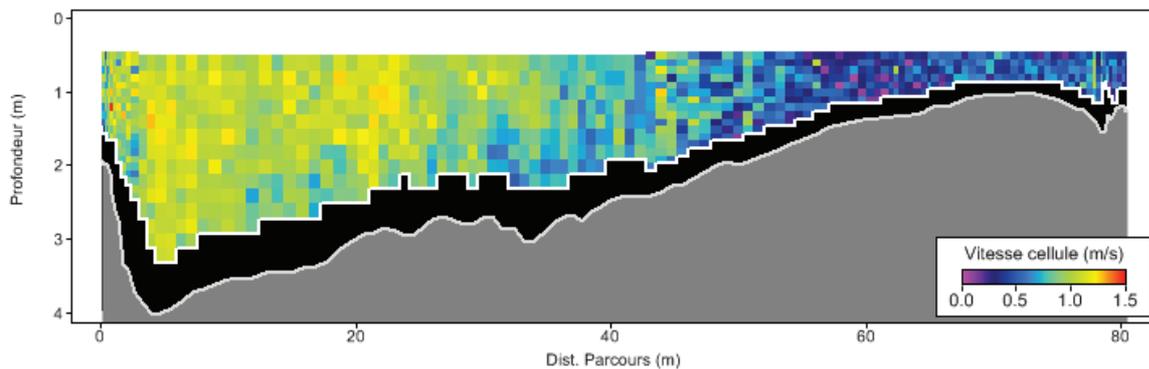


Figure 14 Profil ADCP N°20111006103743

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 8

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 76 m

Débit moyen : 131 m³/s Montjean (126 m³/s)

Secteur de Montjean bras secondaire



Figure 15 Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009



Localisation du profil ADCP à Montjean sur Loire sur le bras secondaire, levé du 06/10/11 (rive droite depuis extrémité de l'épi, alignement rive gauche sur amas résiduel de l'épi)



Figure 16 Profil ADCP N°20111006110705

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 2

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 7 m (navigation très difficile de par la faible profondeur d'eau)

Débit moyen : 1 m³/s Montjean (126 m³/s)

La mesure n'est pas validée de part les faibles profondeurs et vitesses présente sur ce site.

Secteur de Béhuard amont chevette Loire



Figure 17 Localisation des profils ADCP Loire amont de Béhuard sur la photo aérienne SIEL 2009



Localisation profil amont Béhuard en Loire, levé du 06/10/11 (rive droite au droit du premier épi en amont de la chevette)

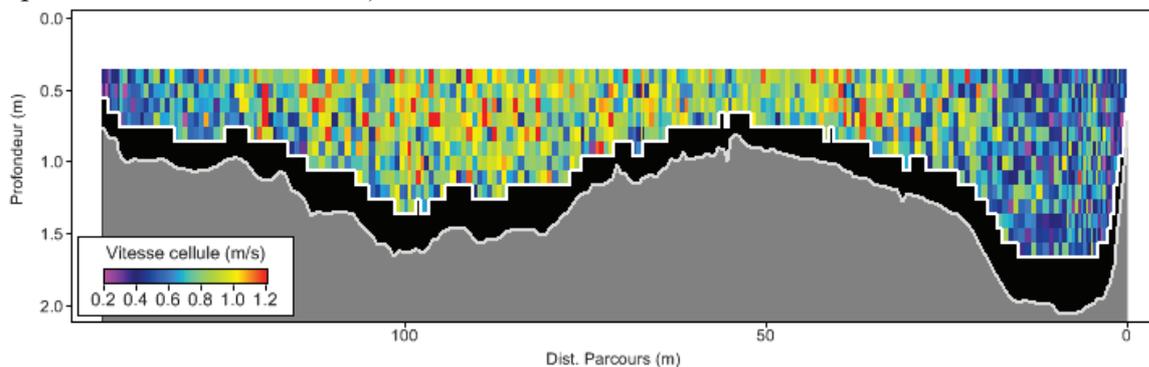


Figure 18 Profil ADCP N°20111006152454

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 2

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 136 m

Débit moyen : 131 m³/s Montjean (126 m³/s)

Secteur de Béhuard aval chevrette bras des Lombardières

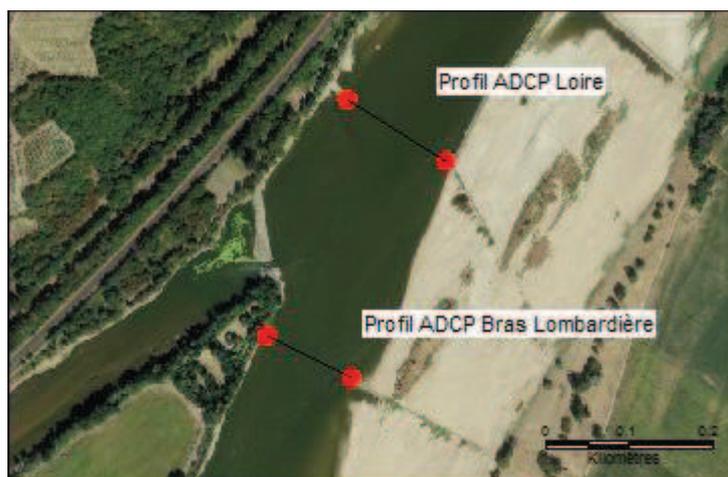


Figure 19 Localisation des profils ADCP bras des Lombardières de Béhuard sur la photo aérienne SIEL 2009 (bouée rive gauche n°325)

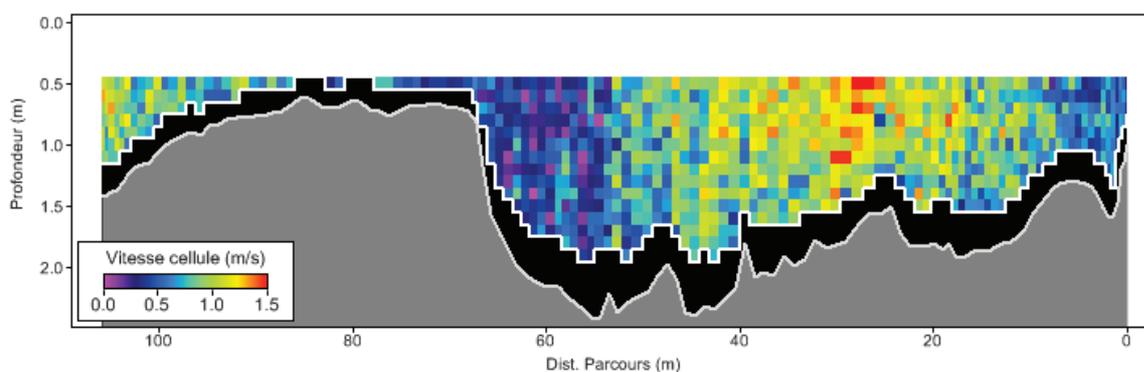


Figure 20 Profil ADCP N°20111006163129

Résumé du levé ADCP

Nombre de profils : 9 (dont 6 suivis au GPS)

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 102 m

Débit moyen : 108 m³/s Montjean (126 m³/s)



Campagne de mesures ADCP sur la Loire entre Angers et Nantes.

Campagne C2 et C3
2012



Monsieur Pierre Peeters

HYDRATEC
11, rue Hoche
49100 ANGERS

Le 23 janvier 2012

Philippe Jugé (juge@univ-tours.fr)

CETU Elmis

Centre Universitaire de Chinon - Université F Rabelais - Tours

Sommaire

Déroulement de la campagne	5
Equipe de terrain et matériel	5
Calendrier d'intervention :	5
Conditions hydrauliques :	6
Mesures ADCP	7
Présentation des mesures ADCP pour les campagnes C2 et C3	7
<i>Résultats synthétiques des débits mesurés lors des campagnes C1, C2 et C3</i>	7
<i>Résultats synthétiques des localisations des campagnes C2 et C3</i> :	8
Secteur d'Ancenis	9
Secteur Champtoceaux	11
Secteur Thouaré sur Loire bras non prospectés	13
Secteur Thouaré sur Loire bras nord aval	14
Secteur Thouaré sur Loire bras sud aval	15
Secteur Thouaré sur Loire bras nord amont	17
Secteur Thouaré sur Loire bras sud amont	18
Secteur de Saint Florent le Vieil amont chevrette	19
Secteur de Saint Florent le Vieil aval de la chevrette	21
Secteur de Montjean bras sud	23
Secteur de Montjean bras nord	25
Secteur de Béhuard bras des Guillemettes	27
Secteur de Béhuard bras des Lombardières	29
Secteur de Béhuard le Louet	31

Tables des illustrations

Figure 1 : Débits journaliers du mois de Janvier à la station de Montjean - www.hydro.eaufrance.fr.....	6
Figure 2 : Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009	9
Figure 3 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	10
Figure 4 : Profil ADCP C2 N° 20120110120544 (2276 m3/s).....	10
Figure 5 : Profil ADCP C3 N° 20120124100730 (909 m3/s).....	10
Figure 6 : Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009	11
Figure 7 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	11
Figure 8 : Profil ADCP C2 N°20120110145953 (1711 m3/s).....	12
Figure 9 : Profil ADCP C3 N°20120124120748 (861 m3/s).....	12
Figure 10 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009 ..	13
Figure 11 : Entrée amont petit bras nord de l'Îlot (24/01/12)	13
Figure 12 : Entrée bras amont le long de la levée nord 24/01/12.....	13
Figure 13 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009 ..	14
Figure 14 : Profil ADCP C2 N°20120110170011 (315 m3/s).....	14
Figure 15 : Profil ADCP C3 N°20120124141853 (-12 m3/s).....	14
Figure 16 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009 ..	15
Figure 17 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	15
Figure 18 : Profil ADCP C2 N°20120110172757 (1883 m3/s).....	15
Figure 19 : Profil ADCP C3 N°20120124150401 (1046 m3/s).....	16
Figure 20 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire C3 sur la photo aérienne SIEL 2009	17
Figure 21 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	17
Figure 22 : Profil ADCP C3 N°20120124154659 (260 m3/s).....	17
Figure 23 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire C3 sur la photo aérienne SIEL 2009	18
Figure 24 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C3	18
Figure 25 : Profil ADCP C3 N°20120124160837 (663 m3/s).....	18
Figure 26 : Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009 ..	19
Figure 27 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	19
Figure 28 : Profil ADCP C2 N°20120111114752 (2273 m3/s).....	20
Figure 29 : Profil ADCP C3 N°20120125091739 (880 m3/s).....	20
Figure 30 : Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009 ..	21
Figure 31 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	21
Figure 32 : Profil ADCP C2 N°20120111104448 (760 m3/s).....	22
Figure 33 : Profil ADCP C3 N°20120125104232 (395 m3/s).....	22
Figure 34 : Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009	23
Figure 35 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	23
Figure 36 : Profil ADCP C2 N°20120112104429 (894 m3/s).....	23
Figure 37 : Profil ADCP C3 N°20120125142032 (517 m3/s).....	24
Figure 38 : Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009	25
Figure 39 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	25
Figure 40 : Profil ADCP C2 N°20120112111946 (1206 m3/s).....	26
Figure 41 : Profil ADCP C3 N°20120125131347 (357 m3/s).....	26
Figure 42 : Localisation des profils ADCP Béhuard sur la photo aérienne SIEL 2009.....	27

Figure 43 : Chevrette amont du bras des Guillemettes le 26/01/12 (925 m3/s Montjean)	27
Figure 44 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	28
Figure 45 : Profil ADCP C2 N°20120112145637 (418 m3/s).....	28
Figure 46 : Profil ADCP C3 N°20120126111204 (196 m3/s).....	28
Figure 47 : Localisation des profils ADCP bras des Lombardières sur la photo aérienne SIEL 2009.....	29
Figure 48 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	29
Figure 49 : Profil ADCP C2 N°20120112153743	29
Figure 50 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	30
Figure 51 : Profil ADCP C3 N°20120126121158 (585 m3/s).....	30
Figure 52 : Localisation des profils ADCP bras des Lombardières et Louet sur la photo aérienne SIEL 2009	31
Figure 53 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3.....	31
Figure 54 : Profil ADCP C2 N°20120112164544 (197 m3/s).....	31
Figure 55 : Profil ADCP C3 N°20120126130013 (104 m3/s).....	32

Tableaux

Tableau 1 : Résumé de la campagne N°1.....	7
Tableau 2 : Résumé de la campagne N°2.....	7
Tableau 3 : Résumé de la campagne N°3.....	8
Tableau 4 : Localisation des profils Campagne N°2.....	8
Tableau 5 : Localisation des profils Campagne N°3.....	8

Conformément à vos commandes du 9 janvier et 23 janvier 2012, nous avons réalisé dans le lit mineur de la Loire, deux campagnes de mesure ADCP, C2 et C3, sur les sites sélectionnés entre la confluence avec la Maine et Nantes.

Déroulement de la campagne

Equipe de terrain et matériel

L'équipe de terrain était constituée de Philippe Jugé et Yann Guerez du CETU Elmis Chinon de l'Université de Tours.

L'ADCP River Surveyor M9 de la marque SunTek a été mis en œuvre depuis une embarcation légère de type Neveu Secu 12. Le suivi du fond a été réalisé par Bottom Track ou par l'asservissement d'un DGPS Proflex 500 RTK équipé du système différentiel Orphéons (précision altimétrique 2 cm). Les coordonnées topographiques présentées dans ce rapport sont rattachées au système RGF 93 et NGF IGN69.

Calendrier d'intervention :

Les campagnes de mesures ont été réalisées :

Pour la Phase C2 :

- Le 10 janvier 2012 Ancenis, Ile de Thouare, Champtoceaux
- Le 11 janvier 2012 Saint Florent le Vieil,
- Le 12 janvier 2012 Montjean, Béhuard bras des Lombardières et bras des Guillemettes, le Louet : bras du port Godart.
-

Pour la Phase C3 :

- Le 24 janvier 2012 Ancenis, Ile de Thouare, Champtoceaux
- Le 25 janvier 2012 Saint Florent le Vieil, Montjean,
- Le 26 janvier 2012 Béhuard bras des Lombardières et bras des Guillemettes,

Conditions hydrauliques :

La banque HYDRO de la DIREN édite pour la station de Montjean sur Loire n°M5300010 les débits suivant :

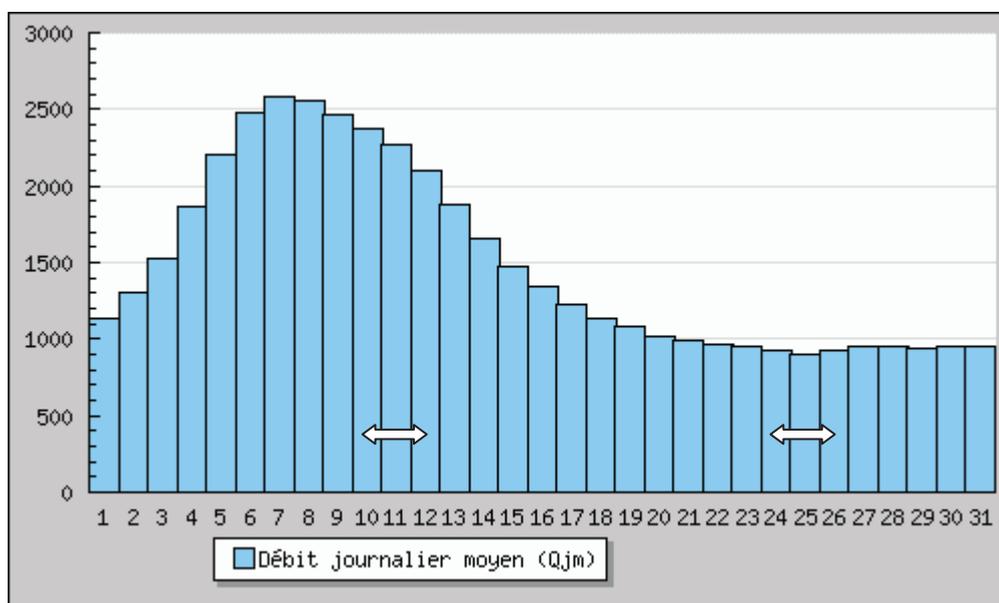


Figure 1 : Débits journaliers du mois de Janvier à la station de Montjean - www.hydro.eaufrance.fr.

Campagne C2 :

Le 10 01 2012	2380	m3/s
Le 11 01 2012	2270	m3/s
Le 12 01 2012	2100	m3/s

Campagne C3 :

Le 24 01 2012	923	m3/s
Le 25 01 2012	904	m3/s
Le 26 01 2012	925	m3/s

Mesures ADCP

Présentation des mesures ADCP pour les campagnes C2 et C3

Pour chacun des secteurs prospectés, sont présentés dans ce rapport :

- La localisation des profils sur une image SIEL (DREAL Centre) géoréférencée.
- Deux photos des berges prises depuis l'embarcation au droit du profil
- Les répartitions des vitesses sur les figures extraites du logiciel de traitement ADCP River surveyor.
- Un résumé des principaux paramètres du profil.

L'ensemble des résultats des campagnes ADCP et la localisation des profils levés sont présentés ci-dessous sous forme de tableaux de résultats synthétiques.

Résultats synthétiques des débits mesurés lors des campagnes C1, C2 et C3

Tableau 1 : Résumé de la campagne N°1

Campagne N°1 ADCP Basse Loire Mesure débit (m3/s)								
Ancenis	Champtoceaux Bras secondaire	Thouaré sur Loire bras sud aval	Thouaré sur Loire bras nord aval	Saint Florent le Vieil Loire	Saint Florent le Vieil Bras sud	Montjean bras principal	Béhuard Bras des Lombardières	Béhuard Loire
04/10/2011	04/10/2011	04/10/2011	04/10/2011	05/10/2011	05/10/2011	06/10/2011	06/10/2011	06/10/2011
143.3	6.08	510.93	-8.95	145.65	132.96	130.91	113	136.73
141.32	8.18	523.32	-4.69	145.13	130.38	131.51	106.51	138.15
144.4	3.63	539.24	-8.63	144.89	131.25	134.89	111.77	131.04
142.79	3.09	557.41	-9.63	144.89	132.95	131.59	104.77	135.3
141.67	-1.42	574.99	-8.61	144.46	132.67	130.11	110.22	124.94
142.74	-4.79	570.43	-13.71	145.24	132.4	130.13	104.05	133.34
141.13	-10.43	585.28	-18.27	144.09	134.26	131.11	104.04	126.51
144.97	-13.99	588.63	-18.24		135.17		109.55	125.03
		590.28	-16.64				108.41	128.26
		597.13						128.41
		586.63						
		594.48						
143	de 6 à -14	de 511 à 594	de -8 à -16	145	133	131	108	131

Tableau 2 : Résumé de la campagne N°2

Campagne ADCP Basse Loire Mesure débit sup 1500 m3/s										
Ancenis	Champtoceaux Loire bras principal	Thouaré sur Loire sud aval	Thouaré sur Loire bras nord aval	Saint Florent le Vieil Loire	Saint Florent le Vieil Bras sud	Montjean bras nord	Montjean bras sud	Béhuard Bras des Lombardières	Béhuard Guillemette	Louet bras amont pont Behuard
10/01/2012	10/01/2012	10/01/2012	10/01/2012	11/01/2012	11/01/2012	12/01/2012	12/01/2012	12/01/2012	12/01/2012	12/01/2012
2275	1752	1874	309	2330	769	1217	909	1320	418	192
2250	1725	1975	319	2262	758	1205	913	1312	423	192
2232	1714	1830	309	2273	752	1218	927	1322	412	202
2326	1711	1872	315	2254	760	1195	870	1324	411	197
2276	1665	1930	315	2328	774	1223	892	1324	422	198
2340	1699	1883	319	2235	751	1203	893	1318	421	195
		1875					885			
							886			
2283	1711	1891	314	2270	761	1210	897	1320	418	196

Secteur d'Ancenis

Les profils levés sur le site d'Ancenis se trouvent localisés en amont du pont au niveau du premier épi rive gauche (cf. Figure suivante)



Figure 2 : Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite C1



Rive gauche C1



Rive droite C2



Rive gauche C2



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 3 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

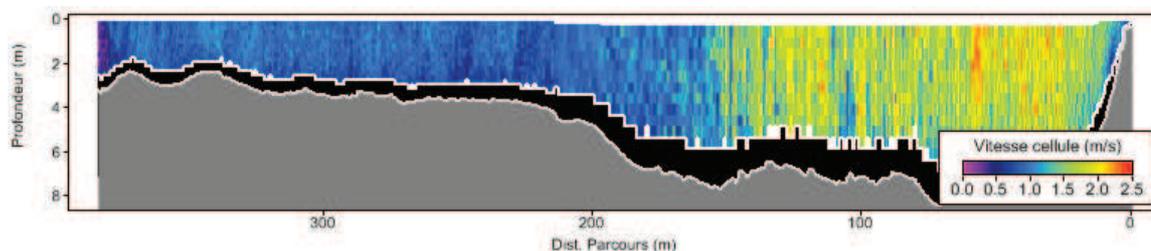


Figure 4 : Profil ADCP C2 N° 20120110120544 (2276 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 373 m

Débit moyen : 2283 m³/s levé le 10/01/12 Montjean (2380 m³/s)

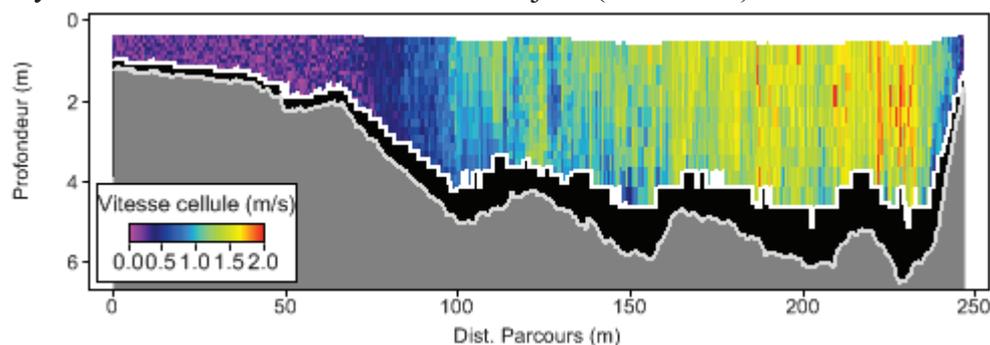


Figure 5 : Profil ADCP C3 N° 20120124100730 (909 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 235 m

Débit moyen : 908 m³/s levé le 24/01/12 Montjean (923 m³/s)

Secteur Champtoceaux

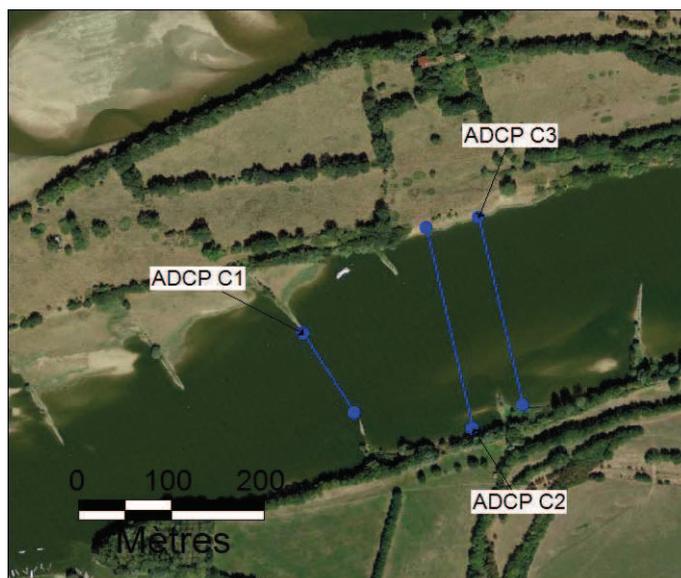


Figure 6 : Localisation du profil sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite C2

Rive gauche C2



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 7 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

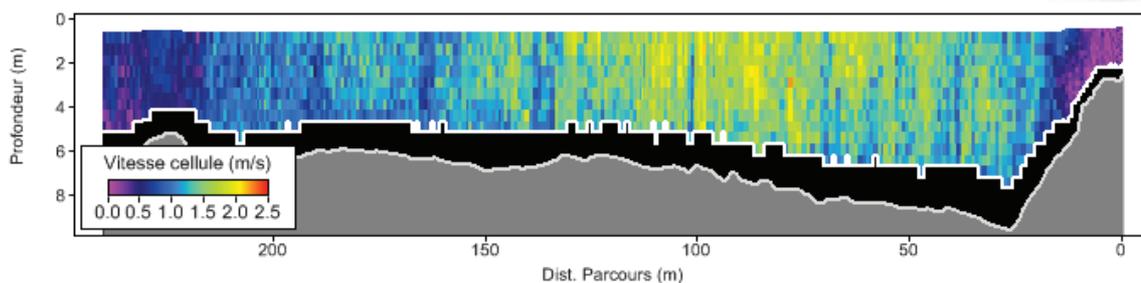


Figure 8 : Profil ADCP C2 N°20120110145953 (1711 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau :233 m

Débit moyen : 1711 m³/s levé le 10/01/12 Montjean (2380 m³/s)

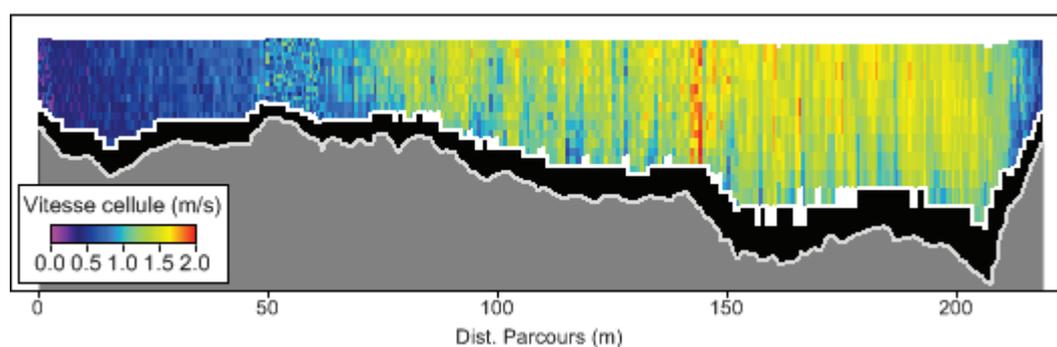


Figure 9 : Profil ADCP C3 N°20120124120748 (861 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau :211 m

Débit moyen : 860 m³/s mesuré le 24/01/12 Montjean (923 m³/s)

Secteur Thouaré sur Loire bras non prospectés

Lors de la campagne C2, sur le secteur de Thouaré sur Loire, une partie du débit de la Loire n'a pas été quantifiée. Ce débit correspond au cumul de deux bras de contournement (entrée points vert sur la figure ci-dessous) : celui situé au nord de l'îlot délimitant la rive droite du profil aval nord et celui situé au nord le long de la digue (cf.)

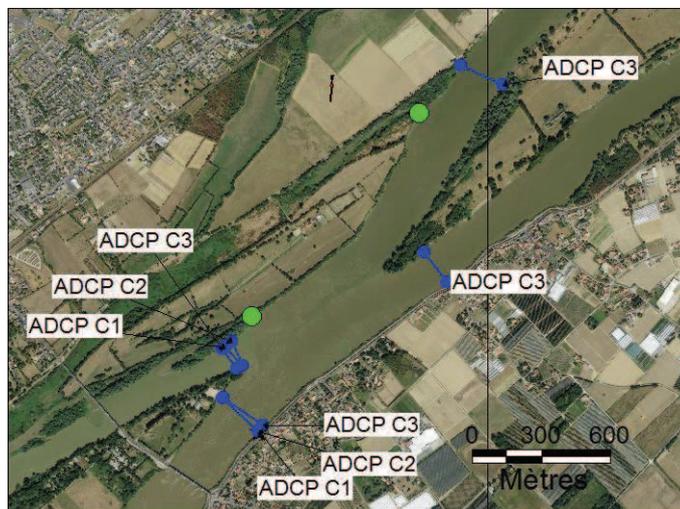


Figure 10 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009



Figure 11 : Entrée amont petit bras nord de l'Îlot (24/01/12)



Figure 12 : Entrée bras amont le long de la levée nord 24/01/12

Secteur Thouaré sur Loire bras nord aval



Figure 13 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009

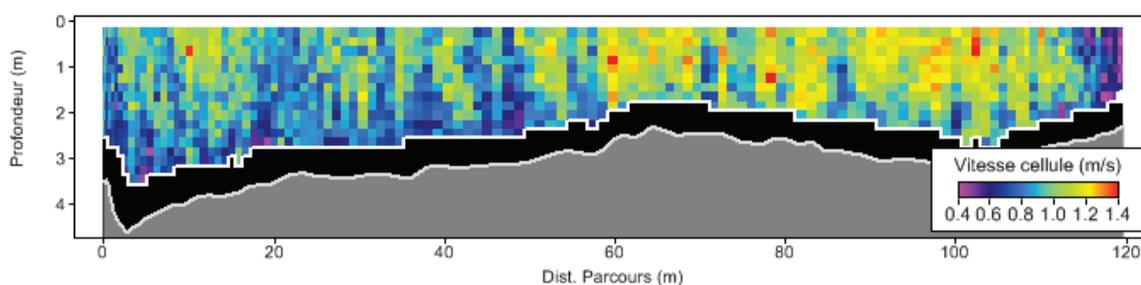


Figure 14 : Profil ADCP C2 N°20120110170011 (315 m3/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 118 m

Débit moyen : 314 m3/s levé le 10/01/12 Montjean (2380 m3/s)

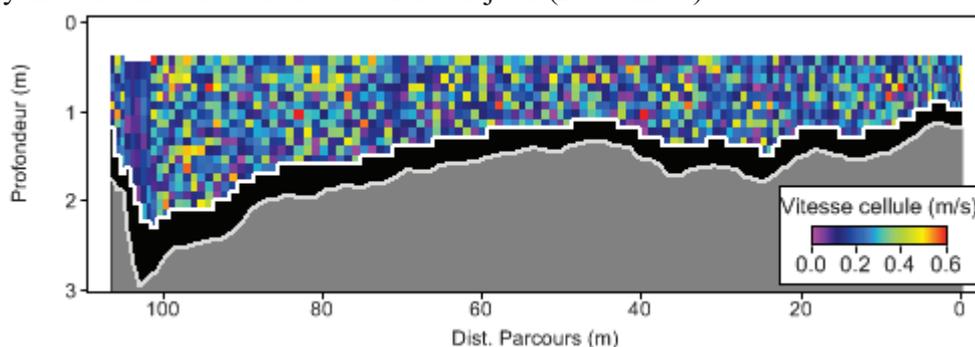


Figure 15 : Profil ADCP C3 N°20120124141853 (-12 m3/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 104 m

Débit moyen : -11 m3/s levé le 24/01/12 Montjean (923 m3/s)

Secteur Thouaré sur Loire bras sud aval



Figure 16 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 17 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

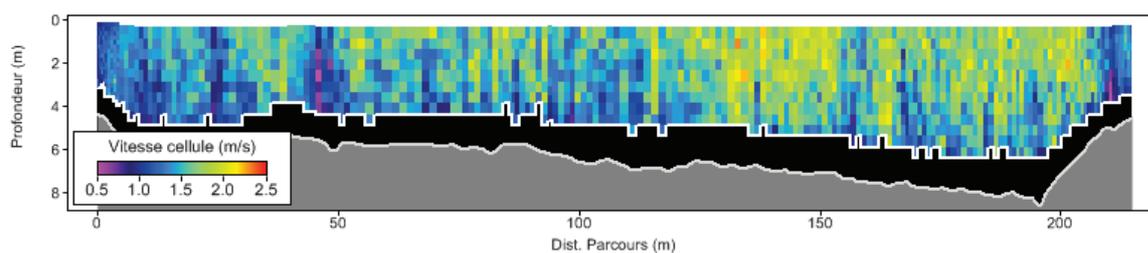


Figure 18 : Profil ADCP C2 N°20120110172757 (1883 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 209 m

Débit moyen : 1891 m³/s levé le 10/01/12 Montjean (2380 m³/s)

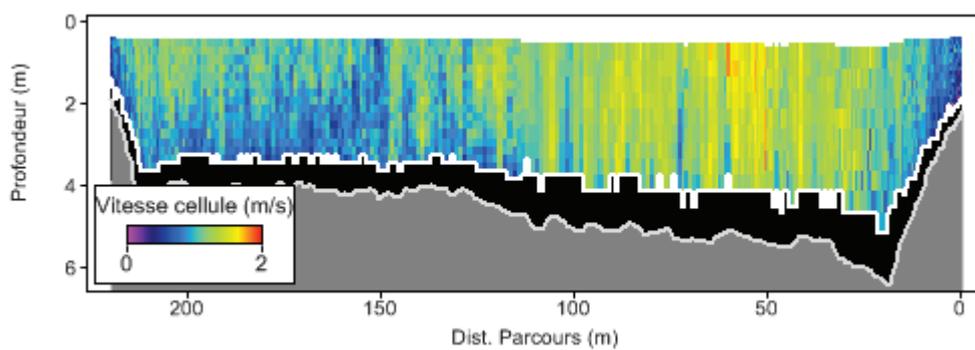


Figure 19 : Profil ADCP C3 N°20120124150401 (1046 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 215 m

Débit moyen : 1043 m³/s levé le 24/01/12 Montjean (923 m³/s)

Secteur Thouaré sur Loire bras nord amont



Figure 20 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire C3 sur la photo aérienne SIEL 2009



Figure 21 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

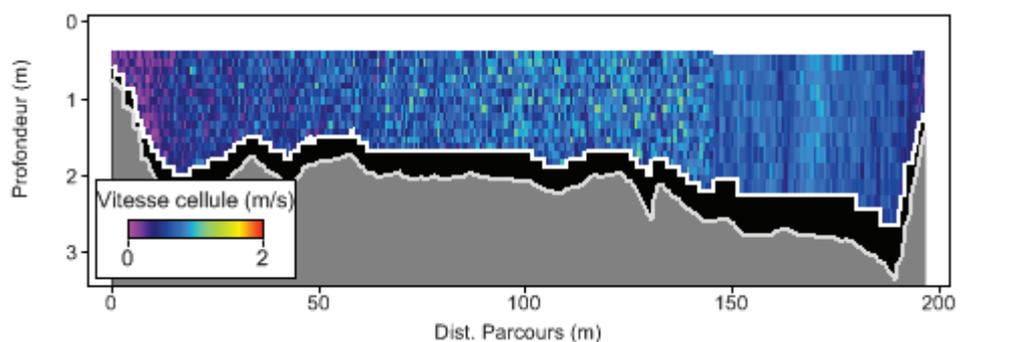


Figure 22 : Profil ADCP C3 N°20120124154659 (260 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 2

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 195 m

Débit moyen : 265 m³/s Montjean (923 m³/s)

Secteur Thouaré sur Loire bras sud amont



Figure 23 : Localisation des profils de Thouaré sur Loire C3 sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 24 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C3

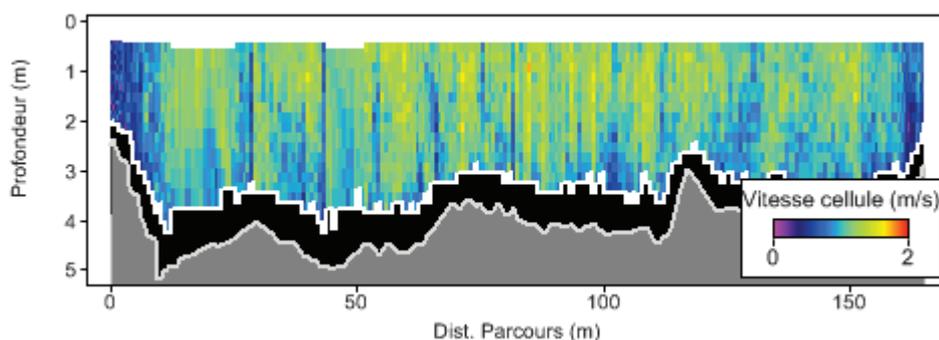


Figure 25 : Profil ADCP C3 N°20120124160837 (663 m3/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 2

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 163 m

Débit moyen : 672 m³/s Montjean (923 m³/s)

Secteur de Saint Florent le Vieil amont chevrette

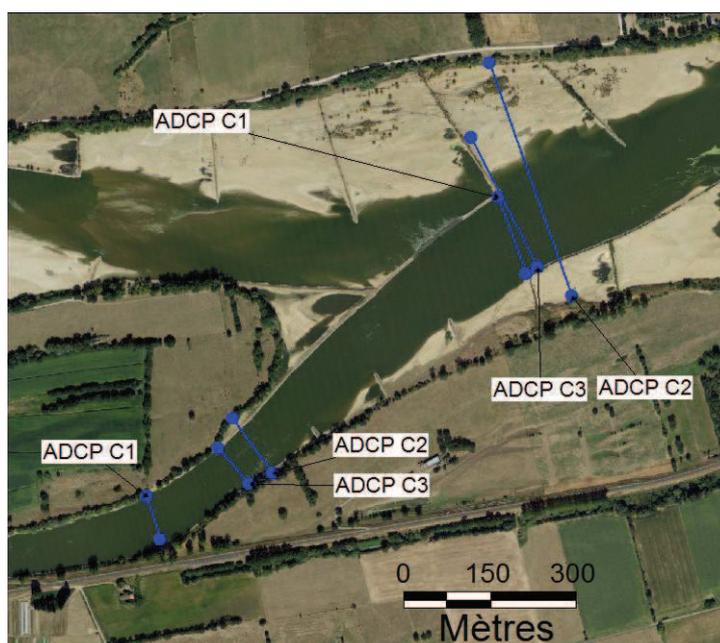


Figure 26 : Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009

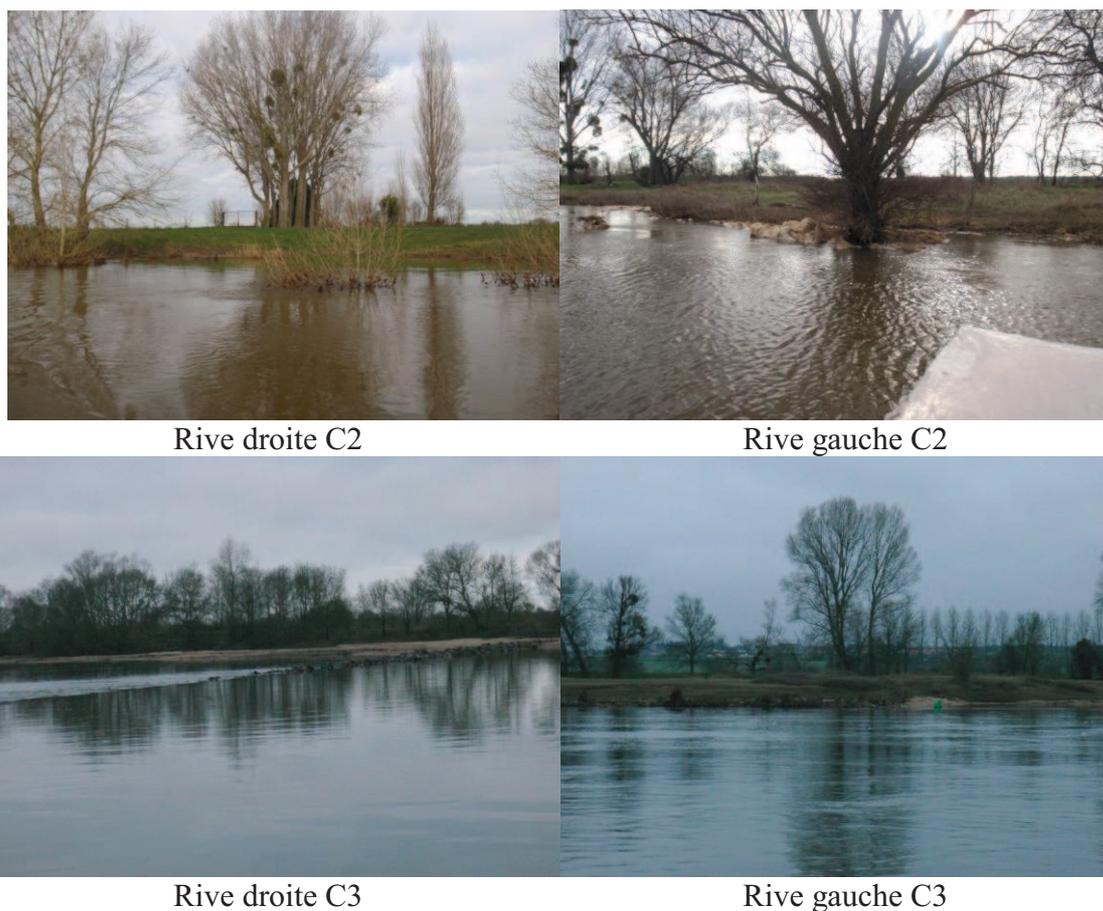


Figure 27 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

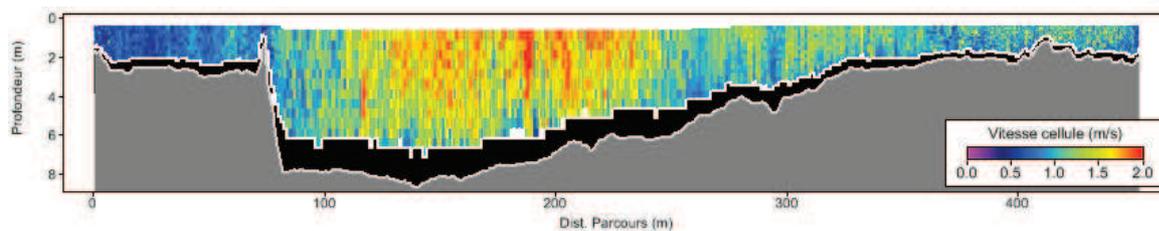


Figure 28 : Profil ADCP C2 N°20120111114752 (2273 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée : sans

Largeur moyenne de la section en eau :442 m

Débit moyen : 2270 m³/s Montjean (2270 m³/s)

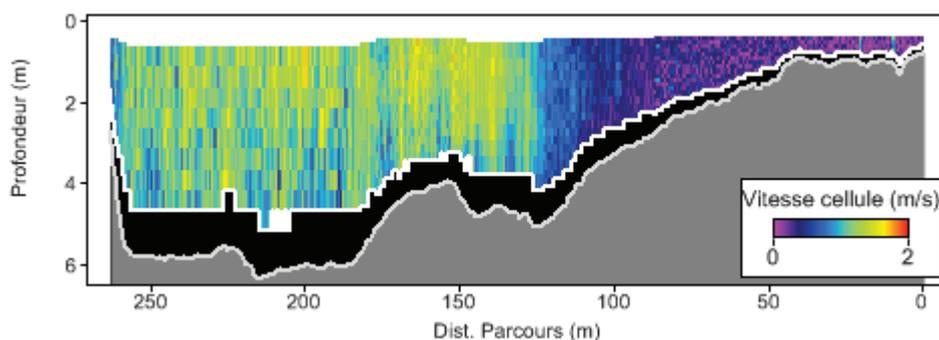


Figure 29 : Profil ADCP C3 N°20120125091739 (880 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée : sans

Largeur moyenne de la section en eau :258 m

Débit moyen : 883 m³/s Montjean (904 m³/s)

Secteur de Saint Florent le Vieil aval de la chevrette

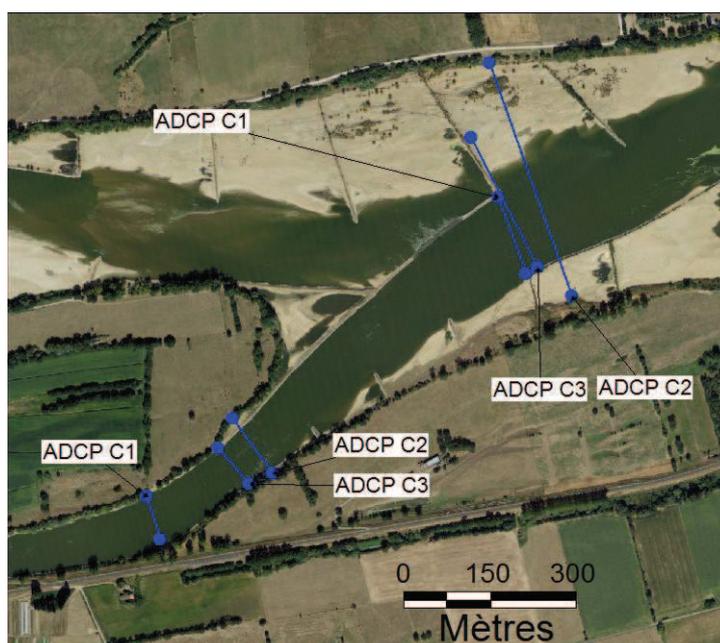


Figure 30 : Localisation des profils de St Florent le Vieil sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite C2

Rive gauche C2



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 31 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

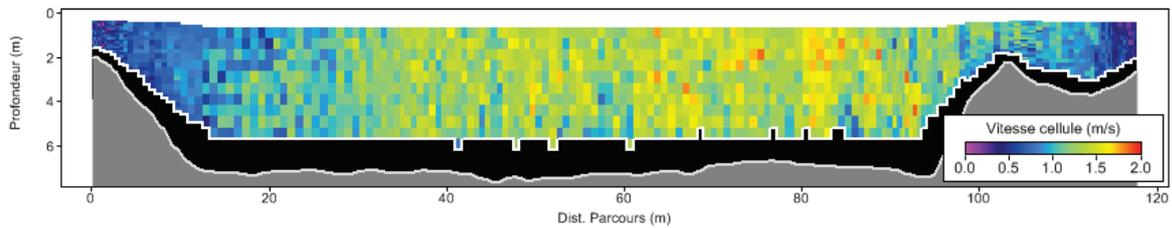


Figure 32 : Profil ADCP C2 N°20120111104448 (760 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée : sans

Largeur moyenne de la section en eau : 117 m

Débit moyen : 761 m³/s Montjean (2270 m³/s)

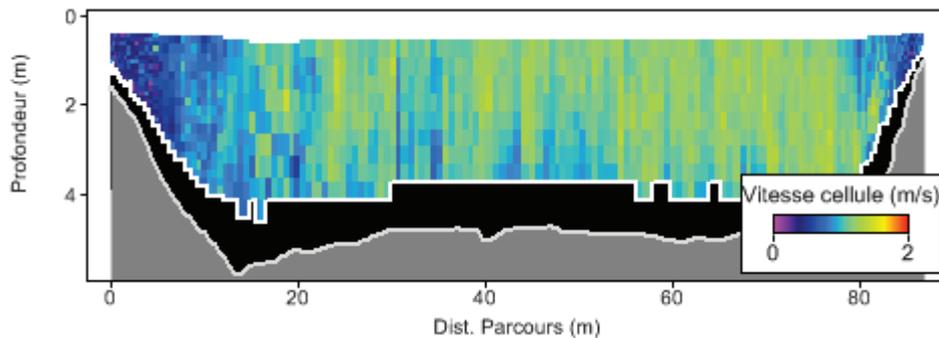


Figure 33 : Profil ADCP C3 N°20120125104232 (395 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée : sans

Largeur moyenne de la section en eau : 85 m

Débit moyen : 399 m³/s Montjean (904 m³/s)

Secteur de Montjean bras sud



Figure 34 : Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive droite C2

Rive gauche C2

Figure 35 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

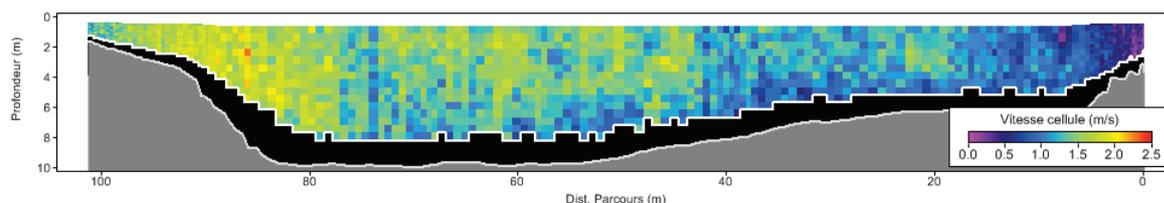


Figure 36 : Profil ADCP C2 N°20120112104429 (894 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 98 m

Débit moyen : 897 m³/s Montjean (2100 m³/s)

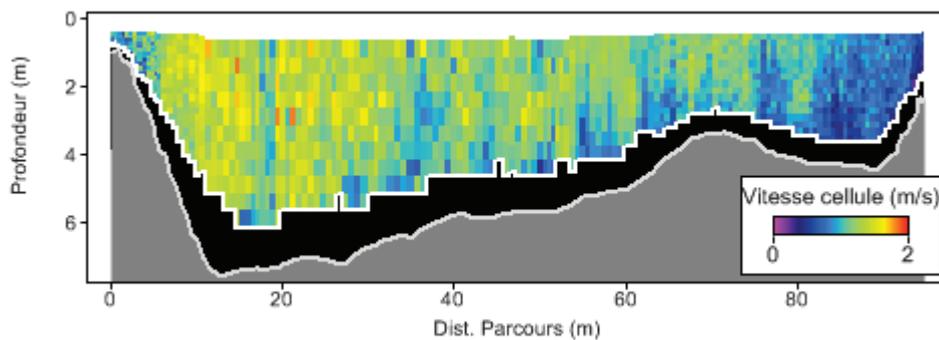


Figure 37 : Profil ADCP C3 N°20120125142032 (517 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 76 m

Débit moyen : 514 m³/s Montjean (904 m³/s)

Secteur de Montjean bras nord

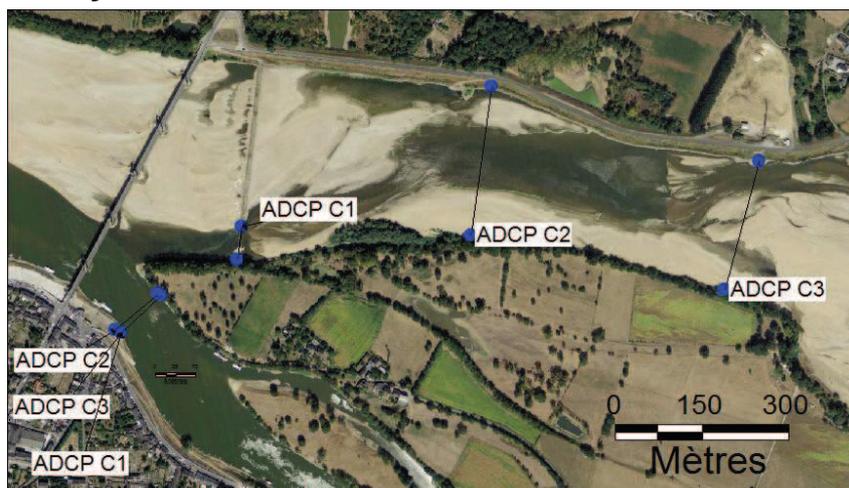


Figure 38 : Localisation des profils ADCP Montjean sur la photo aérienne SIEL 2009



Rive gauche C2



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 39 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

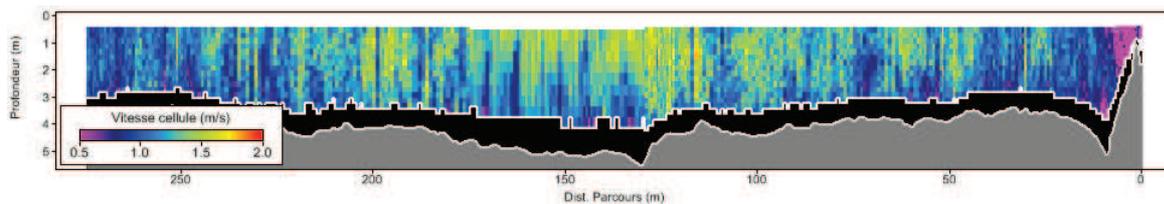


Figure 40 : Profil ADCP C2 N°20120112111946 (1206 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 263 m

Débit moyen : 1210 m³/s Montjean (2100 m³/s)

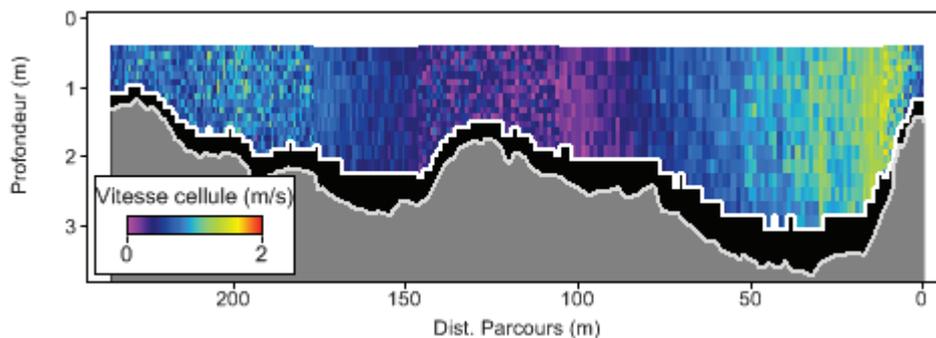


Figure 41 : Profil ADCP C3 N°20120125131347 (357 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 233 m

Débit moyen : 357 m³/s Montjean (904 m³/s)

Secteur de Béhuard bras des Guillemettes

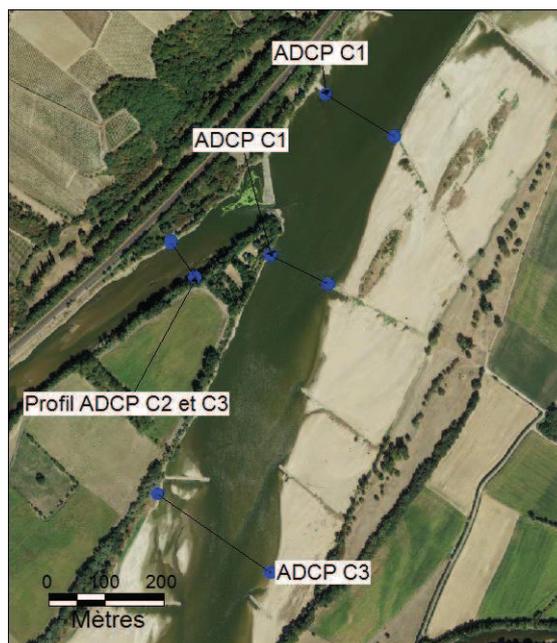


Figure 42 : Localisation des profils ADCP Béhuard sur la photo aérienne SIEL 2009



Figure 43 : Chevrette amont du bras des Guillemettes le 26/01/12 (925 m³/s Montjean)





Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 44 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

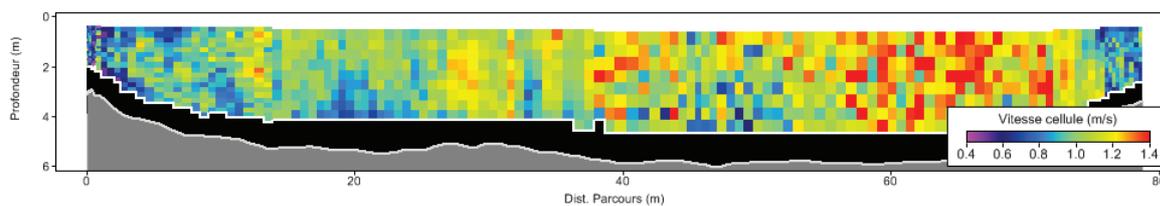


Figure 45 : Profil ADCP C2 N°20120112145637 (418 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 77 m

Débit moyen : 418 m³/s Montjean (925 m³/s)

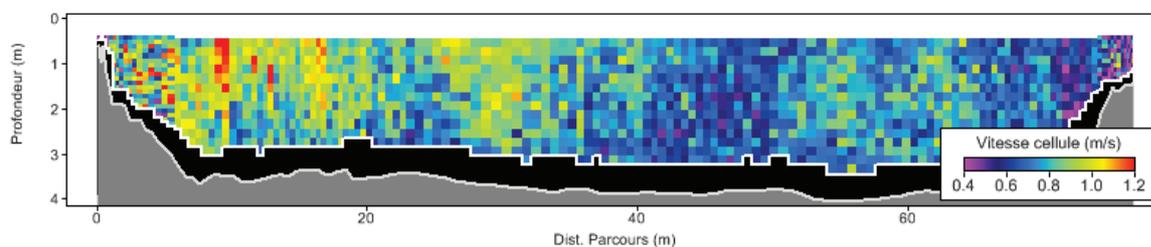


Figure 46 : Profil ADCP C3 N°20120126111204 (196 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 76 m

Débit moyen : 196 m³/s Montjean (925 m³/s)

Secteur de Béhuard bras des Lombardières



Figure 47 : Localisation des profils ADCP bras des Lombardières sur la photo aérienne SIEL 2009

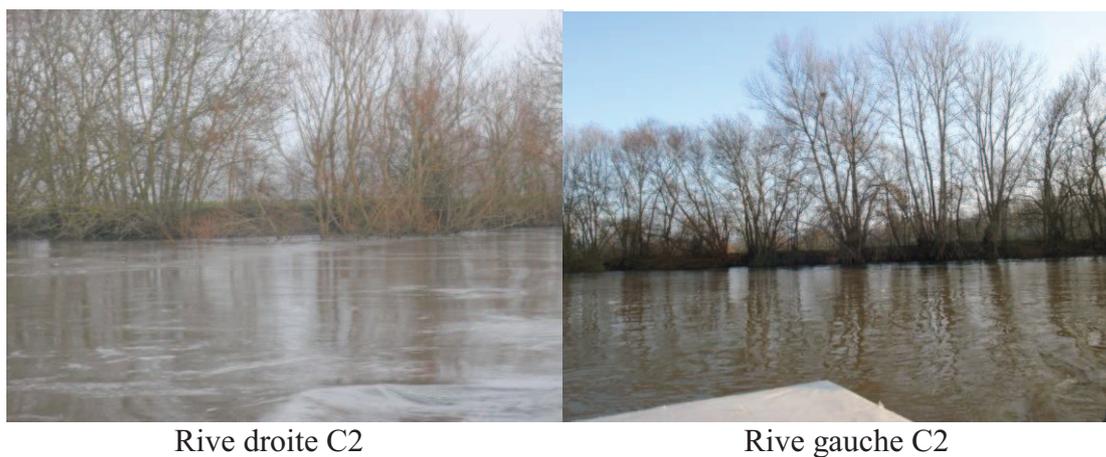


Figure 48 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

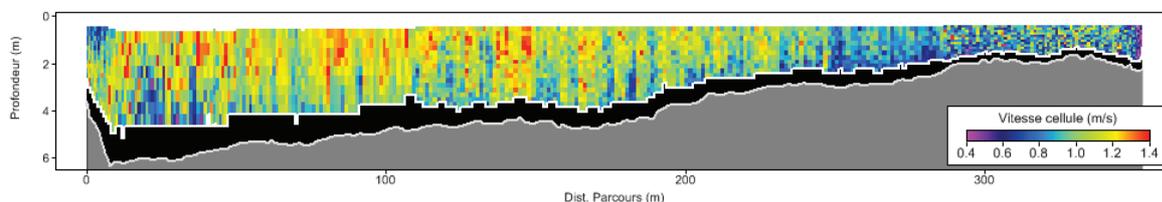


Figure 49 : Profil ADCP C2 N°20120112153743

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 352 m

Débit moyen : 1320 m³/s Montjean (2100 m³/s)



Rive droite C3

Rive gauche C3

Figure 50 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

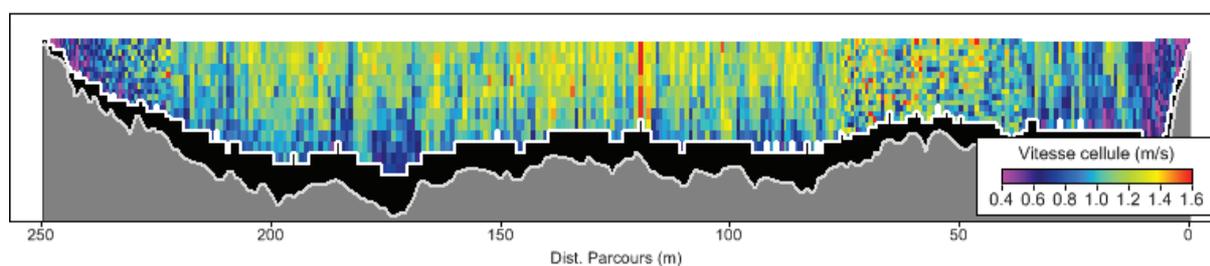


Figure 51 : Profil ADCP C3 N°20120126121158 (585 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 244 m

Débit moyen : 582 m³/s Montjean (925 m³/s)

Secteur de Béhuard le Louet



Figure 52 : Localisation des profils ADCP bras des Lombardières et Louet sur la photo aérienne SIEL 2009



Figure 53 : Photographies des berges au droit des profils ADCP C2 et C3

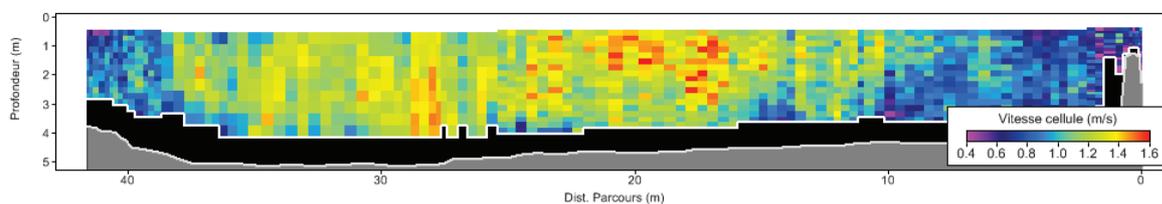


Figure 54 : Profil ADCP C2 N°20120112164544 (197 m³/s)

Résumé du levé ADCP C2

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 40 m

Débit moyen : 196 m³/s Montjean (2100 m³/s)

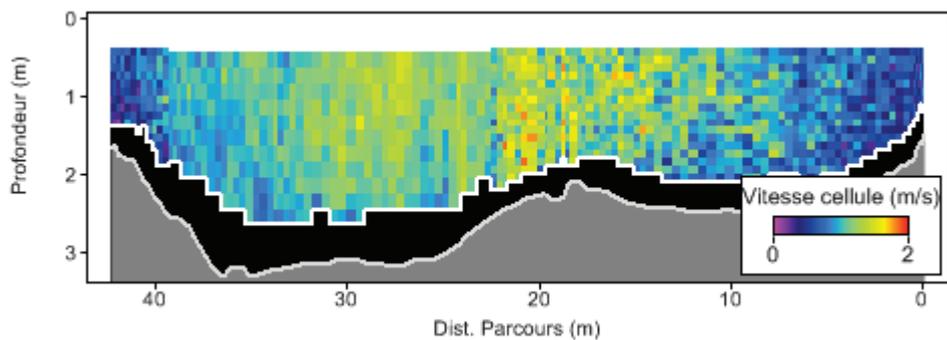


Figure 55 : Profil ADCP C3 N°20120126130013 (104 m³/s)

Résumé du levé ADCP C3

Nombre de profils : 6

Marée :

Largeur moyenne de la section en eau : 41 m

Débit moyen : 104 m³/s Montjean (925 m³/s)

ANNEXE 3 : PRESENTATION DU MODELE HYDROSEDIMENTAIRE ET DE SON ARCHITECTURE



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

SOMMAIRE

1	OBJET	2
2	PRINCIPES DE MODELISATION RETENUS	3
2.1	PRINCIPES GENERAUX	3
2.2	DESCRIPTION DU MODELE HYDRAULIQUE	3
2.2.1	<i>Emprise géographique du modèle</i>	3
2.2.2	<i>Les différents modes de schématisation disponible dans HYDRARIV</i>	4
2.2.3	<i>Schématization du lit mineur</i>	7
2.2.4	<i>Schématization du lit majeur</i>	8
2.2.5	<i>Architecture du modèle</i>	8
2.3	DESCRIPTION DU MODULE DE CALCUL SEDIMENTAIRE	12
2.3.1	<i>Formulation</i>	12
2.3.2	<i>Discretisation et méthode de résolution</i>	14
2.3.3	<i>Intérêt de la méthode</i>	15
2.3.4	<i>Discussion sur la formulation retenue et ses implications</i>	16
2.4	COUPLAGE ENTRE LES MODULES, GESTION DES PAS DE TEMPS ET PILOTAGE DES CALCULS D'EVOLUTION LONGUE DUREE	19
2.4.1	<i>Les étapes de calculs</i>	19
2.4.2	<i>Les pas de temps de calcul</i>	19
2.4.3	<i>prise en compte des conditions de marée</i>	20
2.4.4	<i>Performance du modèle</i>	21
3	PROBLEMATIQUE DU COUPLAGE SEDIMENTAIRE 1D-2D	22
4	FORMULATION DU TRANSPORT SOLIDE	24
4.1	OBJECTIF RECHERCHES ET CHOIX DES PARAMETRES DE LA FORMULE	24
4.2	LA FORMULE DE MEYER PETER ET MÜLLER	25

1 OBJET

La présente annexe décrit successivement :

- Les différents domaines de calcul pris en compte dans le modèle hydraulique (1D maillé, et 2D) ;
- La décomposition des biefs et les représentations associées ;
- Les formulations de débit solide proposées et leurs modalités de mise en œuvre dans hydrariv.

Rappelons que l'outil de modélisation a pour principal objet de guider la réflexion hydro sédimentaire tout en permettant préciser les tendances d'évolutions associées aux différents scénarios de restauration sur la Loire en amont de Nantes. C'est un outil global qui ne prétend pas décrire finement les processus détaillés d'échanges sédimentaires à l'échelle locale, mais qui a vocation à reproduire les transferts de sédiments le long des différents bras de Loire sur une échelle de temps comprise entre quelques semaines (analyse des perturbations engendrées par des épisodes de crues) et plusieurs dizaines d'années (analyse de la tendance d'évolution du lit suite à une perturbation majeure de l'équilibre morpho sédimentaire : chenalisation du lit mineur, dragages dans le lit vif, modification de lois de partage des débits entre bras, etc.).

2 PRINCIPES DE MODELISATION RETENUS

2.1 PRINCIPES GENERAUX

Les principes de modélisation reposent sur l'intégration dans le modèle hydraulique d'un module de calcul de transport sédimentaire basé sur des lois de transports empiriques mais présentant un niveau de validité éprouvé par de nombreux essais en laboratoire et in situ.

Le modèle est construit à l'aide du logiciel HYDRARIV. Les calculs hydrauliques et sédimentaires sont couplés à chaque pas de temps :

- ❑ le module hydraulique résout les équations de Barré de St Venant et calcule les nouvelles grandeurs hydrauliques en chaque nœud : débit, cote d'eau, vecteur vitesse.
- ❑ Le module sédimentologique calcule dans chaque maille le débit solide mobilisable à l'aide d'une loi empirique de transport et résout les équations de transport par convection-déposition-arrachement. La solution trouvée permet d'actualiser dans chaque maille les volumes de sédiment déposés ou arrachés en fond de lit, et donc les paramètres géométriques du modèle : sections géométriques pour les tronçons filaires du modèle, cote de fond des mailles pour les sous domaines bi dimensionnels.

Ce modèle présente deux particularités :

- ❑ Il juxtapose plusieurs types de schématisation : les algorithmes de résolution sont en conséquence adaptés à chaque sous domaine, et couplés pour résoudre un système global d'équations à chaque pas de temps,
- ❑ Les échelles de temps d'évolution des paramètres hydrauliques et sédimentaires sont très différentes : les pas de temps associés sont de l'ordre de l'heure au plus pour les calculs hydrauliques, et de plusieurs jours pour les calculs d'évolution des fonds via le module sédimentaire. Les algorithmes temporels ont en conséquence été adaptés pour tirer parti de cette différenciation.

2.2 DESCRIPTION DU MODELE HYDRAULIQUE

2.2.1 *Emprise géographique du modèle*

Le modèle s'étend géographiquement entre les Ponts de Cé à l'amont et le Pellerin à l'aval.

La condition limite amont est donnée par l'hydrogramme de la Loire $Q(t)$ à Montjean et la courbe $Q_s(t)$ de débit sédimentaire associé.

La condition limite aval est donnée par une courbe marégraphique $Z(t)$ au Pellerin, adaptée à partir de celle de St Nazaire. Le flux sédimentaire en ce point est considéré comme sortant du modèle.

2.2.2 Les différents modes de schématisation disponible dans HYDRARIV

Le logiciel intègre trois principaux types de schématisation qui peuvent coexister au sein d'un même modèle :

- Le domaine filaire : l'écoulement le long d'un bief de rivière ou de vallée inondable, est caractérisé par une direction privilégiée suivant son axe longitudinal. Ce domaine peut aussi inclure des sections couvertes (collecteurs d'assainissement pluvial, ...),
- Le domaine du casier : il correspond à la zone d'accumulation dans le lit majeur où la vitesse moyenne est faible et les transferts de débits conditionnés par des lois d'échange aux frontières, ses contours s'appuient sur la topographie naturelle ou sur des obstacles artificiels à l'écoulement des eaux,
- Le domaine bidimensionnel : il s'applique aux zones avec écoulement fortement bidimensionnel, décrites par une topographie détaillée qui permet de restituer notamment la carte des vitesses locales ; ce domaine est structuré comme un casier discrétisé par un maillage fin. Ce type de représentation est bien adapté aux cas de lits majeurs étendus, et permet de faire apparaître les écoulements longitudinaux et transversaux,

Ces domaines sont connectés entre eux par des liaisons externes latérales qui constituent le "ciment" de l'ensemble de la zone modélisée. Quatre types différents de liaisons sont fonctionnels : le seuil déversant à surface libre, l'orifice, l'écoulement poreux à travers une digue perméable, la perte de charge par frottement sur le fond.

Les points singuliers correspondent à des modifications de l'écoulement le long d'un tronçon de rivière. Ils sont régis par des lois d'écoulement particulières, classées en 5 types principaux:

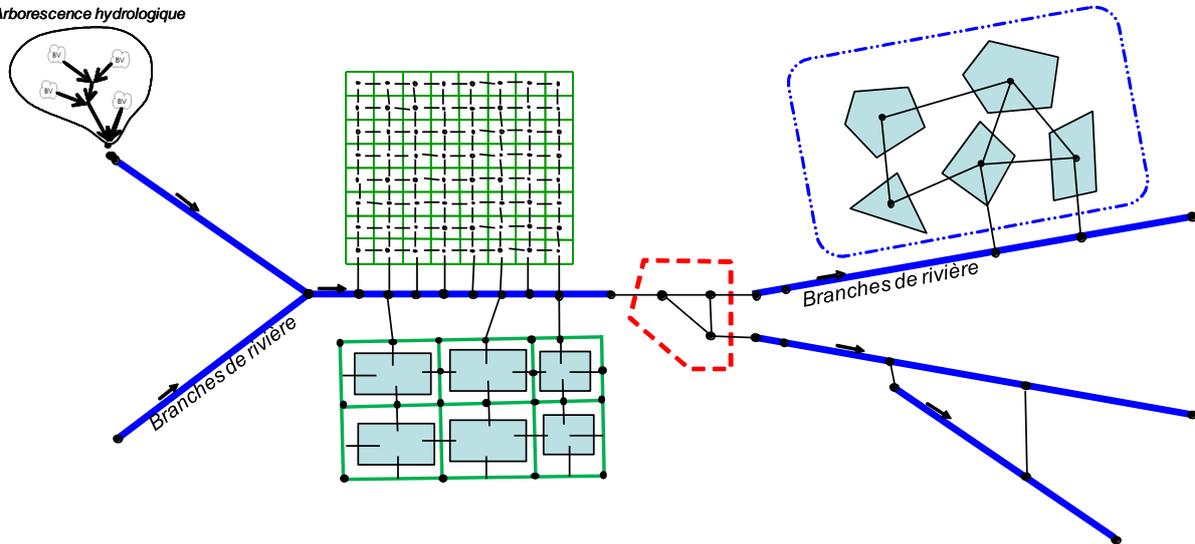
- apports, dérivations, défluences,
- pertes de charge,
- ouvrages de stockage,
- organes de régulation locale,
- condition à la limite aval.

Les schématisations filaires et bidimensionnelles sont régies par les équations de St Venant mono et bidimensionnelles respectivement, ce qui permet de modéliser l'impact de n'importe quel ouvrage et aménagement hydraulique.

Les figures pages suivantes récapitulent les classes de modélisation disponibles dans HYDRARIV, ainsi que les agencements des différents objets de modélisation dans chaque classe.

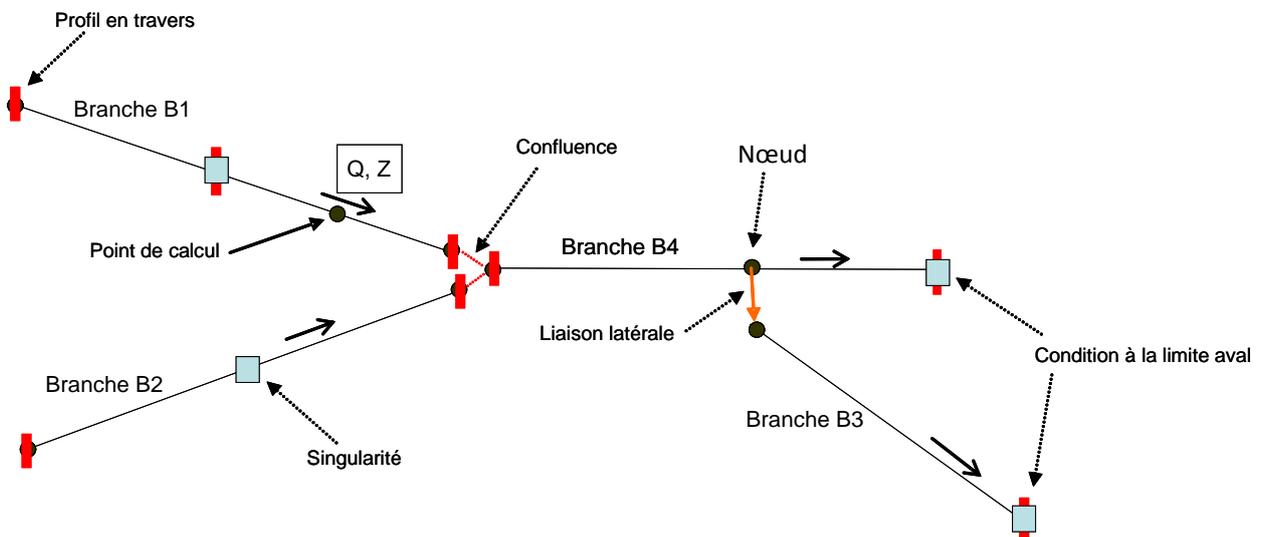
Les domaines de modélisation disponibles dans HYDRARIV

Arborescence hydrologique

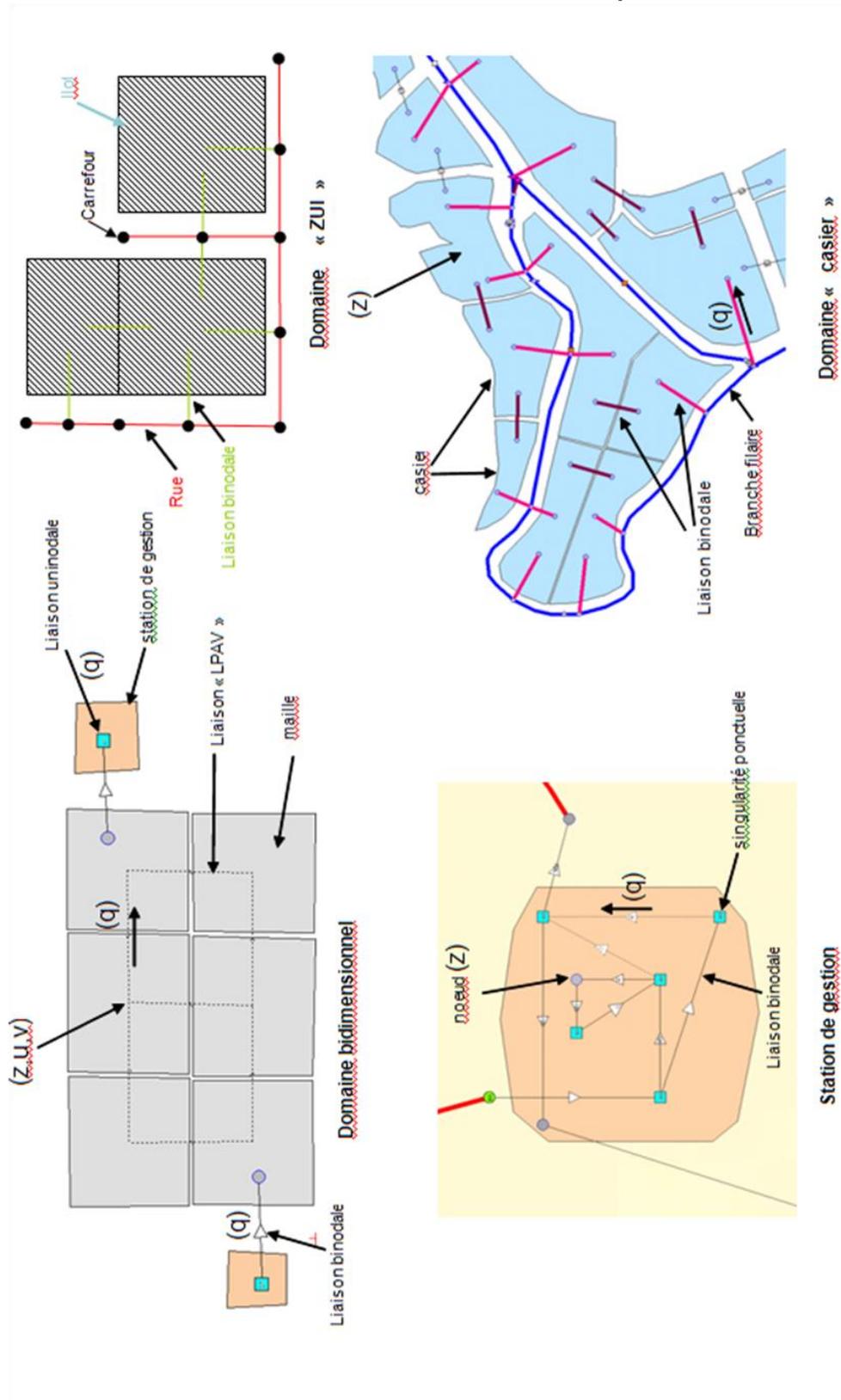


Classes de modélisation	
	branche de calcul (domaine filaire)
	domaine bidimensionnel
	domaine casiers
	station de gestion
	liaison latérale
	arborescence hydrologique
	domaine ZUI

Schématisation d'un domaine filaire



Schématisation des domaines surfaciques

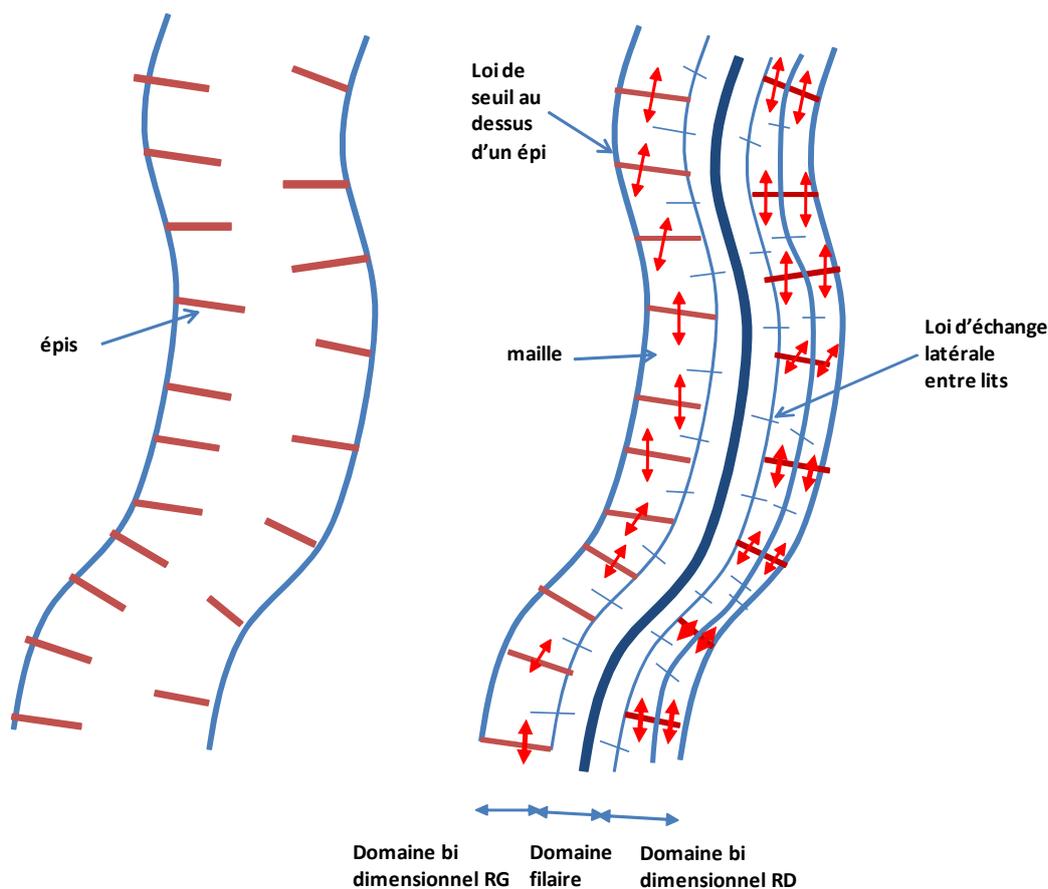


Le modèle Loire met en œuvre trois domaines : filaire, 2D et casiers, décrits ci-après.

2.2.3 Schématisation du lit mineur

Le modèle intègre l'ensemble des bras principaux et secondaires de la Loire. La schématisation filaire est privilégiée le long de chacun d'eux : en chaque nœud de calcul est définie une section géométrique d'écoulement schématisée par un ensemble de couples de points cote-largeur. Les grandeurs calculées en chaque point sont : le débit longitudinal, la cote d'eau et la vitesse moyennée dans la section.

Le long des tronçons occupés par des épis la schématisation filaire est restreinte à la largeur du lit vif compris entre les épis. La zone occupée par les épis est schématisée par un maillage multi directionnel comme suit :



Chaque maille est décrite par un contour quadrangulaire ou triangulaire, une cote de fond moyenne et une cote d'eau au centre de gravité.

Les liaisons longitudinales schématisent les lois de perte de charge au droit du franchissement de chaque épi, exprimées par des lois de seuil équivalentes,

Les liaisons latérales entre les lits schématisent les échanges de débit et de quantité de mouvement entre les lits.

La longueur de chaque maille est de l'ordre de 200m. La largeur d'une maille est limitée à 40m afin de prendre en compte l'inclinaison des épis, ainsi que la pente transversale du fond.

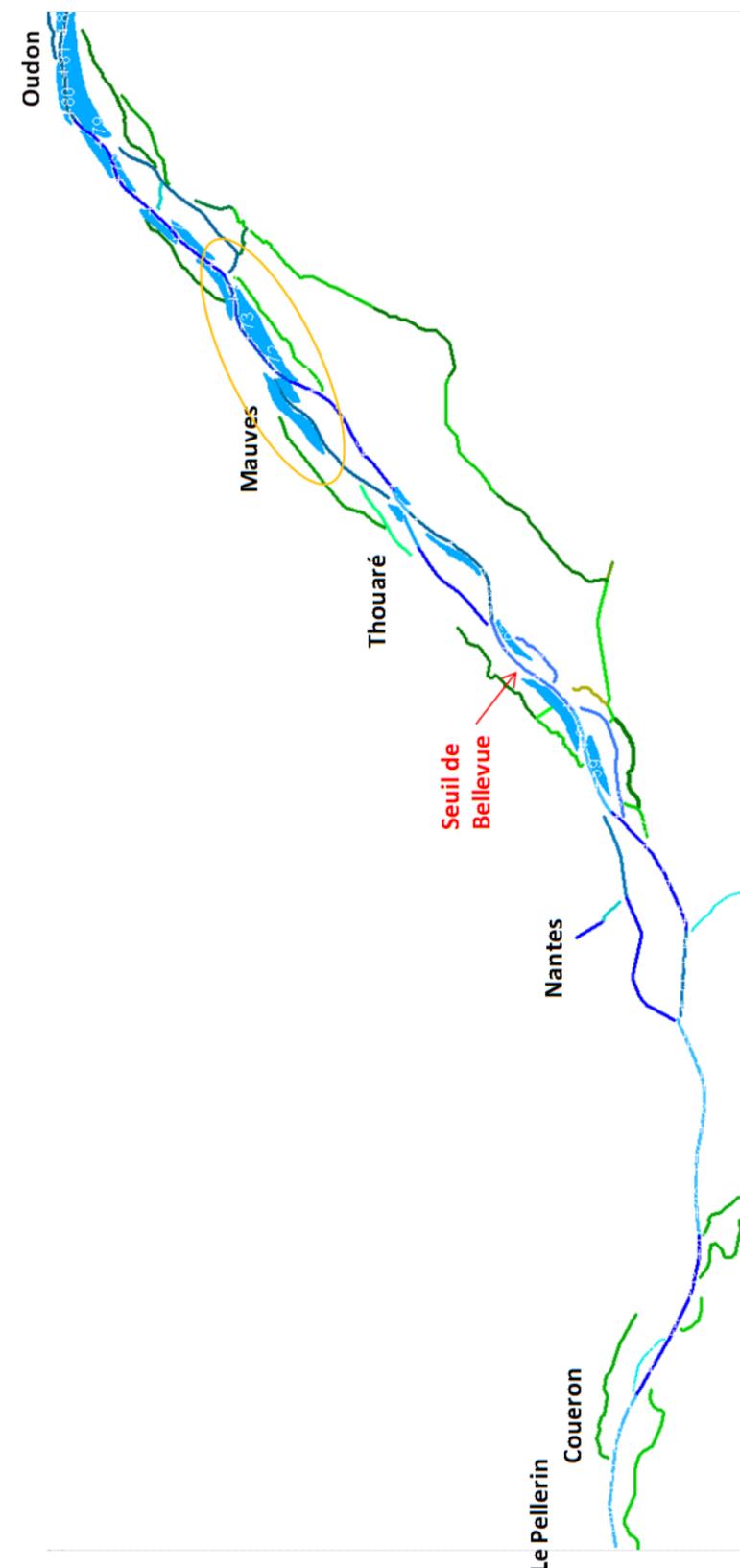
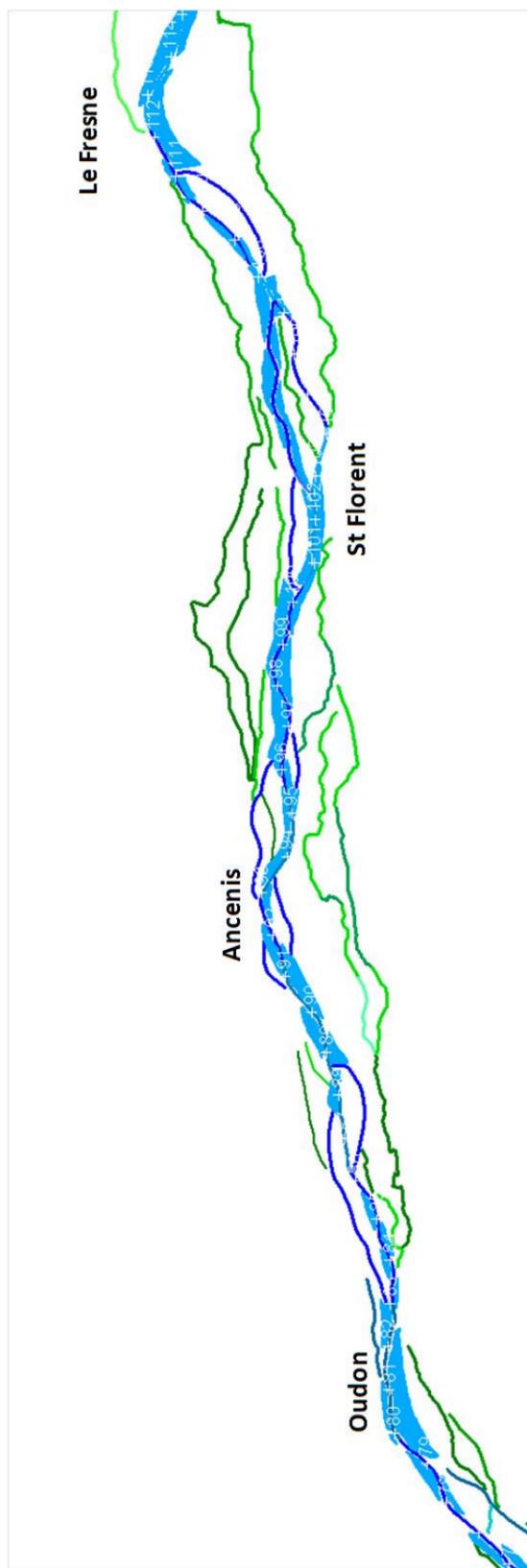
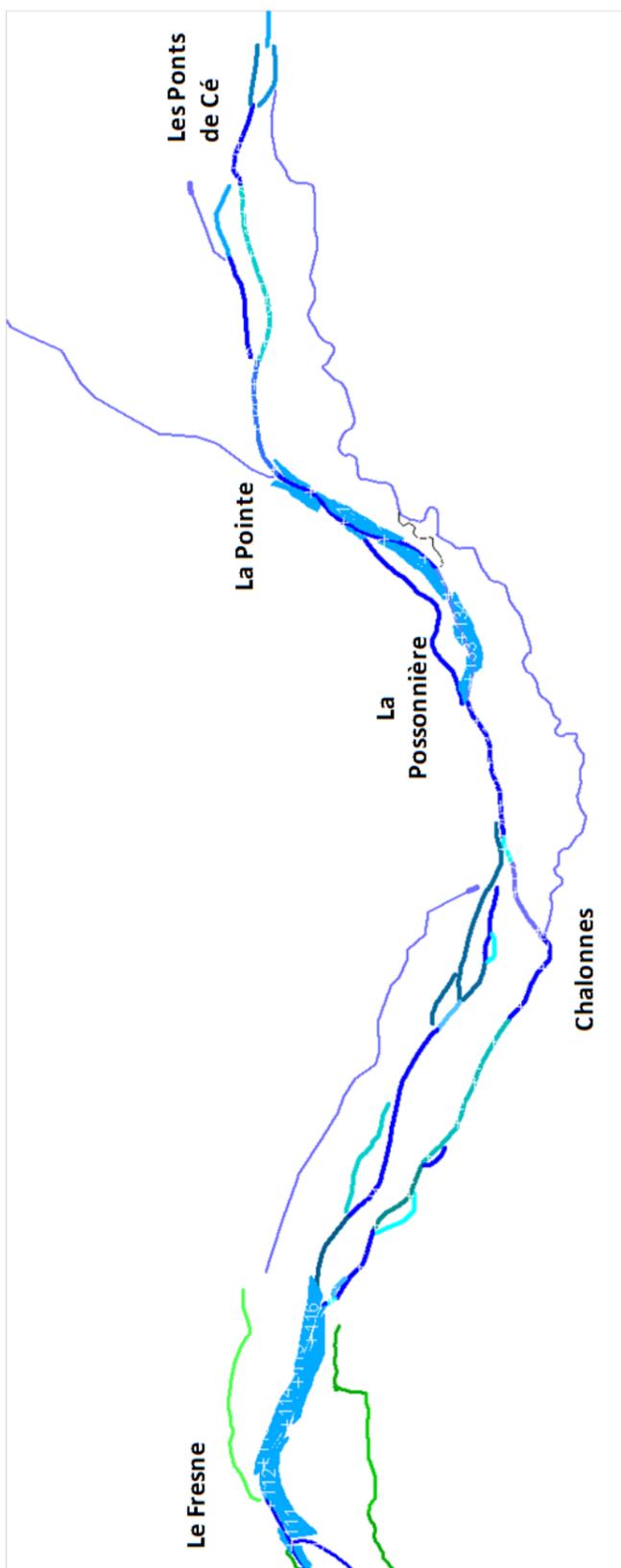
2.2.4 Schématisation du lit majeur

Le lit majeur inondable est schématisé par un système de casiers. Cette partie du lit n'est sollicitée qu'en cas de crue débordante, cette schématisation permet d'évaluer l'impact en relatif du remodelage du lit mineur sur les crues débordantes.

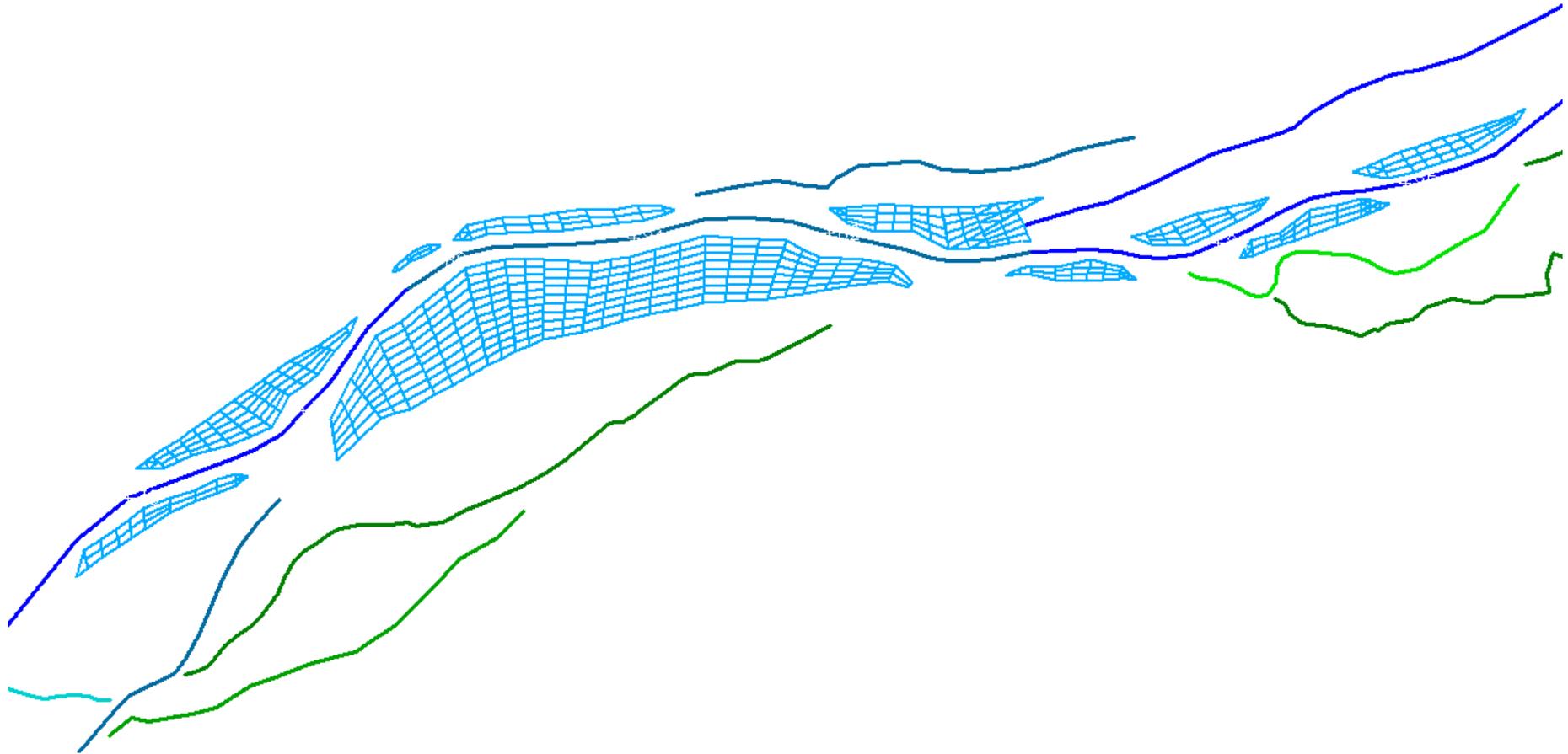
2.2.5 Architecture du modèle

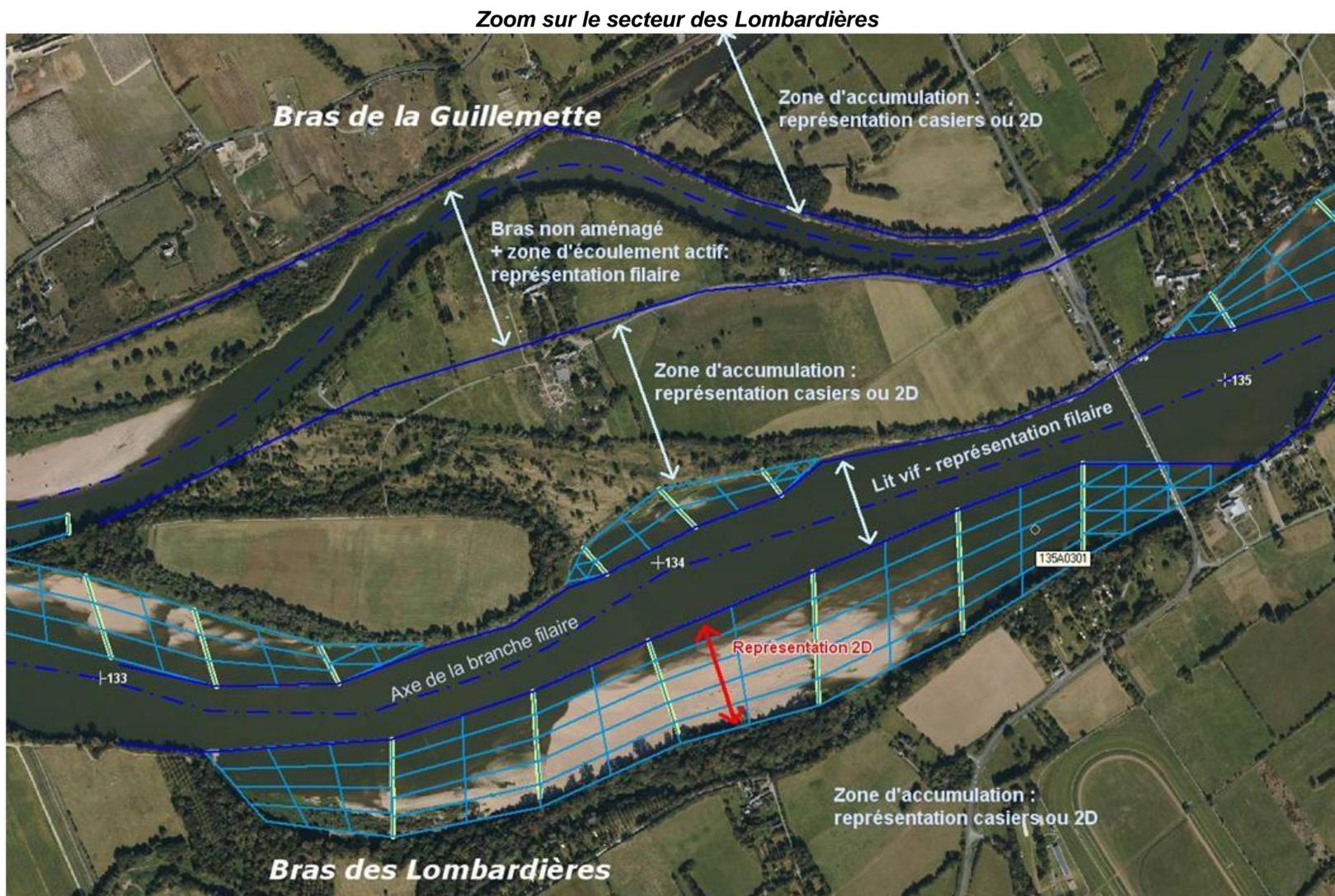
Les schémas pages suivantes reproduisent les axes d'écoulement modélisés le long des différents bras de Loire.

Les zones avec maillage 2D sont celles occupées par un système d'épis.



Zoom sur le secteur de Mauves





2.3 DESCRIPTION DU MODULE DE CALCUL SEDIMENTAIRE

2.3.1 Formulation

Le module de calcul sédimentaire est totalement intégré à HYDRARIV, il est géré comme un module de transport particulier, selon les modalités décrites ci après.

L'évolution du fond est décrite par l'équation de conservation du volume de sédiments présent dans la maille de calcul :

$$(1 - n) * \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \frac{\partial Q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{sy}}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

Avec :

- n : porosité du sédiment dans le lit ;
- Z_f : cote du fond ;
- Q_{sx} et Q_{sy} : débit de transport solide volumique respectivement dans la direction x et dans la direction y

L'équation ci-dessus n'est cependant pas résolue sous cette forme, la prise en compte des termes de gradients des débits et la juxtaposition dans un même modèle de sous domaines ayant des structures topologiques différentes nous a conduit à reformuler le problème comme suit dans HYDRARIV :

La variable primaire retenue est la concentration volumique moyenne en sédiments mobilisés au droit d'une section pour le domaine filaire, et dans une maille pour le domaine bi dimensionnel. L'algorithme de calcul consiste à actualiser ces variables à chaque pas de temps.

Domaine filaire

On considère un tronçon courant de cours d'eau en supposant une direction d'écoulement dans le sens A vers B. La géométrie du tronçon est définie par sa longueur dx et sa section courante à fond mobile ; le terme h* dans le schéma ci-après désigne l'épaisseur moyenne de sédiment disponible.

L'équation de continuité 2.1 est discrétisée comme suit dans le tronçon AB :

$$B(1 - n) \frac{dh^*}{dt} dx = Q_{sa} + Q_{sb} \quad (2.2)$$

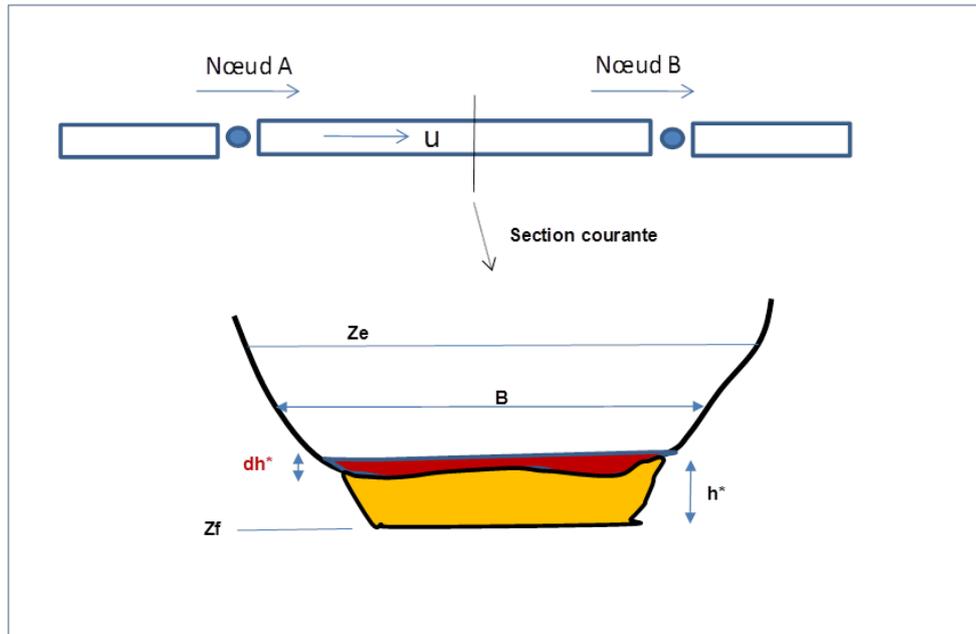
- Q_{sa} est le débit solide en volume de grains par unité de largeur acheminé par le tronçon amont
- Q_{sb} est le débit solide en volume de grains par unité de largeur acheminé sortant au nœud B.

Il est exprimé explicitement sous la forme :

$$Q_{sb} = Bfs(u)$$

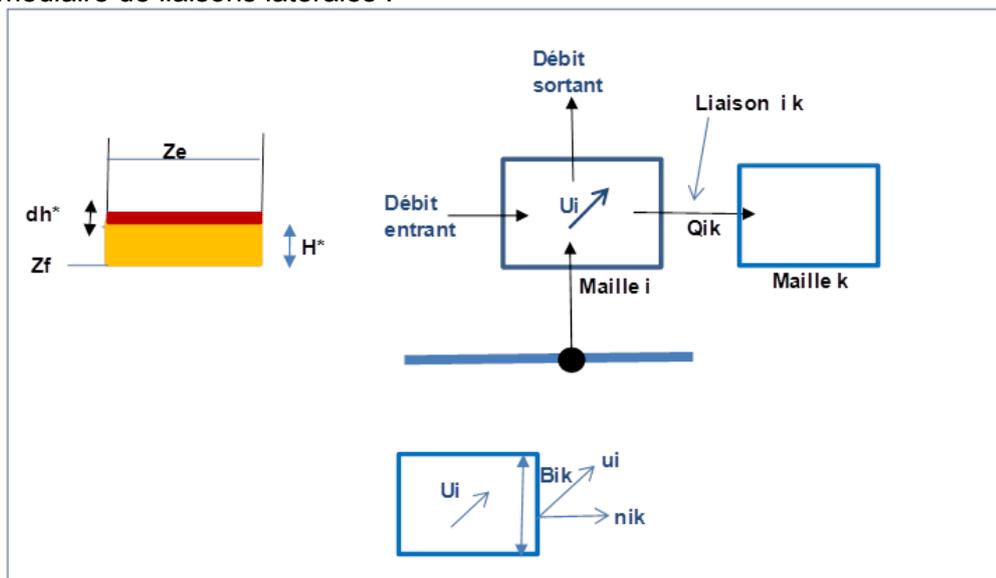
$f_s(u)$ est défini par la formule de transport de Meyer Peter et Müller.

B est la largeur moyenne du lit mineur, définie comme : $B=S/(z_e-z_f)$



□ Domaine surfacique

On considère une maille M_i connectée aux autres objets de modélisation par l'intermédiaire de liaisons latérales :



Les liaisons adjacentes à la maille M_i peuvent être connectées à d'autres mailles ou à des nœuds extrémités de tronçons filaires. La maille est caractérisée par sa forme (quadrangulaire

ou triangulaire), sa superficie S , la cote moyenne de fond Z_f et l'épaisseur de sédiments mobilisables h^* à chaque instant.

Le stock de sédiment rentrant par les liaisons avec débit entrant vient se déposer au fond (en admettant un transport dominé par le charriage). Dans le même temps une partie de ce stock est remobilisé selon une loi d'arrachement dépendant des conditions locales d'écoulement et des caractéristiques des sédiments. Ce mécanisme est décrit par l'équation suivante :

$$(1 - n) \frac{dh^*}{dt} S = \sum_j^{entrants} Q_{sij} - \sum_k^{sortants} Q_{sik} \quad (2.4)$$

Q_{sik} est le débit solide transportable en volume de grains vers la maille k . Il est calculé via une formule de transport empirique $f_s(u_i)$ (Meyer Peter, Engelund et Hanson ou autre) comme suit :

$$Q_{sik} = B_{ik} f_s(u_i) \vec{u}_i \cdot \vec{n}_{ik} \quad (2.5)$$

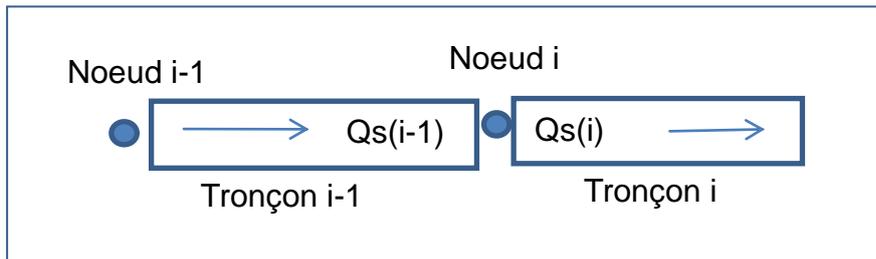
où n_{ik} est le vecteur unitaire normal à l'arête ik :

2.3.2 Discrétisation et méthode de résolution

Le système global d'inconnues à actualiser à chaque pas de temps est constitué par les variations de hauteurs de dépôt dh^* en chaque nœud de calcul du domaine filaire et en chaque maille du domaine 2D.

Chaque équation (2.2) et (2.4) est exprimée au temps t_{n+1} via une discrétisation temporelle au premier ordre :

L'équation à chaque nœud du domaine filaire est obtenue en égalisant les flux sédimentaires entrants et sortants :



$$Q_{s_{i-1}}(t_{n+1}) = Q_{s_i}(t_{n+1}) \quad (2.6) \quad \text{avec :}$$

$$Q_{s_{i-1}}(t_{n+1}) = B_{i-1} (f_s(u_{i-1}) + f'(u) \frac{du_{i-1}}{dh} \Delta h_{i-1})$$

$$Q_{s_i}(t_{n+1}) = B_i (f_s(u_i) + f'(u) \frac{du_i}{dh} \Delta h_i) + B_i (1 - n) \frac{\Delta h_i^*}{dt} dx$$

La fonction $f'(u)$ est la dérivée de f par rapport à u : on retrouve ce terme dans le coefficient de l'équation de diffusion décrivant la propagation du front sédimentaire dans les formulations simplifiées de calcul sédimentaire.

L'équation (2.4) dans chaque maille du domaine 2D est obtenue de la même façon en discrétisant temporellement les expressions Q_{sij} exprimant les transferts de flux sédimentaires entre cellules :

Après discrétisation et agrégation des équations locales on obtient un système matriciel global de la forme :

$$[K](dh^*) = g \quad (2.7)$$

Où K est une matrice carrée de rang $N \times N$ (N étant le nombre total de nœuds+mailles du modèle) et g un vecteur colonne de rang N . Les coefficients de la matrice K et du vecteur g sont exprimés au temps t_n et sont donc connus. La matrice K est creuse : le système (2.7) est résolu en utilisant le solveur Pardiso, parfaitement adapté à cette structure matricielle.

Cette formulation comporte un double avantage :

- ❑ Elle est numériquement stable et donc robuste, du fait de la discrétisation temporelle en mode implicite,
- ❑ La structure de la matrice K est identique à celle servant à calculer le vecteur inconnu (dz) dans l'étape de calcul hydraulique : l'ajout du module de calcul hydro sédimentaire dans HYDRARIV ne bouleverse pas le code existant.

2.3.3 Intérêt de la méthode

La méthode décrite ci-dessus présente un triple avantage :

- ❑ Elle permet de coupler les équations de l'hydraulique et de transport dans une même unité de calcul : le même logiciel résout l'ensemble des équations,
- ❑ L'algorithme mis en œuvre repose sur une discrétisation temporelle implicite des équations de transports : il est de ce fait inconditionnellement stable, ce qui est important pour le mode de gestion des pas de temps présenté plus loin,
- ❑ L'algorithme est général et permet de combiner des agencements quelconques de sous domaines de nature différente.

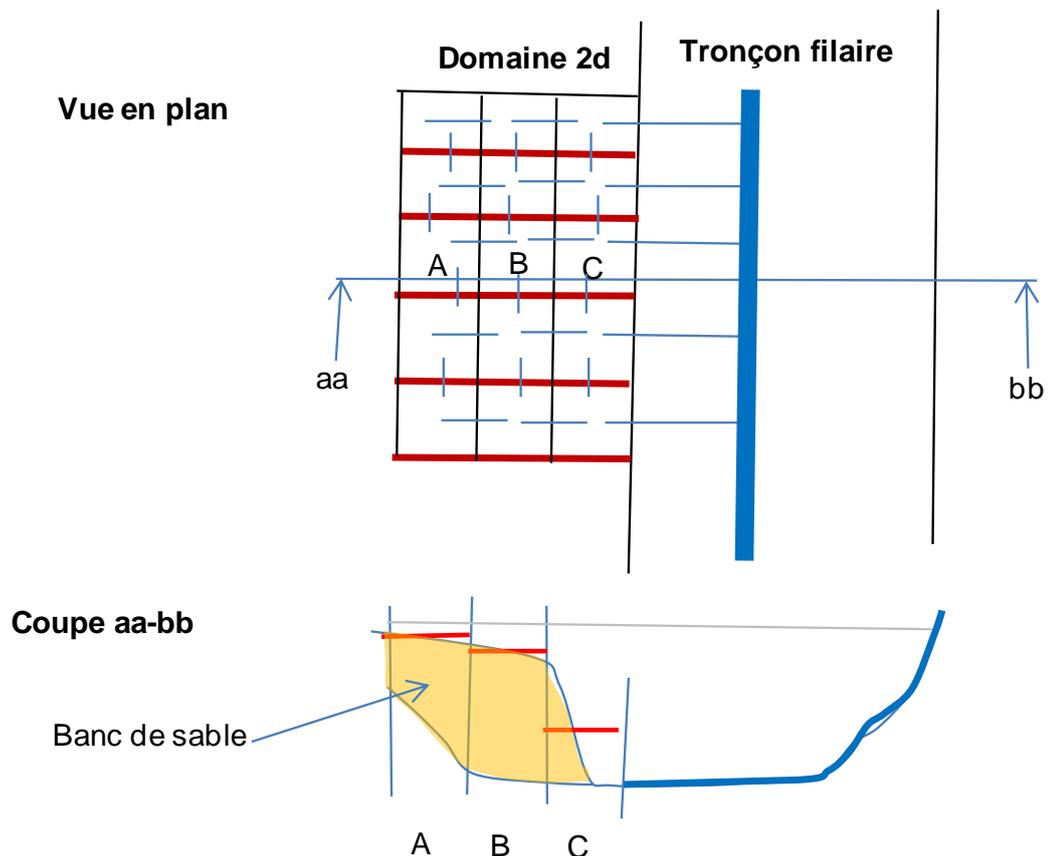
Cet algorithme est en fait déjà intégré à HYDRARIV, il est utilisé pour résoudre les équations de transport par convection-diffusion-réaction intervenant dans les simulations de qualité. Les sédiments constituent un traceur particulier régi par des lois de production spécifiques, mais ils obéissent aux mêmes lois de transports par convection que les autres traceurs et les équations peuvent ainsi être résolues par des algorithmes communs aux deux classes de problèmes.

2.3.4 Discussion sur la formulation retenue et ses implications

La schématisation mise en œuvre ne permet pas de détailler les effets bidimensionnels le long d'un tronçon filaire, expliquant par exemple les dissymétries latérales observées dans les profils transversaux : l'algorithme fournit uniquement un calcul de variation de stock le long d'un tronçon. Cette simplification reste néanmoins pertinente vis-à-vis des objectifs de l'étude et des natures d'impacts recherchés. La schématisation 2D est en revanche mise en œuvre dans zones occupées par les épis, pour lesquelles il est important de modéliser certains effets latéraux, comme expliqué ci-après :

Il convient de prendre en compte les effets de pesanteur dans les mailles intercalées dans les systèmes d'épis : les fonds ont en effet une pente latérale qui influence le calcul de la contrainte tractrice et aussi la déviation du transport solide.

Cet effet est illustré dans le cas typique d'un domaine 2D contrôlé par un système d'épis :



Les équations de production doivent en conséquence être adaptées pour prendre en compte cet effet, en appliquant les équations rappelées ci-après.

La contrainte tractrice sur une pente d'angle β par rapport à l'horizontal vaut :

$$\sigma_{\beta} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}} * \sigma$$

avec :

- β : angle du fond avec l'horizontale
- φ : angle de frottement interne du matériaux

Pour les sables de Loire nous adopterons un angle de frottement de 25°.

La déviation du transport solide causée par la pente du fond dépend du rapport entre la force de l'écoulement sur le grain (qui tend à déplacer le grain dans le sens de l'écoulement) et le poids du grain (qui tend à le faire aller dans le sens de la pente). La formule doit donc faire intervenir le paramètre de Shields qui est défini justement comme le rapport entre ces deux forces. Ainsi la formule générale suivante peut se trouver dans Talmon et al. (1995) :

$$\tan \alpha = \frac{\sin \delta - \frac{1}{f(\sigma^*)} * \frac{\partial z_f}{\partial y}}{\cos \delta - \frac{1}{f(\sigma^*)} * \frac{\partial z_f}{\partial x}}$$

Avec :

- α : direction du transport solide
- δ : direction de l'écoulement
- z_f : cote de fond
- f : fonction exprimant le rapport entre la force de l'écoulement sur le grain et le poids du grain.

Talmon et al. (1995) ont proposé :

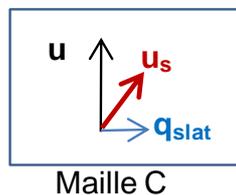
$$f(\sigma^*) = K\sqrt{\sigma^*}$$

et recommandent $K = 0.85$ mais montrent que la fonction f ne dépend pas seulement de σ^* , et en conséquence la valeur du coefficient de calage de l'équation ne peut pas être générale.

Notons que dans le cas d'une granulométrie étendue, les grains plus gros, qui ont un paramètre de Shields plus faible, subiront bien une déviation supérieure à celle des grains de plus petite taille.

Dans la situation actuelle l'espace du bras de Loire occupé par les épis est envahi par les sédiments. La vitesse longitudinale d'écoulement reste faible en raison des pertes de charge engendrées par les épis. Le banc de sable présente un fort gradient latéral au niveau de la maille C, en extrémité de l'épi.

Dans un contexte de restauration hydro sédimentaire on peut être amené à supprimer les épis, ou tout du moins à les raccourcir ou les reprofiler pour désenclaver une partie des sédiments piégés. Cette action a pour conséquence de diminuer les pertes de charges dus aux épis et donc d'augmenter le débit longitudinal d'écoulement. Dans la maille C la prise en compte de la pente transversale va fortement diminuer la contrainte critique de mise en mouvement des sédiments et va de plus induire une déviation du vecteur vitesse de déplacement des grains comme illustré par le schéma suivant :



Il en découle une composante latérale de transport sédimentaire vers le lit vif.

Cette configuration a donc tendance à accélérer le processus de relargage des sédiments, avec un effet d'entraînement sur les couches de sédiments piégés dans les mailles adjacentes B et C : en effet la libération des sables dans la maille C augmente la pente transversale de la couche de sédiments dans la maille B, ce qui favorise son évacuation ; le nouveau profil dans la maille B va provoquer un effet similaire sur le relargage des sédiments dans la maille A.

La prise en compte dans le modèle de cet effet de pesanteur sur la dynamique d'évolution du corridor fluvial apparaît ainsi de première importance.

- ❑ La formulation retenue peut engendrer une certaine diffusion numérique, néanmoins la discrétisation spatiale retenue ($dx = 200m$) limitera fortement cet effet. Des tests unitaires seront réalisés pour préciser cet effet sur la précision des résultats.
- ❑ La formulation ci-dessus repose sur la prise en compte dans les formules de production d'une granulométrie unique et uniforme des sédiments : on considère une seule classe de sédiments. Ce choix est justifié pour la Loire dans la note d'avancement.
- ❑ Cette formulation par ailleurs ne distingue pas le mode de transport : charriage, saltation et/ou suspension. Elle est donc adaptée aux formulations privilégiant les calculs de transport total, tous modes confondus. On suppose alors implicitement que tout obstacle géométrique laissant transiter un débit ne s'oppose pas durablement au transport sédimentaire. Cette hypothèse est vérifiée en pratique : par exemple un seuil sous fluvial peut momentanément bloquer les sédiments transportés par charriage, mais il va rapidement se produire une accumulation locale de sédiments derrière l'obstacle et cette adaptation géométrique du fond va permettre de restaurer le transit sédimentaire.

La principale difficulté de la schématisation mixte adoptée réside dans le choix de la formulations des échanges sédimentaires aux niveaux des liaisons connectant le lit filaire et les mailles adjacentes d'un domaine 2D : il y a là une véritable rupture de formulation hydro sédimentaires entre les deux domaines qui a en pratique soulevé une difficulté, décrite au chapitre 3.

2.4 COUPLAGE ENTRE LES MODULES, GESTION DES PAS DE TEMPS ET PILOTAGE DES CALCULS D'EVOLUTION LONGUE DUREE

2.4.1 Les étapes de calculs

Le calcul hydro sédimentaire avec HYDRARIV mobilise deux étapes de calcul à chaque pas de temps :

- 1- Etape de calcul hydraulique : les variations de niveaux d'eau (dz) entre les temps t_n et t_{n+1} sont calculées à chaque nœud, en utilisant les cotes de fond connues au temps t_n .
- 2- Etape de calcul sédimentaire : les variations des cotes de fond (dh^*) entre les temps t_n et t_{n+1} sont calculées à chaque nœud, en utilisant les paramètres hydrauliques calculés dans l'étape précédente. Les nouvelles cotes de fond (h^*_{n+1}) sont utilisées dans l'étape de calcul hydraulique du pas de temps suivant.

2.4.2 Les pas de temps de calcul

Le pas de temps de calcul est le même dans les deux étapes, par contre il peut varier selon les instants de calcul.

Deux cas de figure se présentent en pratique :

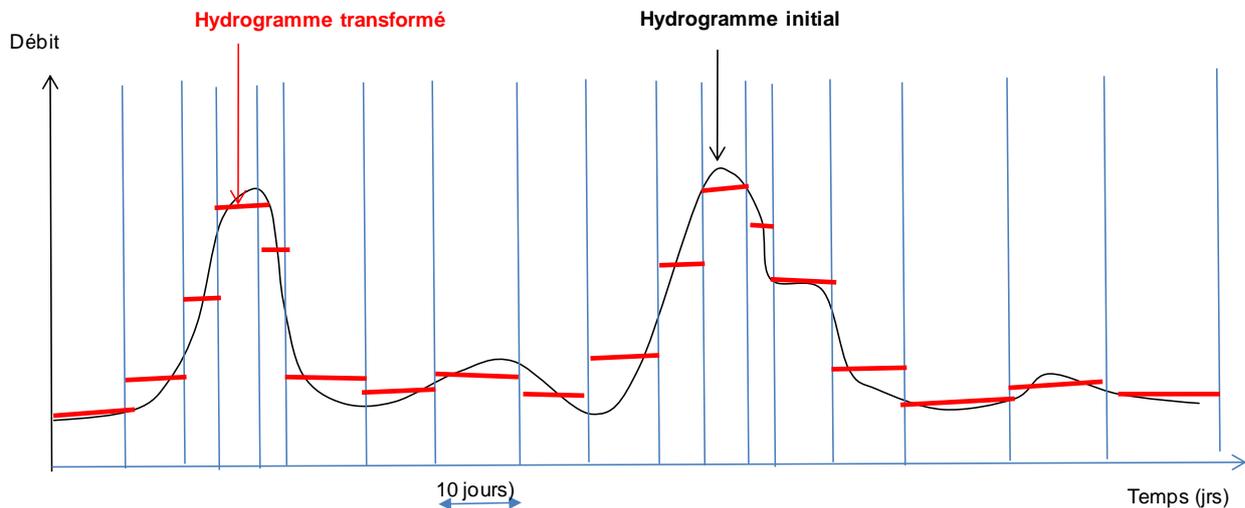
1. une perturbation importante des fonds générée par un épisode de crue, de durée de quelques jours,
2. Une évolution progressive des fonds, suite à une perturbation majeure d'origine anthropique. La stabilisation d'un nouvel état d'équilibre peut prendre plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années.

Afin de tirer avantage de ces considérations on a adopté la procédure suivante pour les simulations de longue durée :

- La série chronologique des débits de la Loire sur une longue période est modifiée de façon à obtenir un hydrogramme composé d'une succession de plages de débit constant comprises entre 5 et 15 jours selon le gradient de débit. La nouvelle courbe ainsi modifiée respecte les volumes d'apports.

- Le débit moyen sur les plages de débits constant est pondéré par rapport à la formule de transport utilisée de façon à s'ajuster sur le volume d'apport solide et non le volume liquide.

Cette transformation est illustrée par le schéma suivant :



Le pas de temps de calcul est ajusté automatiquement selon la procédure décrite plus haut : dans les phases de transition entre deux débits le pas de temps est de l'ordre de quelques minutes. Le long d'une plage de débit constant il peut atteindre 24h.

Cette procédure est totalement automatisée : elle permet de diviser le nombre de pas de temps de calcul par un facteur 10 au minimum, et donc de fortement limiter les durées de simulation des scénarios d'évolution du lit.

2.4.3 prise en compte des conditions de marée

Dans les simulations longue durée l'influence de la marée ne peut pas être directement prise en compte car son caractère cyclique imposerait des pas de temps faibles et donc des durées de calculs rédhibitoires.

Afin de contourner cette difficulté on se propose de définir au Pellerin une condition à la limite fictive de type $Z(Q)$, cette courbe étant calée pour obtenir à l'exutoire aval le même débit de transport solide qu'en présence d'un cycle oscillant de marée.

Cette adaptation se justifie pour le calcul d'évolution des fonds sur une longue durée.

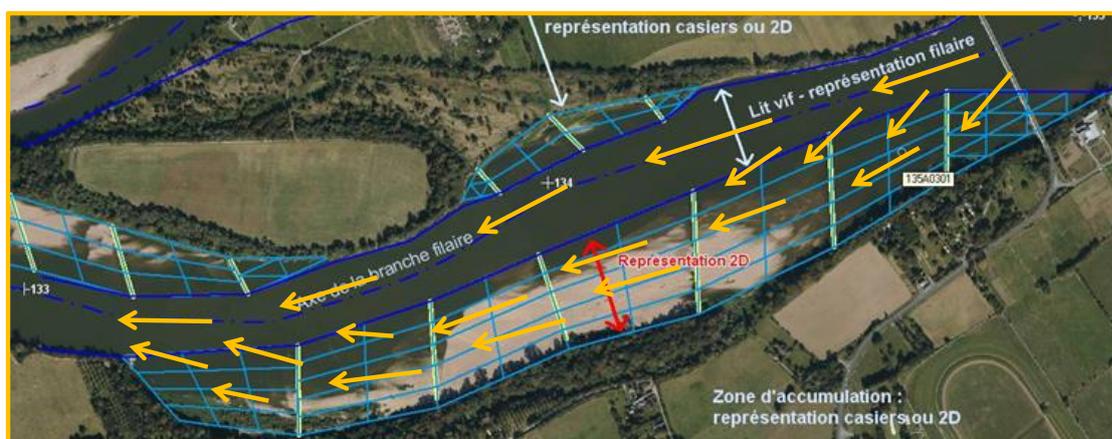
2.4.4 Performance du modèle

Avec les options ci-dessous les calculs se sont révélés stables et les temps de calculs particulièrement courts : 3h de temps de calcul pour simuler une série chronologique de 40 ans en continu. La seule difficulté d'ordre numérique a été rencontrée en période d'étiage, lorsque le tirant d'eau dans les bras secondaires est du même ordre de grandeur que la fluctuation de la cote du fond sédimentaire. Il a fallu dans ce cas « brider » les variations des paramètres hydrauliques, induisant par là même une légère distorsion des niveaux d'eaux calculés par le modèle en période de basse eaux.

3 PROBLEMATIQUE DU COUPLAGE SEDIMENTAIRE 1D-2D

Les échanges sédimentaires entre le lit vif et le domaine occupé par les épis sont gérés par des mécanismes complexes qui sont schématisées dans notre modèle par de simples liaisons latérales : cette simplification rend difficilement compte de la réalité des échanges latéraux réels et engendre des distorsions de nature à fausser les résultats :

Les échanges hydrauliques entre les domaines présentent le comportement suivant :



Le domaine des épis est alimenté hydrauliquement par un courant rentrant à l'amont, les écoulements entre les 1D et le 2D suivent sensiblement la même direction dans la partie centrale et le courant ressort vers le lit vif dans la partie aval du domaine 2D.

Sur le plan hydro sédimentaires les mécanismes sont plus compliqués : un défaut d'alimentation en amont du domaine 2D va provoquer une érosion trop accentuée du domaine 2D, alors qu'un excès d'alimentation va provoquer une sédimentation excessive. Or contrairement à ce qui se passe à l'intérieur d'un domaine il n'existe pas de mécanisme permettant de lier facilement les équations de transports entre les deux types de domaines par l'intermédiaire de simples liaisons latérales entre le 1D et le 2D.

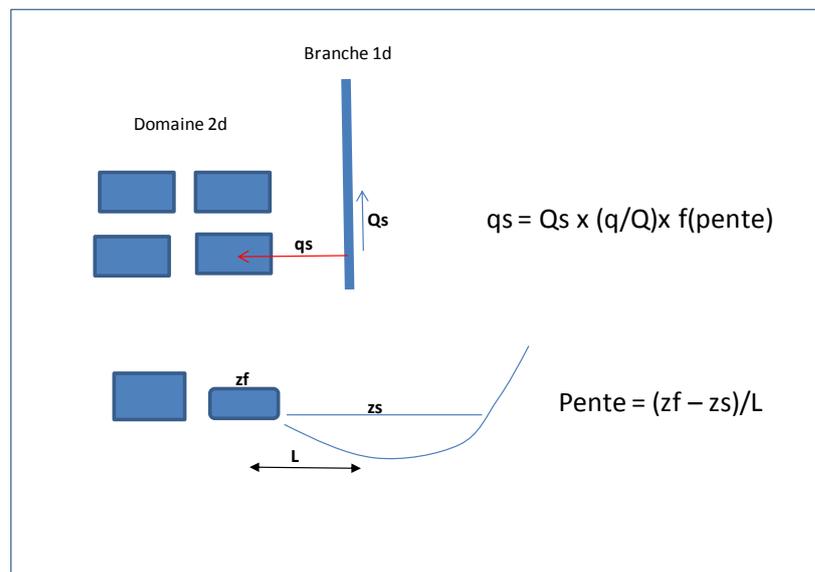
Le système d'engraissement des épis a en pratique évolué au cours des années jusqu'à atteindre un profil d'équilibre peu perturbé par le passage des crues successives. La formulation retenue doit donc être calée pour rendre compte de cette stabilité du toit sédimentaire des bancs de sables avec les épis en place.

Le modèle, pour remplir ses objectifs, doit pouvoir reproduire deux mécanismes :

- la stabilité actuelle des bancs de sables avec les épis en place,
- l'érosion partielle de ces mêmes bancs dans les secteurs où les épis sont raccourcis.

Après un certain nombre d'essais infructueux une formulation acceptable a pu être mise au point pour rendre compte de la réalité des mécanismes globaux d'échanges entre les domaines 1D et 2D. Elle repose sur les principes suivants :

- ❑ chaque liaison latérale liant le lit vit et le casier adjacent du domaine 2D est associée à une cote de seuil z_s égale à la cote d'étiage du fleuve au droit de la liaison.
- ❑ Le débit solide rentrant dans la pavé adjacent via la liaison est calculée comme le débit solide transporté par la branche filaire, multiplié par une fraction du débit liquide véhiculée par la liaison. Ce débit est néanmoins bridé par la pente latérale du toit sédimentaire.



- ❑ La fonction $f(\text{pente})$ a été ajustée pour reproduire par le calcul un transit sédimentaire net aussi faible que possible dans le domaine 2D en présence des épis.
- ❑ Le calcul du débit solide sortant d'une maille vers le domaine 1D ne pose pas de difficulté particulière : il est calculé en projetant le vecteur débit solide généré par la maille sur la direction de la liaison latérale.
- ❑ A l'intérieur du domaine 2D, on interdit le transit sédimentaire au passage d'un épi si la cote du toit sédimentaire de la maille en amont immédiat de l'épi est inférieure à la cote de seuil de l'épis.
- ❑ En l'absence d'épis le transit sédimentaire n'est plus entravé par la cote seuils des épis : cela engendre une érosion qui va s'accélérer le long du domaine 2D en raison de l'augmentation de la débitance (et donc des vitesses d'écoulement) au sein de chaque maille.

La formulation retenue permet ainsi de rendre compte de la réalité des échanges de flux sédimentaires et de leur évolution sur de longues durées entre les différentes entités morphologiques du fleuve. Le modèle ainsi généré constitue un outil d'aide précieux pour guider les scénarios de restauration à l'échelle géographique de la zone d'étude.

4 FORMULATION DU TRANSPORT SOLIDE

4.1 OBJECTIF RECHERCHES ET CHOIX DES PARAMETRES DE LA FORMULE

L'objectif principal est de disposer d'un outil robuste et juste de calcul du transport solide adapté d'une part aux caractéristiques hydrauliques et morphologiques de la Loire (pente, hydraulité, granulométrie des alluvions) et d'autre part au type de maillage et à la formulation hydraulique mis en œuvre dans Hydrariv.

Le choix des formulations de transport solide devra donc prendre en compte les différents éléments ci-après :

- ❑ Pente moyenne du lit proche de 0.2‰ avec néanmoins une variation spatiale liée à des phénomènes locaux : contrôle de lignes d'eau en amont des chevrettes barrant les bras secondaires, effet de la mise en eau des bras secondaires, pertes de charge singulières liées aux systèmes d'épis, caractère bidimensionnel des écoulements,...
- ❑ Etalement granulométrique des matériaux. Les mesures en cours permettront de préciser les variations spatiales entre chenal principal, chenal secondaire et grèves situés entre épis.
- ❑ Variabilité spatiale du paramètre de Shield σ^* selon une section transversale mais également le long du profil en long du lit. Cette variabilité peut conduire à des écarts dans un rapport de 1 à 10 du débit solide pour une même hydrologie d'entrée.
- ❑ Il est couramment admis (Ramette et al) que le début de transport par suspension se situe pour une valeur de $\sigma^* \geq 0.25$. Cette valeur, en considérant une pente moyenne de la Loire de 0.2‰ et un diamètre médian $d_{50}=1.5\text{mm}$, conduit à un rayon hydraulique et donc une hauteur d'eau proche de 3 m. On peut donc considérer que le transport par suspension proche du fond se fait pour les débits moyens de Loire (module). Dans ces conditions et compte tenu des valeurs caractéristiques des débits de Loire (crues annuelles supérieures à 2750 m³/s), une fraction significative des sables est susceptible d'être transportée en suspension.
- ❑ Les observations faites sur le terrain et l'analyse bibliographique ne mettent pas en évidence de pavage ou d'armature vraiment structurée. Tout au plus existe-t-il un tri granulométrique se produisant à l'occasion des décrues. On peut aussi noter une plus grande concentration de sables grossiers à la surface des grèves, liée au phénomène de lessivage (entraînement des matériaux les plus fins vers l'aval pour les débits intermédiaires).

Ces différentes considérations nous conduisent à privilégier une formulation globale permettant de prendre en compte le transport par suspension et par charriage et à ne pas « figer » un début de transport avec une valeur du paramètre de Shield considérée à priori.

$$\sigma^* = \frac{\gamma_w * R h * i}{(\gamma_s - \gamma_w) * d_{50}}$$

Le type de représentation issue du modèle hydraulique permettra de disposer des champs de vitesses moyennes en chaque maille de calcul.

Les paramètres de calage du modèle hydraulique seront :

- Le coefficient de Strickler qu'on assimilera au coefficient de frottement sur le fond.
- Les lois de perte de charge singulière des épis. Ces lois seront de type seuil dénoyé ou noyé en fonction du régime d'écoulement. Les paramètres rentrant dans la constitution de ces lois sont : la longueur effective de l'épis, la cote d'arase de l'épis, les coefficients de seuil en régime noyé et dénoyé.

Les valeurs calculées en chaque maille sont :

- La hauteur d'eau moyenne.
- Le vecteur vitesse (norme et direction).

La formulation de Meyer Peter et Müller a été retenue car elle présente l'avantage sur d'autres formulations de calculer le débit solide en fonction des seules variables que sont le rayon hydraulique, la vitesse de l'écoulement et le diamètre des grains, les autres paramètres (rugosité du fond, contrainte critique de Shield) pouvant être considérés comme des variables d'ajustement.

Les caractéristiques hydrauliques et morphométriques du lit de la Loire se rapprochent du domaine de validité de la formulation sans toutefois correspondre parfaitement (voir §**Erreur ! source du renvoi introuvable.**).

Les autres formulations disponibles dans la littérature ont été écartées, soit parce que leur domaine d'application s'écarte trop des caractéristiques de la Loire (Smart et Jaeggi, Rickenmann, Shen et Hung), soit parce que leur mise en œuvre apparaît trop complexe ou pas assez robuste pour une adaptation dans le modèle Hydrariv.

C'est en particulier le cas des formulations nécessitant un calcul par fraction de diamètre ou de concentration faisant appel au nombre de Reynolds et/ou à la vitesse de chute des particules.

4.2 LA FORMULE DE MEYER PETER ET MÜLLER

Elle donne le transport solide en volume de grains transportés par charriage uniquement.

Son utilisation est donc en toute rigueur limitée à une valeur de la contrainte de Shield inférieur à 0.25 environ.

Sa forme adimensionnelle est donnée ci-après :

$$\frac{q_s}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) * g * d_{50}^3}} = 8 * (\beta * \sigma^* - \sigma_c)^{3/2}$$

avec :

q_s : débit solide (volume de grains) en m^3/s par mètre de largeur

γ_s et γ_w , poids volumiques du matériau solide et de l'eau

d_{50} : diamètre médian des matériaux en m

g : accélération de la pesanteur en m/s^2

σ^* : contrainte de shield (valeur adimensionnelle)

σ_c : contrainte critique sur le fond (valeur adimensionnelle)

$\beta = (K_f/K_{\text{grain}})^{3/2}$ paramètre adimensionnel dépendant de la rugosité des grains et de la rugosité des fonds

$K_{\text{grain}} = 21/d_{50}^{1/6}$ pour une granulométrie uniforme

Le choix de la valeur de la contrainte critique constitue en fait un paramètre de calage.

Les valeurs usuelles sont :

$\sigma_c = 0.047$ pour une granulométrie uniforme

$\sigma_c = 0.138$ pour une granulométrie étalée avec prise en compte de l'effet d'armure

Pour les deux formulations précédentes, la contrainte de Shield peut s'écrire en remplaçant i par son expression déduite de l'expression de Manning Strickler :

$$\sigma^* = \frac{U^2}{K^2 * R h^{\frac{1}{3}} * \frac{(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} * d_{50}}$$

Bien que le domaine de validité de la formulation de Meyer Peter et Müller corresponde selon Ramette aux valeurs de contrainte de Shield inférieures à 0.25, cette dernière est malgré tout développée pour le transport par charriage qui apparaît comme le mode de transport principalement responsable des formes fluviales sur la Loire. Les dunes présentes dans le lit semblent en effet témoigner de la prépondérance du charriage sur le transport par suspension. D'autre part, il convient de noter que la fraction fine des sables (diamètre < 0.3mm) représente la moitié du sable en suspension mais seulement 5% environ de la composition du matériau du lit (cf. travaux de L. Berthois – note de P. Lefort sur la granulométrie et le transport solide des sables de Bass Loire – juillet 2009). Dans ce contexte, il nous paraît opportun de proposer son application pour évaluer la mobilité des matériaux de Loire et les évolutions des fonds suite à la mise en place des différentes actions dans le lit.

Le graphique ci-après représente l'évolution du débit solide calculé selon la formulation de Meyer Peter et Müller

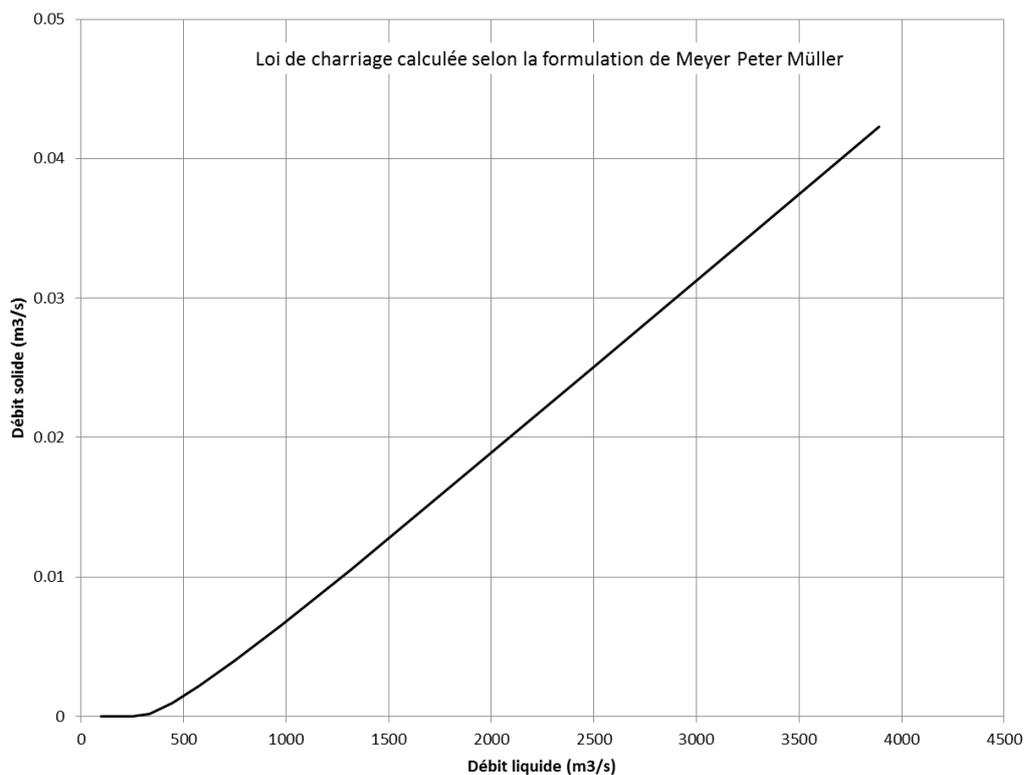
Les paramètres pris en compte correspondent au bief amont de Loire (amont du Bec de Maine):

$D_{50} = 1.5$ mm

Pente = 0.15‰

Largeur de la bande active = 300 m

La formulation considère un diamètre unique des matériaux (et non plusieurs classes de diamètre d_i définies par un pourcentage p_i de présence dans le mélange), une pente uniforme et une largeur unique de lit actif. Elles ne constituent donc pas une estimation du transport solide réel en Loire.



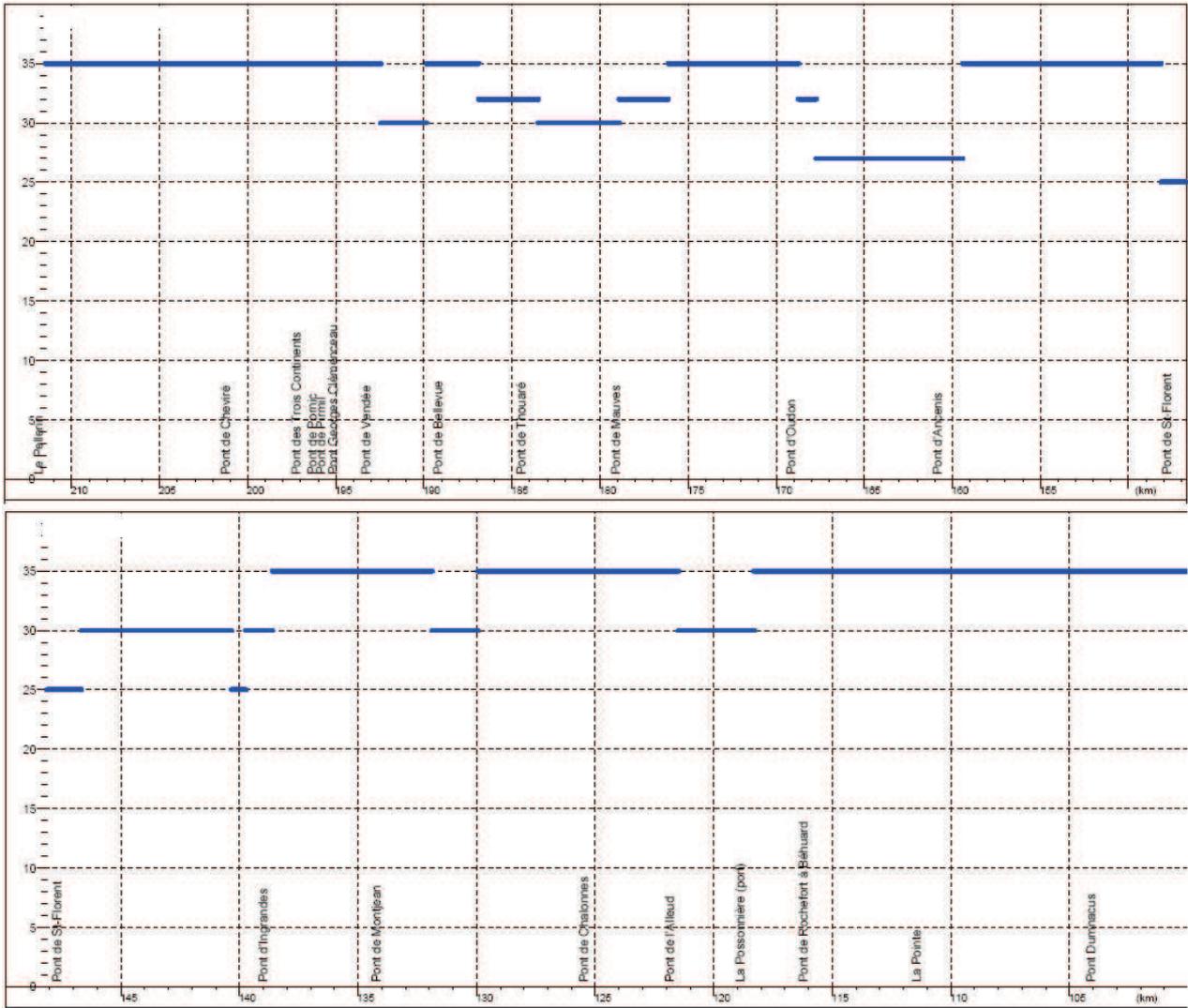
ANNEXE 4 : RESULTATS DE CALAGE DU MODELE HYDROSEDIMENTAIRE



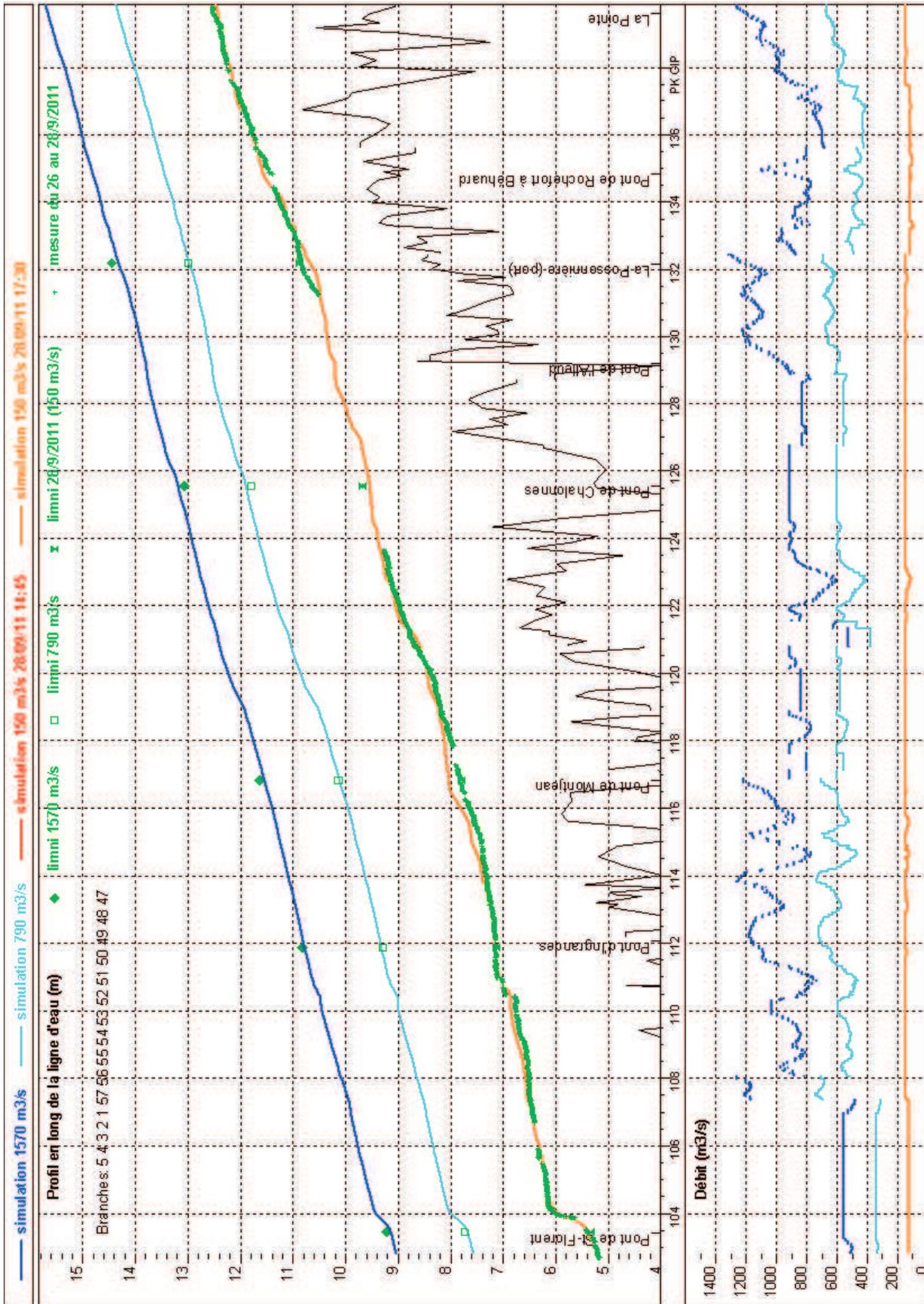
Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

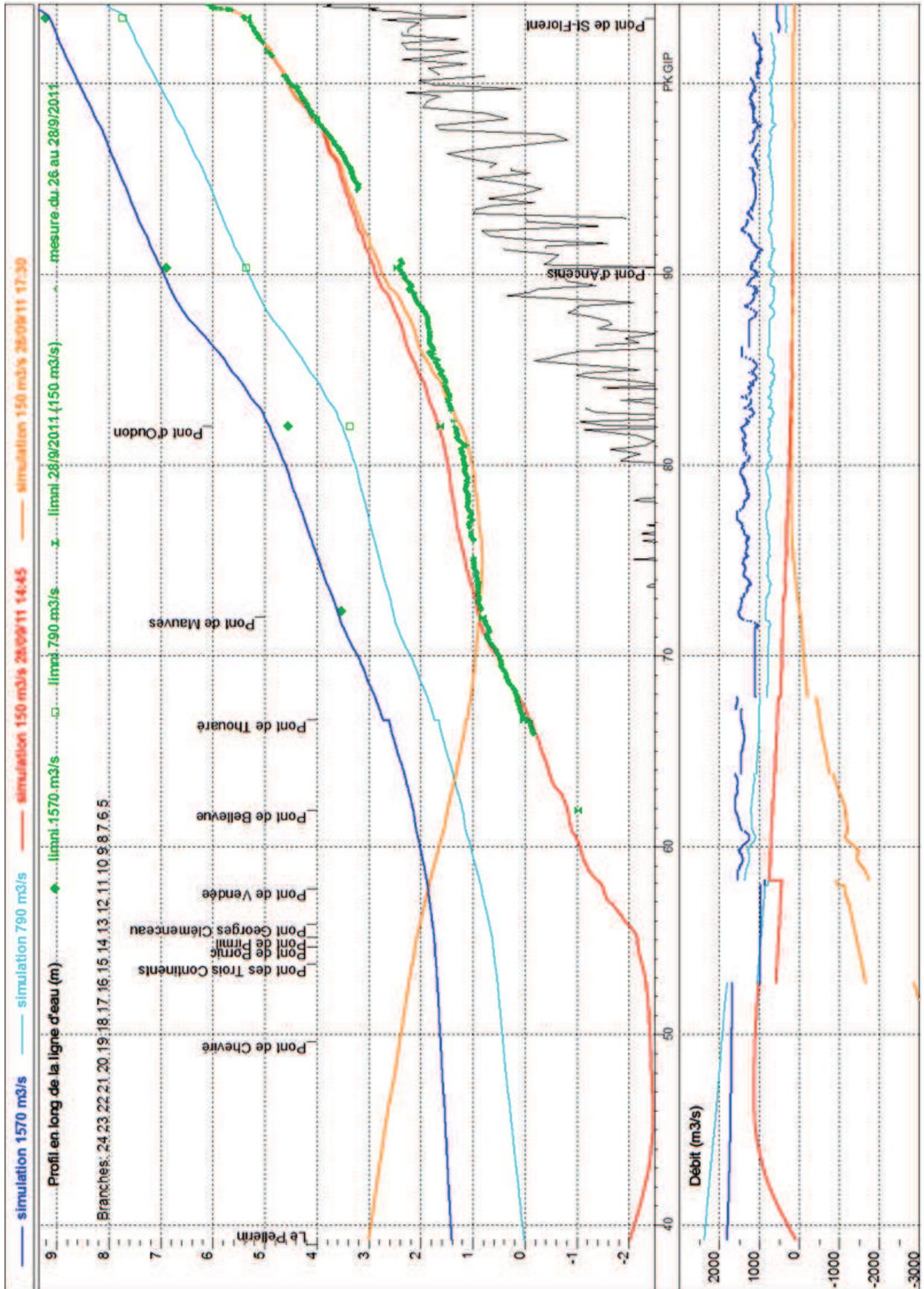
Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

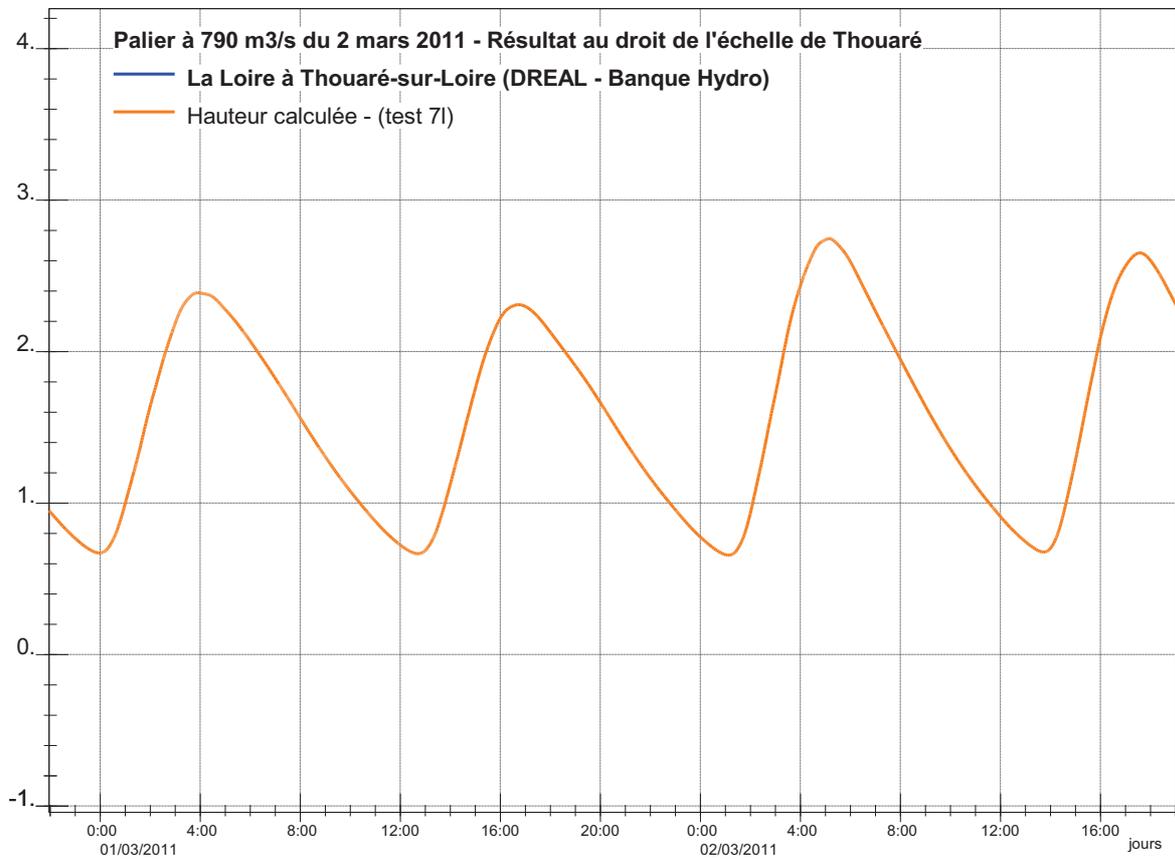
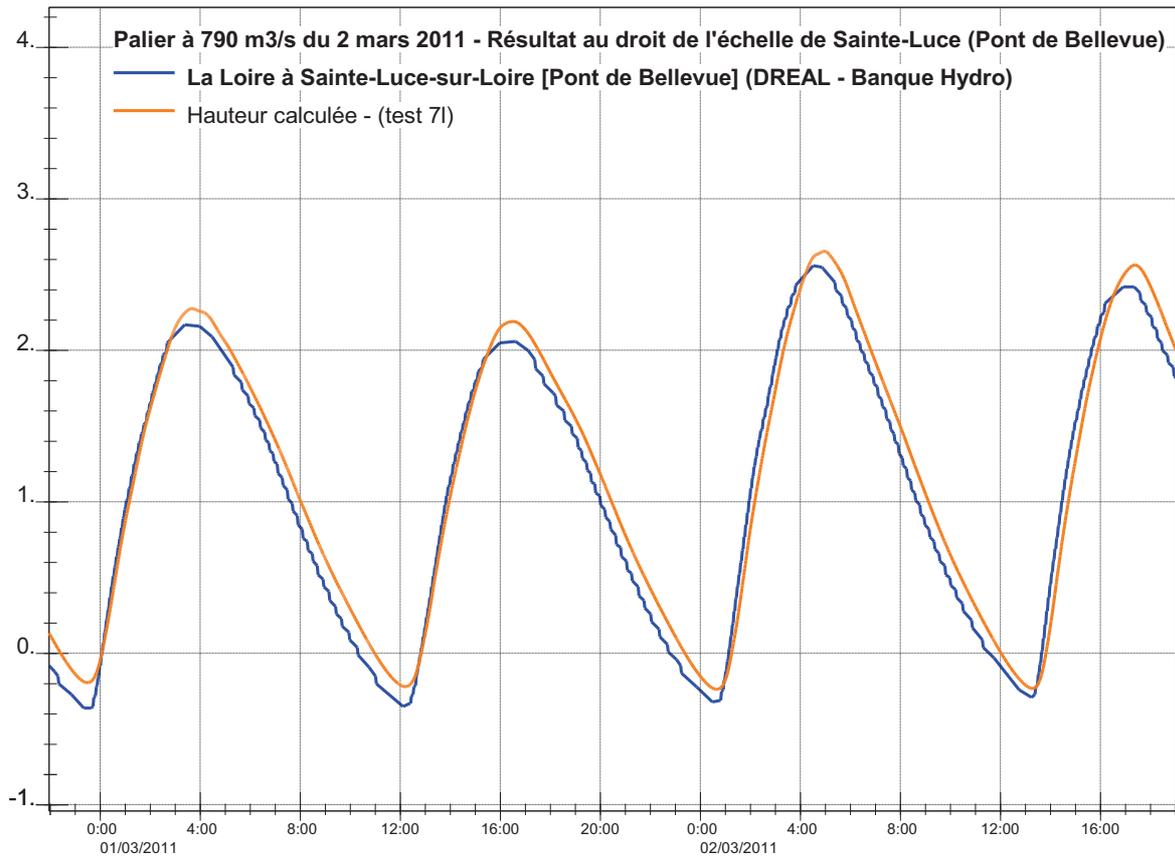
Définition du programme d'action 2012-2020

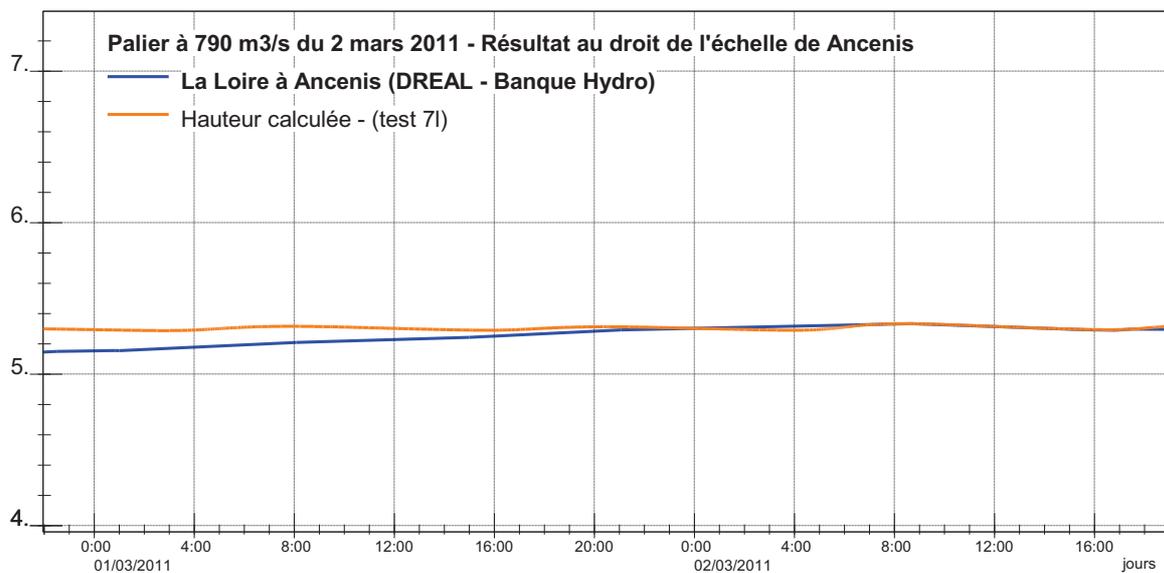
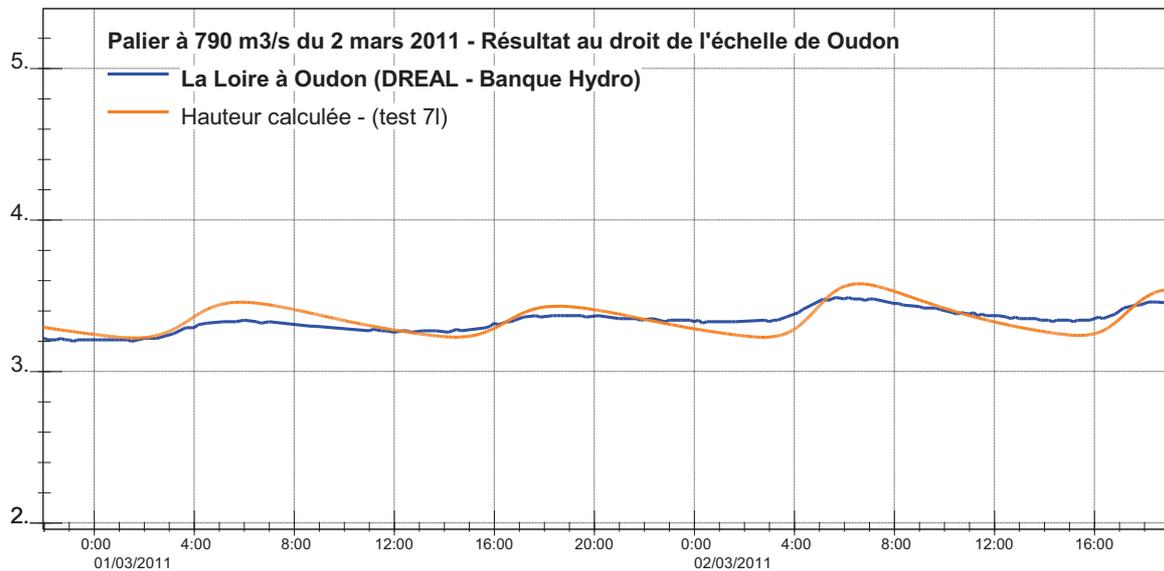
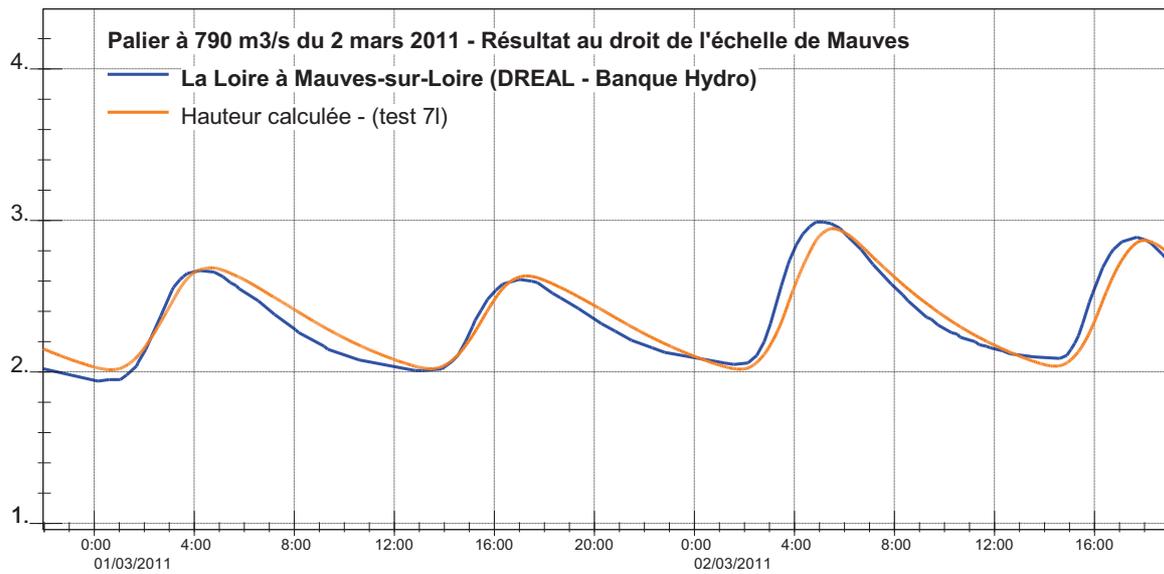


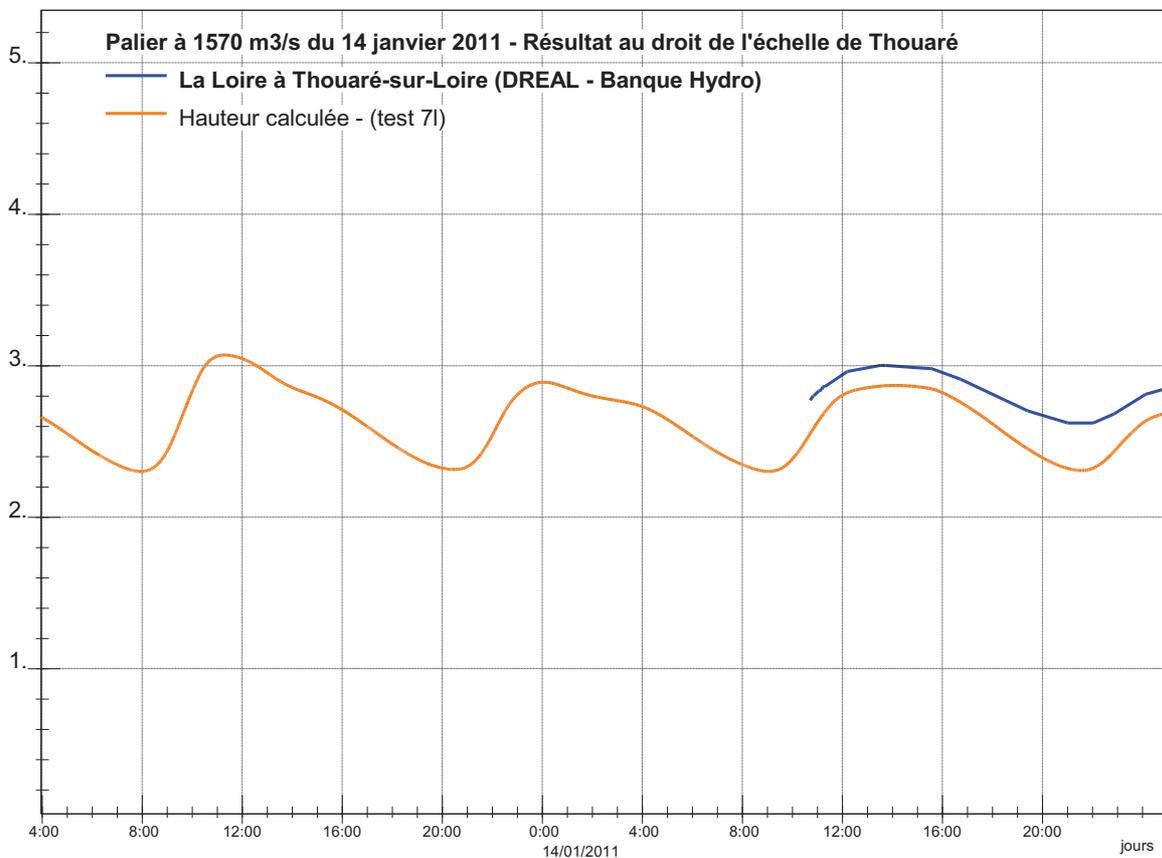
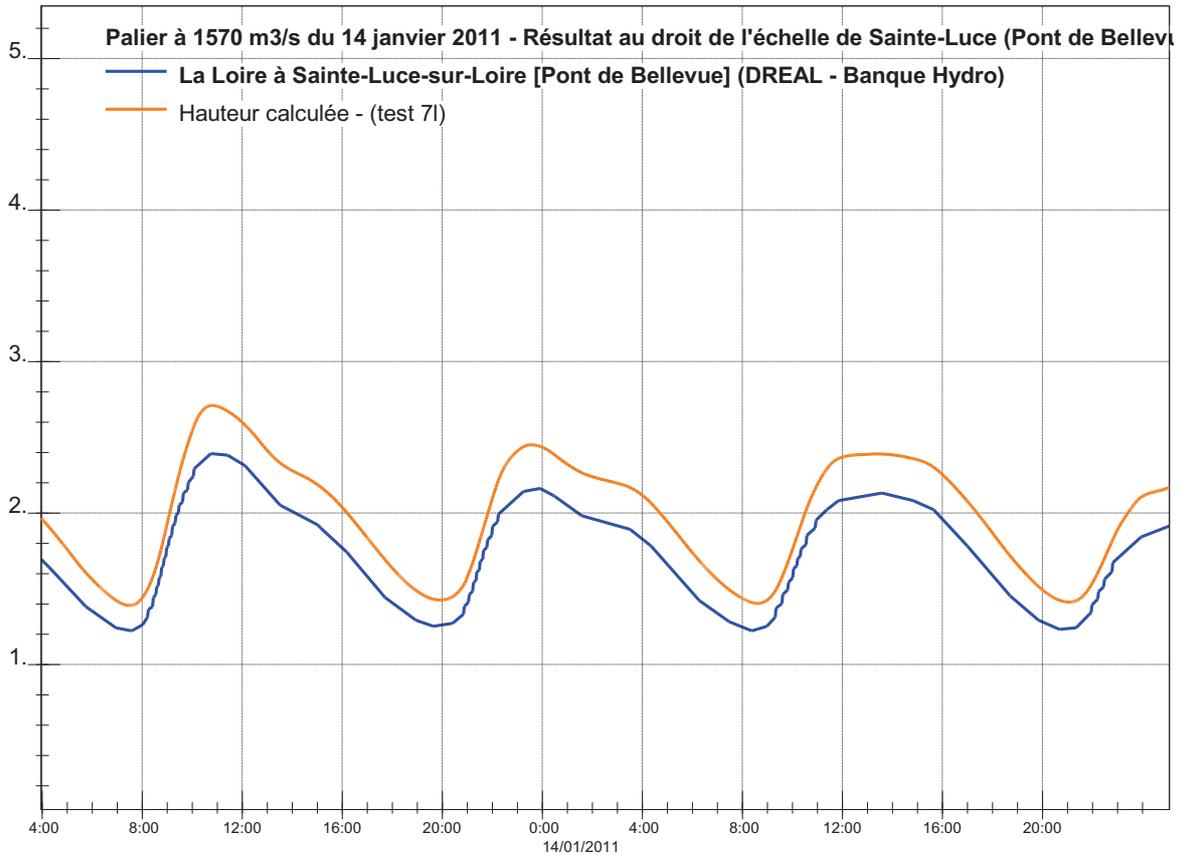
Profil en long des coefficients de Strickler retenus

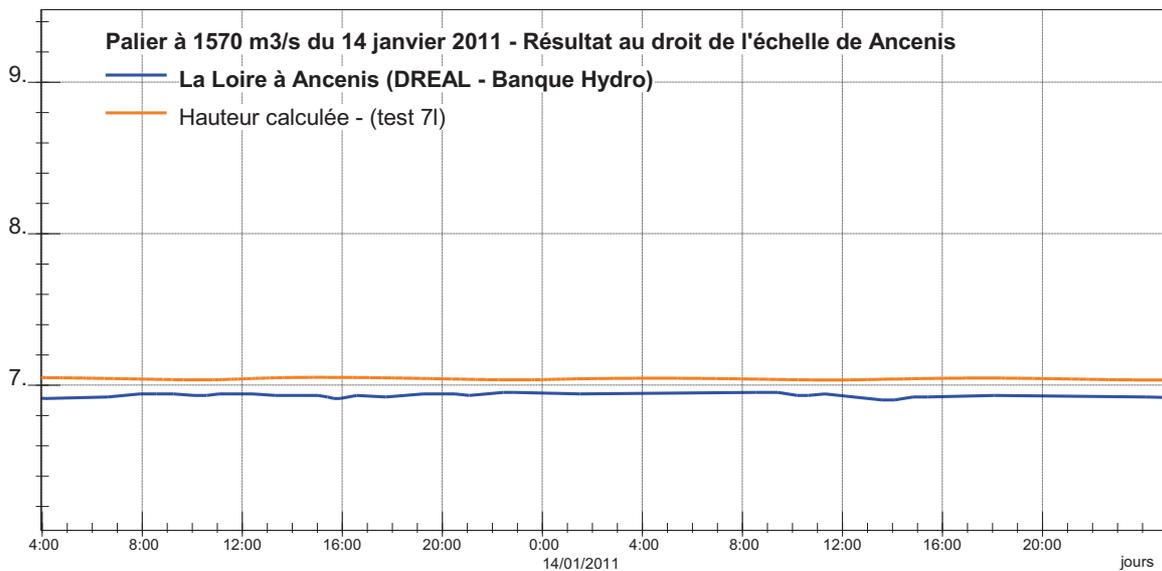
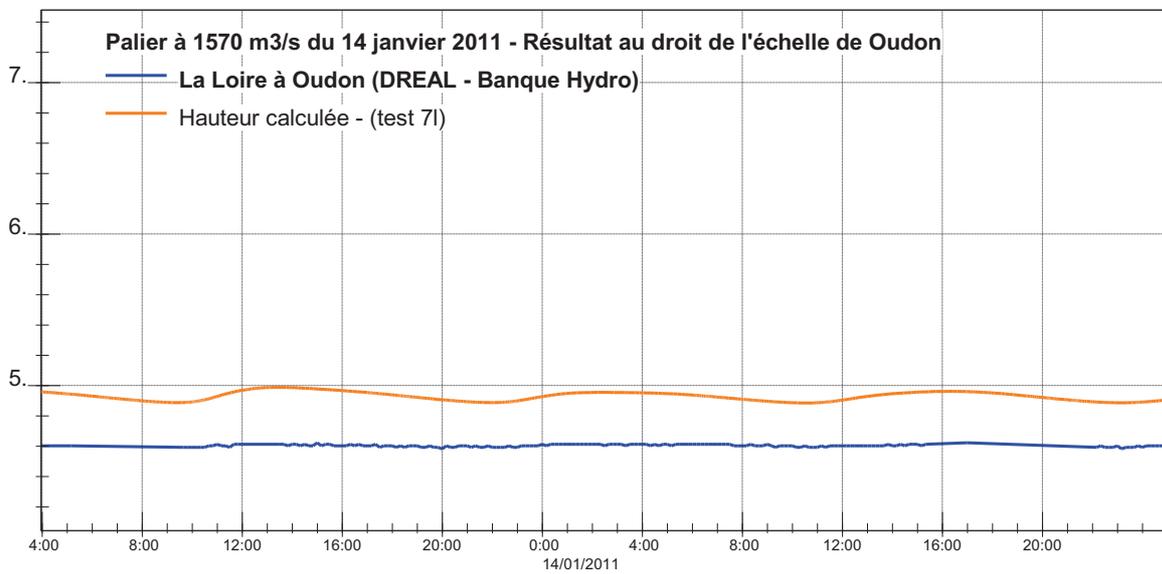
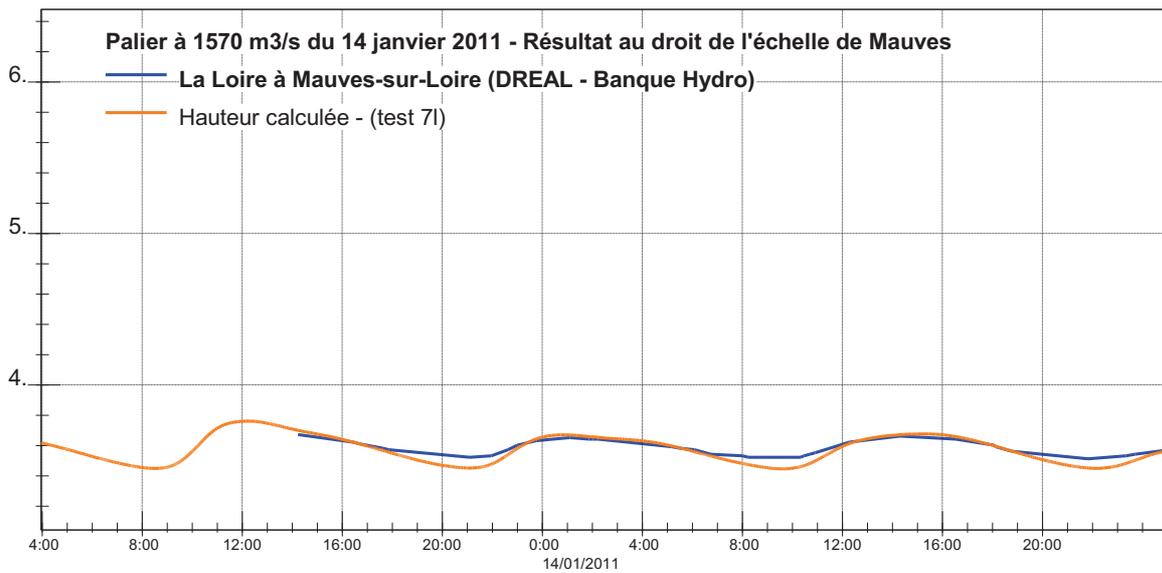


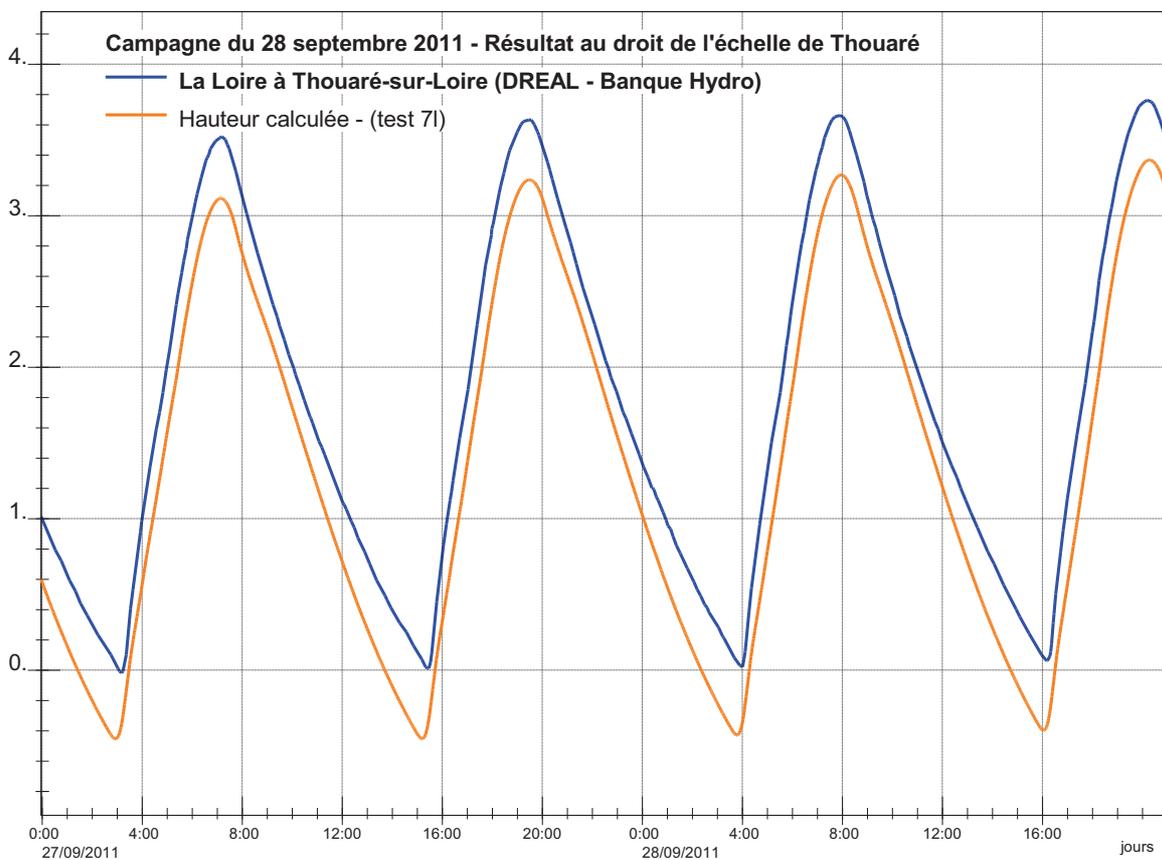
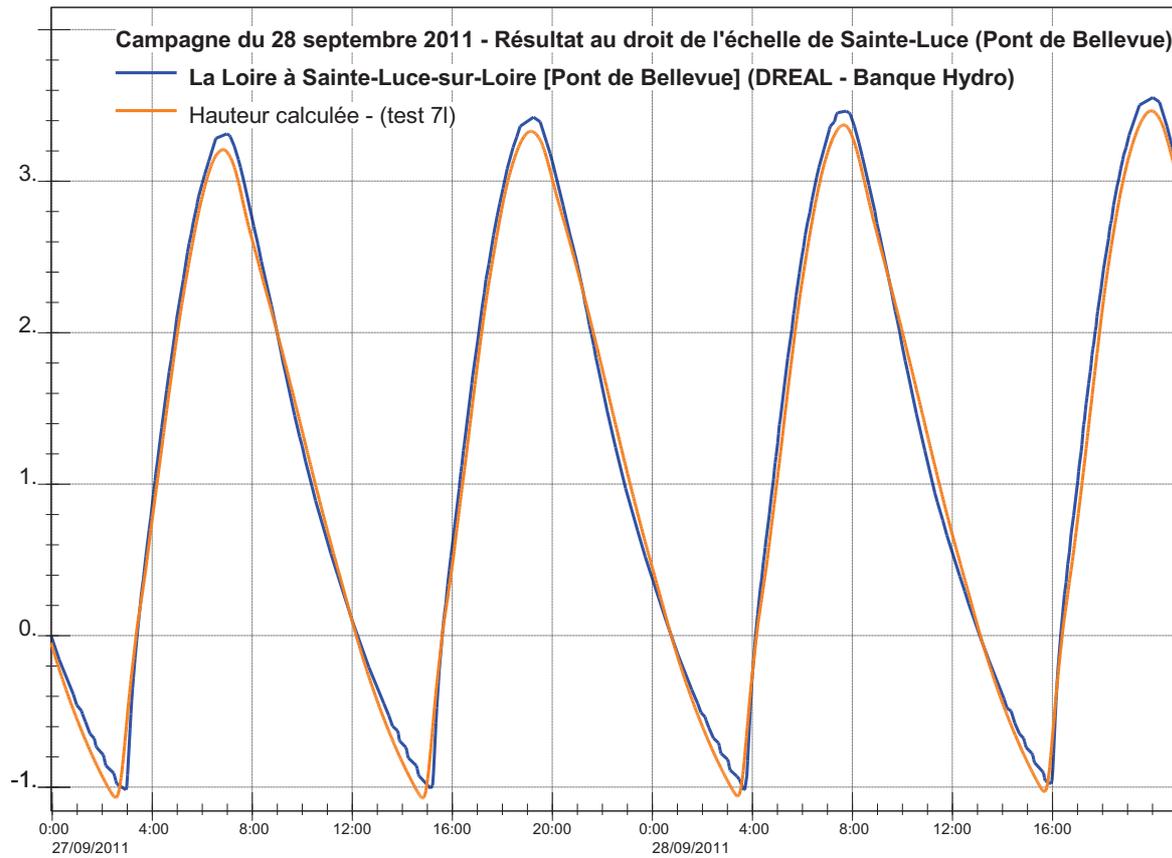












ANNEXE 5 : BILANS SEDIMENTAIRES



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

Bilan sédimentaire en milliers de m3

N°	désignation	bras principal				bras secondaire				système d'épis				total par secteur				total par morphologie			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	total
1	scénario 1: tendanciel - 40 ans	-795	-913	-643	-659	151	319	376	437	452	699	273	634	-192	106	6	412	-3009	1284	2058	333
	scénario 1: tendanciel - 70 ans	-983	-355	-694	-948	-53	330	654	469	407	745	255	655	-629	720	215	176	-2980	1401	2062	483
2	programmation 201- 40 ans	-166	14	55	105	-50	164	175	547	-2633	-1449	-914	-14	-2849	-1271	-684	638	8	835	-5009	-4166
	programmation 201- 70 ans	-369	142	177	-157	-297	-142	119	619	-2815	-1644	-982	-33	-3482	-1644	-687	429	-208	298	-5475	-5384
3	programmation 202 - 40 ans	-249	176	36	123	-57	157	174	547	-2421	-2006	-914	-14	-2727	-1673	-703	656	86	821	-5354	-4447
	programmation 202 - 70 ans	-448	187	195	-169	-306	-135	123	618	-2632	-2165	-950	-33	-3387	-2113	-631	416	-235	300	-5780	-5716
	programmation 203- 40 ans	-220	138	46	249	-38	158	168	547	-2293	-1446	-902	-49	-2550	-1149	-688	747	213	835	-4689	-3640
4	programmation 203- 70 ans	-419	136	202	-114	-297	-156	121	617	-2546	-1644	-954	-53	-3262	-1664	-630	450	-195	284	-5196	-5106
	programmation 204 - 40 ans	-164	42	109	1124	-47	168	177	804	-2628	-1431	-869	24	-2839	-1220	-583	1952	1111	1102	-4904	-2690
	programmation 204 - 70 ans	-363	164	267	794	-296	-132	130	919	-2815	-1621	-960	11	-3474	-1590	-564	1724	861	621	-5385	-3903
	programmation 205- 40 ans	-246	207	118	1148	-55	171	177	847	-2420	-1992	-820	55	-2721	-1614	-525	2050	1227	1139	-5176	-2810
5	programmation 205- 70 ans	-453	217	281	818	-303	-125	132	953	-2632	-2149	-924	18	-3388	-2057	-512	1789	863	657	-5687	-4167
	programmation 206 - 40 ans	106	606	19	1026	76	-130	141	800	-2357	-1252	-733	85	-2174	-776	-573	1912	1757	888	-4256	-1611
	programmation 206 - 70 ans	-38	700	353	668	-170	-455	139	899	-2520	-1370	-904	25	-2728	-1124	-411	1592	1684	413	-4769	-2671

Différence avec scénario tendanciel

N°	désignation	bras principal				bras secondaire				système d'épis				total par secteur				total par morphologie			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	total
1	programmation 201- 40 ans	629	927	698	764	-202	-156	-202	110	-3084	-2148	-1187	-648	-2657	-1377	-691	226	3018	-449	-7067	-4499
	programmation 201- 70 ans	613	497	871	791	-244	-472	-536	149	-3222	-2390	-1237	-687	-2853	-2364	-903	253	2772	-1103	-7536	-5867
2	programmation 202 - 40 ans	545	1088	679	782	-208	-162	-202	110	-2872	-2705	-1187	-648	-2535	-1779	-710	244	3095	-463	-7413	-4780
	programmation 202 - 70 ans	534	542	889	779	-253	-465	-531	149	-3039	-2911	-1205	-687	-2758	-2834	-847	240	2744	-1101	-7842	-6198
3	programmation 203- 40 ans	575	1051	689	908	-189	-161	-208	110	-2744	-2145	-1175	-683	-2358	-1255	-694	335	3223	-449	-6747	-3973
	programmation 203- 70 ans	564	491	896	834	-244	-486	-534	148	-2952	-2389	-1209	-708	-2633	-2384	-846	274	2785	-1116	-7258	-5589
4	programmation 204 - 40 ans	630	1049	846	545	-449	-475	-256	180	-2997	-2343	-1227	-687	-3070	-1770	-637	38	2815	-1000	-7254	-5439
	programmation 204 - 70 ans	619	397	803	2072	6	-161	-477	335	-3035	-2176	-1124	-630	-2210	-1940	-798	1776	4091	-298	-6966	-3173
5	programmation 205- 40 ans	549	1119	761	1807	-207	-149	-200	410	-2871	-2691	-1093	-579	-2529	-1720	-531	1638	4236	-144	-7235	-3143
	programmation 205- 70 ans	530	572	975	1766	-250	-455	-523	483	-3038	-2894	-1180	-636	-2759	-2777	-727	1613	3843	-744	-7748	-4650
	programmation 206 - 40 ans	900	1519	662	1685	-75	-450	-235	363	-2808	-1951	-1006	-549	-1982	-882	-579	1500	4766	-396	-6314	-1944
6	programmation 206 - 70 ans	945	1055	1047	1616	-117	-785	-515	430	-2927	-2115	-1159	-630	-2099	-1844	-626	1416	4664	-987	-6830	-3153

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	Suppression des épis dans le bras principal
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-1.7
Système d'épis	0.5	-1.5
Bras secondaire	1.2	1.3
Volume sortant	-12.6	-13.2

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	Suppression des épis dans le bras principal
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	0.8
Système d'épis	0.6	-1.4
Bras secondaire	1.9	1.9
Volume sortant	-12.7	-13.6

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	Ouverture des bras secondaires
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-2.5
Système d'épis	0.5	-0.2
Bras secondaire	1.2	1.3
Volume sortant	-12.6	-12.6

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	Ouverture des bras secondaires
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	0.2
Système d'épis	0.6	-0.2
Bras secondaire	1.9	2.0
Volume sortant	-12.7	-12.9

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 42
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-2.3
Système d'épis	0.5	0.6
Bras secondaire	1.2	1.3
Volume sortant	-12.6	-11.6

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 42
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	0.5
Système d'épis	0.6	0.6
Bras secondaire	1.9	2.1
Volume sortant	-12.7	-11.8

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 4
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-1.4
Système d'épis	0.5	0.6
Bras secondaire	1.2	1.6
Volume sortant	-12.6	-10.4

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 4
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	1.4
Système d'épis	0.6	0.6
Bras secondaire	1.9	2.3
Volume sortant	-12.7	-10.7

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 43
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-0.3
Système d'épis	0.5	0.6
Bras secondaire	1.2	1.8
Volume sortant	-12.6	-9.0

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 43
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	2.4
Système d'épis	0.6	0.7
Bras secondaire	1.9	2.5
Volume sortant	-12.7	-9.4

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 5
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-1.0
Système d'épis	0.5	0.7
Bras secondaire	1.2	1.7
Volume sortant	-12.6	-9.8

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 5
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	1.7
Système d'épis	0.6	0.7
Bras secondaire	1.9	2.4
Volume sortant	-12.7	-10.2

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 51
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-0.5
Système d'épis	0.5	0.7
Bras secondaire	1.2	1.9
Volume sortant	-12.6	-9.1

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 51
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	2.1
Système d'épis	0.6	0.8
Bras secondaire	1.9	2.4
Volume sortant	-12.7	-9.7

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 101
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-0.5
Système d'épis	0.5	1.0
Bras secondaire	1.2	1.5
Volume sortant	-12.6	-9.1

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 101
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	1.4
Système d'épis	0.6	1.1
Bras secondaire	1.9	2.1
Volume sortant	-12.7	-10.4

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 10
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	0.6
Système d'épis	0.5	1.2
Bras secondaire	1.2	2.0
Volume sortant	-12.6	-7.5

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 10
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	3.2
Système d'épis	0.6	1.2
Bras secondaire	1.9	2.3
Volume sortant	-12.7	-8.2

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	scénario 11
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-0.4
Système d'épis	0.5	0.7
Bras secondaire	1.2	0.1
Volume sortant	-12.6	-10.8

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	scénario 11
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	2.2
Système d'épis	0.6	0.8
Bras secondaire	1.9	1.1
Volume sortant	-12.7	-11.0



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

ANNEXE 6 : CARTOGRAPHIE DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX



Groupement d'intérêt public Loire Estuaire

Stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération nantaise :

Définition du programme d'action 2012-2020

Annexe 6 : Plan de localisation des enjeux

