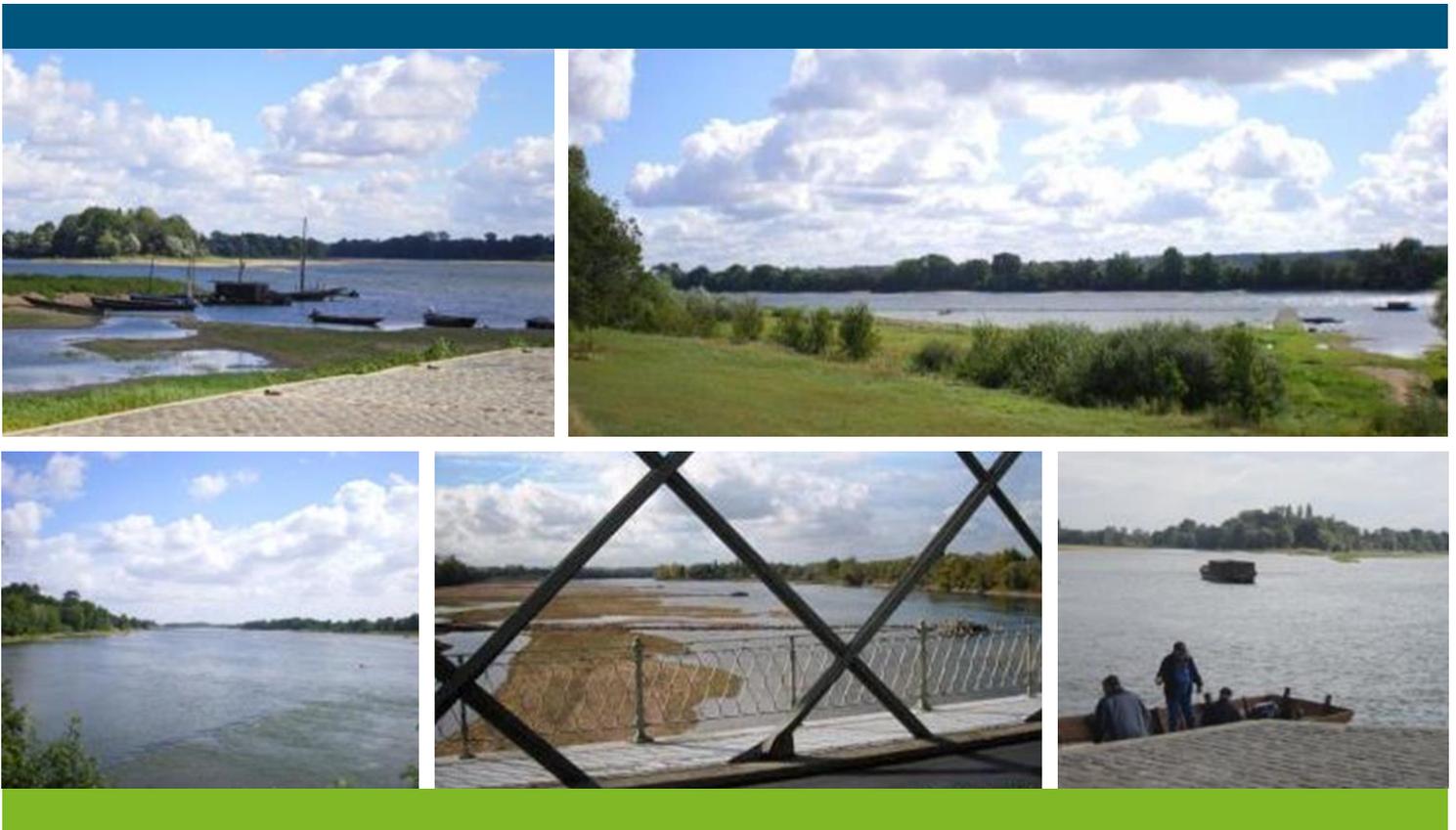


Remodelage des épis en
Loire – Synthèse du suivi
expérimental sur 5 ans

5^{ème} année de suivi - 2014



Juillet 2015

Informations qualité

Contrôle qualité

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
V2	01/07/2015	Z.LAURENT	R.FOURRIER

Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
M Coulon	VNF	01/07/2015

Copie à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :

Table des matières

1.	Avant-propos.....	1
1.1	Contexte de l’opération.....	1
1.2	Rappel sur les objectifs et effets attendus de l’opération.....	1
1.3	Bilan du suivi sur les années précédentes.....	3
1.4	Conditions hydrologiques des années de suivi (N+1, N+2, N+3, N+4 et N+5).....	4
2.	Présentation de la méthodologie et des résultats du suivi expérimental.....	7
2.1	Thème 1 : Suivi de la ligne d’eau.....	8
2.1.1	Méthodologie.....	8
2.1.1.1	Suivi des stations limnimétriques.....	8
2.1.1.2	Levé des lignes d’eau au DGPS	9
2.1.2	Résultats et discussions.....	12
2.1.2.1	Suivi des stations limnimétriques.....	12
2.1.2.2	Suivi des levés des lignes d’eau au DGPS	18
2.2	Thème 2 : Remobilisation des sédiments.....	20
2.2.1	Méthodologie.....	20
2.2.1.1	Suivi bathymétrique – zone d’étude globale.....	20
2.2.1.2	Suivi topographique – zone d’étude globale	20
2.2.1.3	Suivi bathymétrique – zone d’étude locale	20
2.2.1.4	Granulométrie des sédiments – zone d’étude globale	20
2.2.1.5	Granulométrie des sédiments – zone d’étude locale.....	21
2.2.1.6	Suivi des processus érosions/dépôts	21
2.2.2	Résultats et discussion.....	22
2.2.2.1	Rappel des conclusions des 4 premières années de suivi.....	22
2.2.2.2	Résultats de l’année N+5	22
2.2.2.3	Conclusion générale.....	30
2.3	Thème 3 : Répartition et vitesse des écoulements	31
2.3.1	Méthodologie.....	31
2.3.2	Résultats et discussion.....	32
2.3.2.1	Détails des deux méthodes d’évaluation de la répartition des débits entre les différents bras	34

3.	Présentation des résultats du suivi des effets du projet sur l'environnement et les usages	36
3.1	Thème 4 : Suivi de la nappe.....	36
3.1.1	Méthodologie.....	36
3.1.2	Résultats et discussion.....	36
3.2	Thème 5 : Suivi ornithologique	37
3.2.1	Méthodologie.....	37
3.2.2	Résultats et discussion.....	37
3.2.2.1	Nidification année de référence	37
3.2.2.2	Nidifications observées sur les 4 premières années de suivi.....	38
3.2.2.3	Observations de l'année 2014	38
3.2.2.4	Conclusion	38
3.3	Thème 6 : Suivi de la flore et des habitats.....	39
3.3.1	Méthodologie.....	39
3.3.2	Résultats et discussion.....	39
3.4	Thème 7 : Suivi de la navigation et de la pêche	41
3.4.1	Méthodologie.....	41
3.4.1.1	Suivi des tirants d'eau	41
3.4.1.2	Fréquentation du site	41
3.4.2	Résultats et discussion.....	41
3.4.2.1	Analyse des tirants d'eau	41
3.4.2.2	Fréquentation du site	42
3.5	Thème 8 : Reportage photographique	43
3.5.1	Méthodologie.....	43
3.5.2	Résultats et discussion.....	43
4.	Conclusion	44

Liste des figures

Figure 1 : Conditions hydrologiques pour les cinq années de suivi.....	6
Figure 2 : Conditions hydrologiques des levés DGPS à 1500 m ³ /s	11
Figure 3 : Conditions hydrologiques des levés DGPS à 300 m ³ /s	11
Figure 4 : Suivi de la station limnimétrique de la Possonnière – Ensemble des données relevées	14
Figure 5 : Suivi de la station limnimétrique de la Possonnière – Données relevées en étiage.....	15
Figure 6 : Suivi de la station limnimétrique de la Pointe –Ensemble des données relevées	16
Figure 7 : Suivi de la station limnimétrique de la Pointe – Données relevées en étiage	17
Figure 8 : Lignes d'eau sur le bras principal de la Loire pour un débit voisin de 300 m ³ /s	19
Figure 9 : Hydrogramme à Montjean/Loire de la Loire entre 2009 et 2014 et distribution temporelle des campagnes de mesures	22
Figure 10 : Emplacement des secteurs étudiés	23
Figure 11 : Evolution des hauteurs du lit entre 2013 et 2014.....	24
Figure 12 : Dynamique de dépôt et d'érosion du lit entre 2013 et 2014	25
Figure 13 : Evolution des hauteurs du lit entre février 2014 et octobre 2014	26
Figure 14 : Dynamique de dépôt et d'érosion entre février 2014 et octobre 2014.....	26
Figure 15 : évolution de Hmax/Hmoy sur le bras principal entre 2009 et 2014	27
Figure 16 : Profil en long secteur 7 (les barres verticales représentent les épis).....	28
Figure 17 : Profil en long secteur 3 (les barres verticales représentent les épis).....	28
Figure 18 : Profil en long secteur 8 (les barres verticales représentent les épis).....	29
Figure 19 : dates des relevés courantologie DREAL de 2010 à 2014	32
Figure 20 : répartition des débits entre bras principal et bras secondaire entre 2009 et 2014	33
Figure 21 : évolution de la vitesse moyenne sur le bras secondaire entre 2009 et 2014	33
Figure 22 : répartition des débits entre bras principal (Q3) et bras secondaire (Q2) d'après les jaugeages du 16/06/2010 – 880 m ³ /s à Montjean et 0,49 m à la Possonnière	34
Figure 23 : répartition des débits entre bras principal (Q3) et bras secondaire (Q2) d'après les jaugeages du 04/06/12 – 856 m ³ /s à Montjean et 0,52m à la Possonnière.....	35
Figure 24 : répartition des débits entre bras principal (Q3) et bras secondaire (Q2) d'après les jaugeages du 02/04/14 – 846 m ³ /s à Montjean et 0,64 m à la Possonnière	35

Liste des tableaux

Tableau 1 Les thèmes du suivi expérimental	2
Tableau 2 : Les thèmes du suivi d'impact	3
Tableau 3 : Levés au DGPS effectués en 2014	9
Tableau 4 : Dates et débits correspondants aux levés DGPS.....	10
Tableau 5 : Quantification érosion/sédimentation du lit entre 2013 et 2014.....	25
Tableau 6 : Bilan sédimentaire du lit entre février 2014 et octobre 2014	27
Tableau 7 : Valeur moyenne des érosions maximales (en m) enregistrées par les chaînes d'érosion pour chaque secteur avec entre parenthèses le nombre de chaînes relevées	30
Tableau 8 : Moyenne de la granulométrie par secteur	30
Tableau 9 : dates et débits des jaugeages de suivi entre 2009 et 2014	31
Tableau 10: Suivi des tirants d'eau sur les cinq années de suivi (+ année 0)	42
Tableau 11 : Moyenne des hauteurs de tirant d'eau observées pour un débit aux alentours de 200 m ³ /s..	42

1. Avant-propos

1.1 Contexte de l'opération

Depuis le début du XX^{ème} siècle, l'aménagement du chenal de la Loire, notamment au moyen des épis, et les extractions massives de sables ont provoqué des abaissements des fonds de 2 à 5 m, selon les endroits, entre les Ponts-de-Cé et Nantes.

La diminution du niveau d'eau en étiage (ou « ligne d'eau ») a atteint jusqu'à 3,5 m dans l'agglomération nantaise, fragilisant les quais, les ponts et berges. En amont de Nantes, un assèchement des boires et zones humides est également observé.

Dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature, un programme de restauration de l'estuaire a été engagé. Ce dernier comprend notamment le remodelage des épis, inscrit dans le contrat de Projet Interrégional Loire (PILGN) 2007/2013.

Le suivi porte sur le projet expérimental de remodelage d'une centaine d'épis sur une section de 10 km entre "La Pointe" de Bouchemaine et le "Pont de L'Alleud" à Challonnes.

Le projet consiste en une combinaison de deux actions :

- Un abaissement de la hauteur des épis de l'ordre de 0,5 m (cette valeur pouvant être inférieure sur certains épis en fonction des variations de la cote réelle d'altimétrie de certains épis) ;
- Et / ou un raccourcissement de la longueur des épis transversaux sur les deux rives permettant d'élargir le chenal au maximum de 50 m (réduction d'environ 25% des longueurs actuelles selon les secteurs).

1.2 Rappel sur les objectifs et effets attendus de l'opération

Globalement, le projet aura pour effet de remobiliser le sable stocké entre les épis puis de rééquilibrer le transit sédimentaire et de relever la ligne d'eau d'étiage de +25 cm à l'étiage de 300 m³/s (+35 cm à l'étiage sévère de 150 m³/s). Les effets s'annuleront au-delà de la médiane.

Le projet étant expérimental, un suivi scientifique a été mis en place sur 5 années pour analyser in situ les objectifs escomptés. L'année 2009 fait office « d'état zéro ».

Le suivi des effets attendus du projet revêt une importance puisqu'il conditionne la reproductibilité de l'opération aux épis de navigation implantés sur la Loire entre Angers et Nantes. Il se divise en 3 thèmes :

Thème	Objectif du suivi
Thème 1 : Suivi de la ligne d'eau	Apprécier directement l'efficacité du projet.
Thème 2 : Sédimentologie	C'est la remobilisation des sédiments dans le chenal qui doit permettre une rehausse de la ligne d'eau. Il est donc nécessaire d'analyser la corrélation entre la remobilisation des sédiments et la rehausse de la ligne d'eau notamment pour définir l'opportunité de reproduire l'opération.
Thème 3 : Répartitions des vitesses dans le chenal	La rehausse de la ligne d'eau passe par une meilleure répartition des débits et vitesses dans l'ensemble du chenal. Le suivi permettra de valider cet effet escompté.

Tableau 1 Les thèmes du suivi expérimental

En dehors des effets directement attendus du projet expérimental, des incidences sont attendues sur l'environnement dans la zone d'expérimentation.

Le relèvement de la ligne d'eau en étiage, escompté par l'opération, aura globalement des effets positifs sur le milieu biologique et les usages :

- Augmentation des surfaces et des durées de mise en eau des boires,
- Régénération et humidification des milieux colmatés, favorisant l'installation des peuplements aquatiques et amphibiens des sables,
- Maintien du potentiel exploitable des nappes souterraines,
- Diminution des vitesses et des courants dans le chenal de navigation.

Par contre, **quelques effets potentiellement négatifs ont également été identifiés** lors de la réalisation des dossiers réglementaires : étude d'impact et évaluation des incidences Natura 2000.

- Vis-à-vis de la biodiversité, la réduction de la superficie de grèves sableuses représente une diminution de la capacité d'accueil pour les oiseaux nicheurs.
- Vis-à-vis des usagers, le projet pourrait diminuer le tirant d'eau dans le chenal de navigation, notamment en points particuliers.

Un suivi est donc mené en parallèle du suivi expérimental pour déterminer plus précisément les effets négatifs du projet sur l'environnement. Cinq thèmes d'études ont ainsi été retenus.

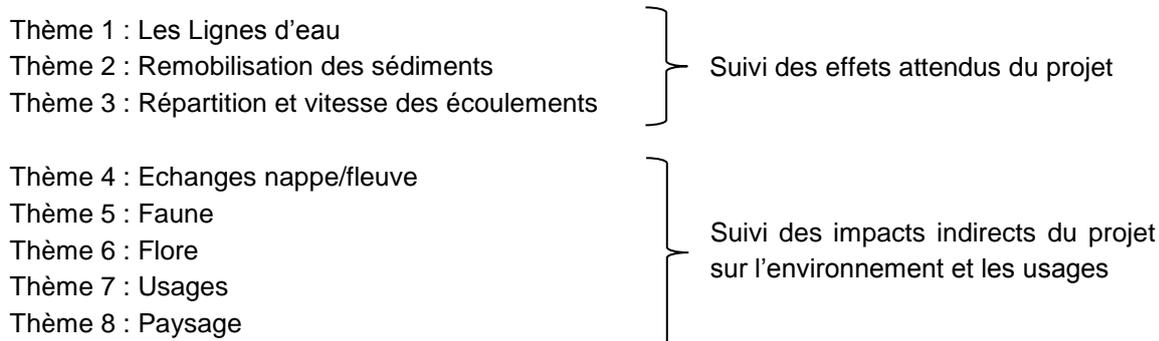
Les thèmes du suivi d'impact sont les suivants :

Thème	Objectif du suivi
Thème 4 : Suivi de la nappe	Suivi des effets sur le captage de Rochefort sur Loire
Thème 5 : Suivi ornithologique	Suivi des effets sur la reproduction des Sternes Naines, du Pierregarin et du Petit Gravelot. Ces espèces ayant justifié le classement Natura 2000 du secteur, le projet ne doit pas remettre en cause leur conservation.
Thème 6 : Suivi de la flore et des habitats	Suivre l'évolution de la conservation des habitats ayant justifié le classement Natura 2000 du site.
Thème 7 : Suivi de la navigation et de la pêche	Déterminer un éventuel impact sur la navigation et la pêche
Thème 8 : Reportage photographique	Visualiser l'évolution de la largeur du chenal

Tableau 2 : Les thèmes du suivi d'impact

1.3 Bilan du suivi sur les années précédentes

L'ensemble des thèmes de l'opération s'articule donc de la manière suivante :



Le suivi est d'une durée de 5 années comprenant au minimum :

- 2 crues significatives : débits supérieurs ou égaux à 3 100 m³/s à Montjean (période de retour 2 ans),
- 2 étiages significatifs : débits inférieurs ou égaux à 200 m³/s à Montjean.

L'expérimentation devra être prolongée tant que ces conditions hydrauliques n'auront pas été atteintes.

1.4 Conditions hydrologiques des années de suivi (N+1, N+2, N+3, N+4 et N+5)

Les crues

Au cours des périodes étudiées, la Loire a connu deux évènements supérieurs ou égaux à 3 100 m³/s. Le débit maximum mesuré de **3 580 m³/s** a été observé lors de la dernière année de suivi (N+5), le **17 février 2014**. Il a été suivi par un épisode de crue début mars, avec un débit supérieur à 2 000 m³/s. Une autre crue morphogène a eu lieu lors de l'avant-dernière année de suivi (N+4), le **13 février 2013**, où le débit mesuré était de **3 510 m³/s**. Cet épisode a été suivi d'une succession de plusieurs épisodes de **crues tardives sur la fin du printemps** (3 crues avec un débit supérieur à 2 000 m³/s entre mi-avril et mi-juin).

Les débits les plus importants en 2010, 2011 et 2012 étaient respectivement de 2 360 m³/s, 1 880 m³/s et de 2 930 m³/s.

Le critère de 2 crues morphogènes au cours des 5 années de suivi est atteint.

Les étiages

Pour les étiages, la Loire a connu 3 étiages significatifs (< 200 m³/s), en 2010, 2011, 2012. La valeur la plus faible en débit est de 103 m³/s à Montjean en juillet 2011. Pour 2010, 2012, 2013 et 2014 les débits les plus faibles étaient respectivement de 173 m³/s, 132 m³/s, 205 m³/s et 260 m³/s

Le critère des 2 étiages significatifs au cours des 5 années de suivi est atteint.

Globalement la Loire a connu en 2011 un étiage plus précoce et sévère qu'en 2010. L'année 2012 est marquée par un étiage plus court (début août à début octobre) et par des crues tardives de mi-avril à mi-juin. La période d'étiage de 2013 était plus modérée que les années précédentes avec des débits ne descendant pas sous les 205 m³/s.

De la même façon, les étiages ont été plus que modérés en 2014, avec des débits ne descendant pas sous les 260 m³/s le 14/09/2014. A peine 30 jours ont présenté un débit strictement inférieur à 300 m³/s, avec des mois de juillet et août particulièrement humides.

Les conditions hydrologiques nécessaires au suivi sur 5 années ont été atteintes. L'année 2014 sera donc la dernière année de suivi de l'expérimentation.

$Q_{3100} \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{200} \text{ m}^3/\text{s}$

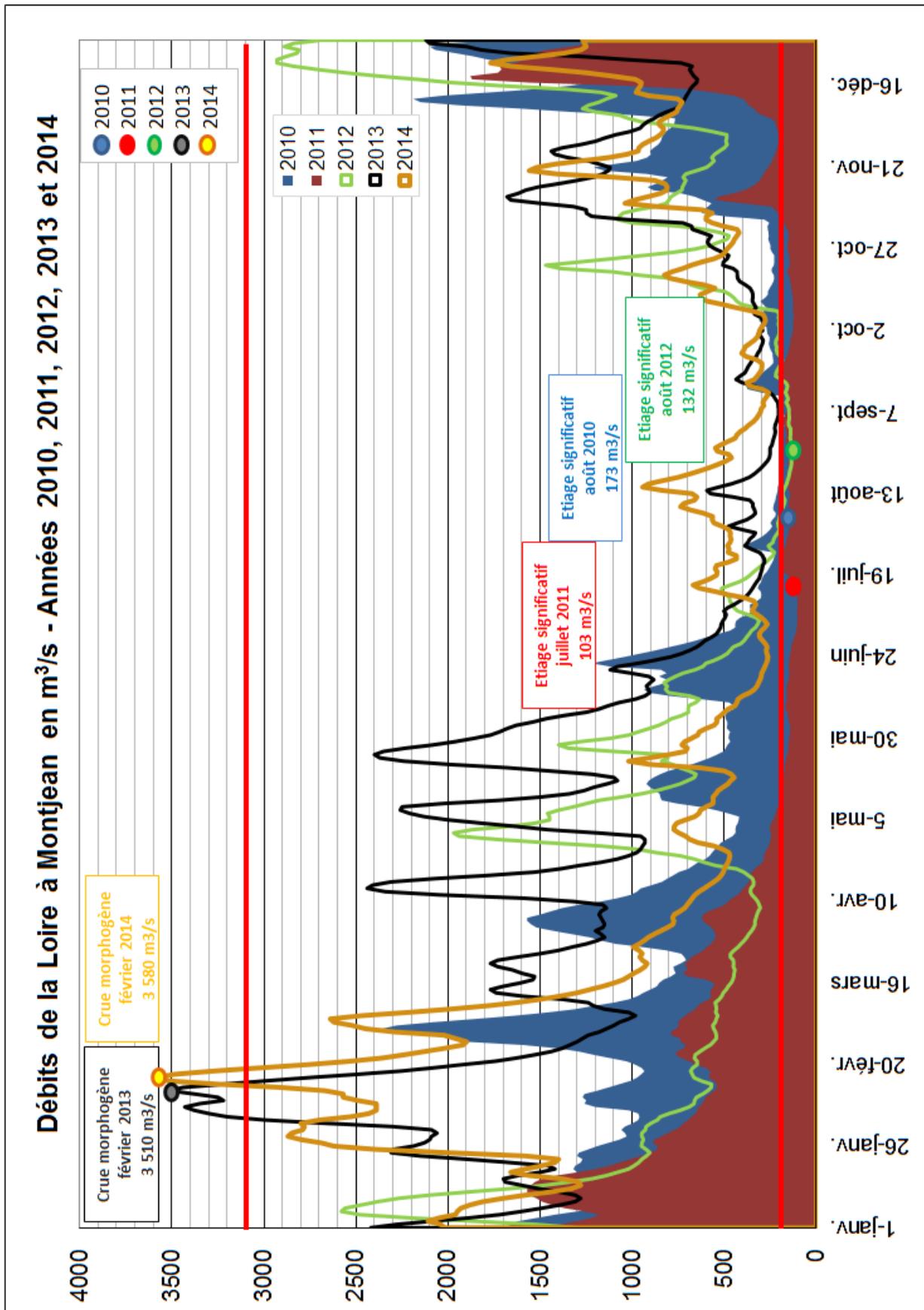


Figure 1 : Conditions hydrologiques pour les cinq années de suivi

2. Présentation de la méthodologie et des résultats du suivi expérimental

Le présent chapitre vise à évaluer les effets attendus du projet, au travers des 3 premiers thèmes de suivi :

- Thème 1 : Les lignes d'eau ;
- Thème 2 : Remobilisation des sédiments ;
- Thème 3 : Répartition et vitesse des écoulements.

2.1 Thème 1 : Suivi de la ligne d'eau

Les effets attendus du projet sont une rehausse de 25 à 35 cm de la ligne d'eau en étiage. Le projet est censé avoir un effet nul à partir du débit médian (575 m³/s).

Ce thème est donc celui qui permet d'apprécier directement l'efficacité de l'opération expérimentale.

2.1.1 Méthodologie

Le suivi de la ligne d'eau s'effectue à partir de l'exploitation de deux types de données : les levés quotidiens des stations limnimétriques présentes sur le site d'étude et les campagnes ponctuelles de mesure sur un profil longitudinal.

2.1.1.1 Suivi des stations limnimétriques

Modalité de mise en place

Un relevé des niveaux d'eau est effectué pour chacune des stations de mesure présente sur le site.

Le levé est continu sur les stations de la Pointe et de la Possonnière.

Des levés ponctuels sont également réalisés depuis 2011 à l'échelle du pont des Lombardières.

Traitement des données

Les données brutes de suivi des niveaux d'eau aux stations de la Pointe et la Possonnière ont été traitées sous Excel. Une valeur journalière à 12h00 a été retenue et mise en corrélation avec les débits à la station de Montjean. Les données sont ainsi présentées sous forme de graphique niveaux d'eau / débit.

Remarque :

Les données relevées à l'échelle du pont des Lombardières n'ont pas été exploitées : elles sont très ponctuelles, et en l'absence de données sur les années 2009 et 2010, l'effet du projet ne peut y être analysé.

Pour la station de la Pointe, il n'y a pas de données entre janvier et mars 2009 ; pour celle de la Possonnière, il n'y a pas de données sur décembre 2011.

2.1.1.2 Levé des lignes d'eau au DGPS

Modalité de mise en place

Le levé des lignes d'eau est réalisé au DGPS centimétrique sur un profil longitudinal dans le chenal.

Les interventions doivent être réalisées pour les débits suivants : 150 m³/s, 600 m³/s, 1 500 m³/s, 3 100 m³/s et 4 500 m³/s.

Données relevés en 2014

Les lignes d'eau ont été levées à partir de l'année 2010. Il n'existe donc pas d'année de référence. Pour l'année 2014, les relevés ont été réalisés pour les dates et débits indiqués dans le tableau suivant :

Date du levé	Débit à Montjean (m ³ /s)
22/01/2014	1420
05/02/2014	2530
17/02/2014	3580
18/02/2014	3490
15/04/2014	610
28/04/2014	2690
23/09/2014	297
26/09/2014	404
20/10/2014	826
24/11/2014	1280
26/11/2014	1020

Tableau 3 : Levés au DGPS effectués en 2014

Bilan des campagnes réalisées

Au cours des campagnes de levé bathymétrique de ligne d'eau réalisées par VNF, cinq ont été menées en 2010, sept en 2011, huit en 2012, dix en 2013 et onze en 2014 (voir tableau ci-dessous).

Date du levé	Débit à Montjean (m ³ /s)	Date du levé	Débit à Montjean (m ³ /s)	Date du levé	Débit à Montjean (m ³ /s)	Date du levé	Débit à Montjean (m ³ /s)	Date du levé	Débit à Montjean (m ³ /s)
09/03/10	1 300	22/03/11	714	02/01/12	1 300	07/02/2013	3400	22/01/2014	1420
06/04/10	1 570	27/04/11	285	03/01/12	1 500	19/03/2013	1530	05/02/2014	2530
26/04/10	568	08/06/11	170	04/01/12	1 860	17/04/2013	2310	17/02/2014	3580
07/07/10	412	11/07/11	103	09/01/12	2 475	23/04/2013	1170	18/02/2014	3490
01/12/10	840	29/09/11	147	17/01/12	1 219	07/05/2013	2130	15/04/2014	610
		13/12/11	400	30/04/12	1 730	05/06/2013	1546	28/04/2014	2690
		28/12/11	1 483	04/07/12	331	25/09/2013	320	23/09/2014	297
				21/08/12	145	14/11/2013	1620	26/09/2014	404
						27/11/2013	1440	20/10/2014	826
						04/12/2013	958	24/11/2014	1280
								26/11/2014	1020

Tableau 4 : Dates et débits correspondants aux levés DGPS

Il s'agit donc de la cinquième année de suivi par cette méthodologie.

L'année 2010 constitue la première année de relevés des lignes d'eau complète sur la zone d'étude, il n'y a pas eu de relevés Etat 0.

Sur les **cinq années consécutives de suivi**, seul un jeu de débits est similaire et peut être corrélé (1 500 m³/s, 1 483 m³/s, 1 500 m³/s, 1 546 m³/s, 1 530 m³/s et 1 420 m³/s pour respectivement 2010, 2011, 2012, 2013 et 2014, voir Tableau 4).

Pour les débits d'étiage, il est possible de corréliser les années 2011, 2012, 2013 et 2014 sur des valeurs proches de 300 m³/s. Faute de mesure, l'année 2010 n'est pas prise en compte.

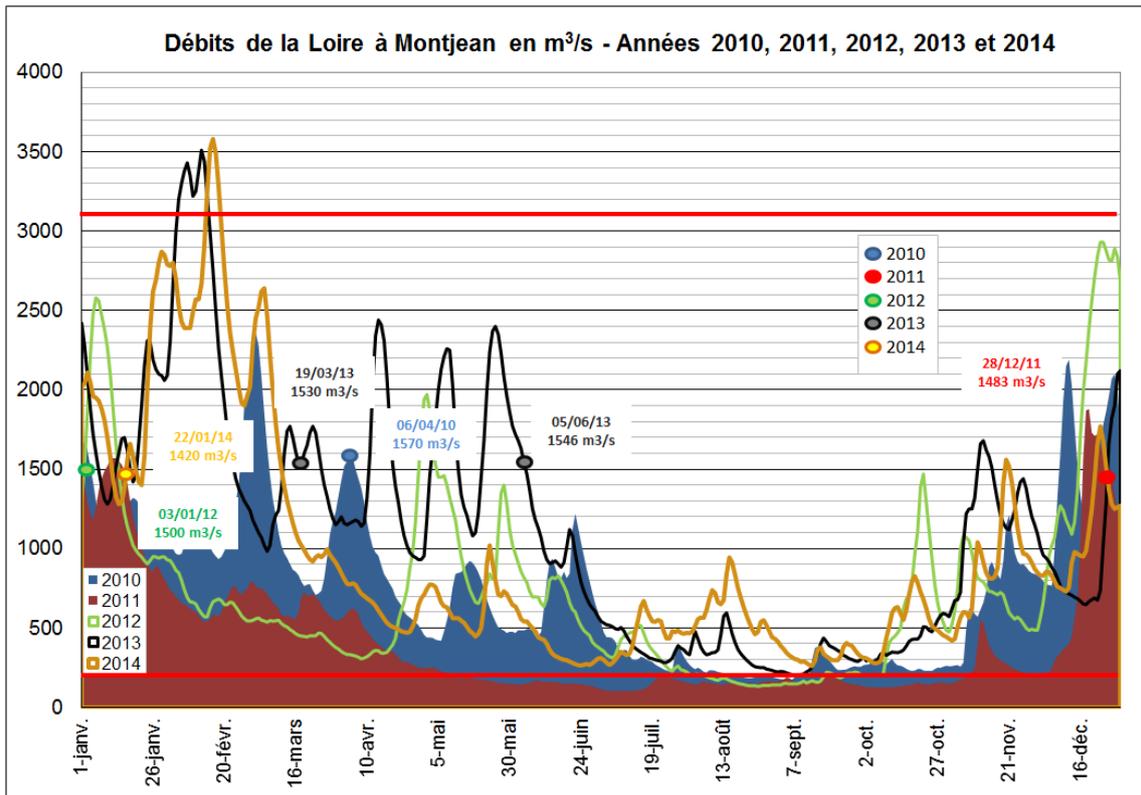


Figure 2 : Conditions hydrologiques des levés DGPS à 1500 m³/s

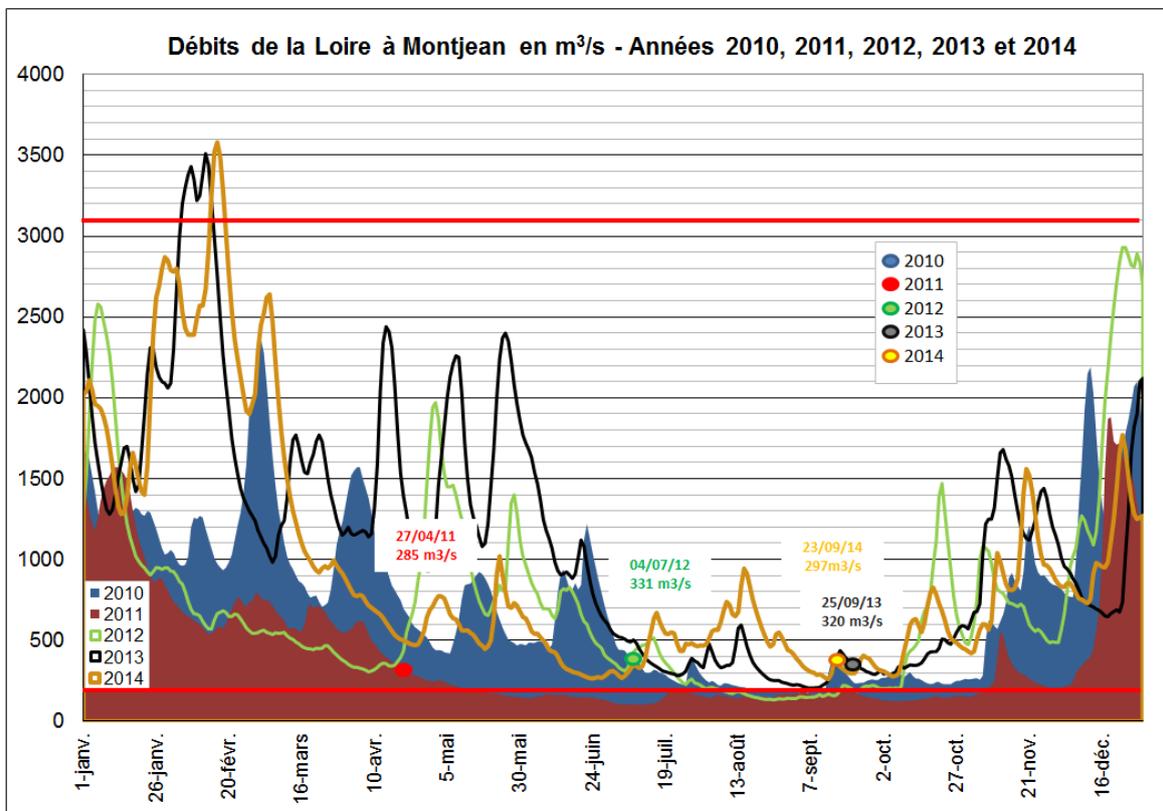


Figure 3 : Conditions hydrologiques des levés DGPS à 300 m³/s

2.1.2 Résultats et discussions

2.1.2.1 Suivi des stations limnimétriques

Pour chacune des stations étudiées, les graphiques sont présentés sur les pages 9 à 14. Les Figure 2 et Figure 5 représentent, pour l'ensemble des données relevées, le rapport débits/niveaux d'eau (en m NGF) pour l'année de référence 2009 et les années expérimentales 2010 (N+1), 2011 (N+2), 2012 (N+3), 2013 (N+4) et 2014 (N+5).

Les graphiques présentés en Figure 3, Figure 4 et Figure 6 constituent un détail sur les périodes d'étiage.

Rappel des conclusions des 4 premières années de suivi

Station de la Possonnière

Pour les années 2009 et 2010 la station montre une corrélation débit/hauteur assez régulière, avec une légère tendance au rehaussement de la ligne d'eau.

En 2011, la corrélation débit/hauteur évolue fortement en période d'étiage et une remontée de la ligne d'eau est observée pour des débits inférieurs à 300 m³/s. Ce phénomène de rehaussement est confirmé par les résultats de 2012.

Pour cette année 2013, le rehaussement de la ligne d'eau se confirme. Les résultats obtenus reflètent des valeurs proches des hauteurs enregistrées en 2011 et 2012, avec une ligne d'eau globalement supérieure à l'année de référence de 20 à 25 cm pour les débits proches de 300 m³/s.

Station de la Pointe

Sur l'année de référence 2009, la station de la Pointe montre une variabilité de la corrélation hauteur/débit assez importante. On observe ainsi jusqu'à 20/30 cm de variation sur l'année de référence 2009 pour un même débit. Les valeurs de niveaux d'eau au printemps sont inférieures aux valeurs de niveaux d'eau automnales.

L'analyse des variations de ligne d'eau liées au projet est donc délicate. Cependant, une tendance à l'élévation de la ligne d'eau en période d'étiage est observée sur 2010 et se confirme sur les années 2011 et 2012.

Pour 2013, la variabilité de la corrélation hauteur/débit, qui semblait s'estomper sur l'année 2012, n'apparaît pas sur les résultats de l'année 2013. Toutefois, cette variabilité est surtout marquée pour des débits inférieurs à 200 m³/s, seuil non franchi en 2013. Pour des débits voisins de 300 m³/s, la tendance à la hausse de la ligne d'eau se confirme avec des valeurs supérieures de 20 à 30 cm par rapport à l'année de référence 2009.

Résultats de l'année N+5

L'année 2014 montre des variabilités de débits très importantes, avec un débit d'étiage de 297 m³/s (23/09/2014) et un débit maximal enregistré de 3 580 m³/s (17/02/2014), correspondant au débit maximum enregistré durant ces 5 dernières années.

Pour rappel, l'objectif attendu de l'opération est un relèvement de la ligne d'eau d'étiage de +25 cm pour 300 m³/s et de +35 cm à l'étiage sévère de 150 m³/s.

Station de la Possonnière

Pour cette cinquième année de suivi, il semblerait que la ligne d'eau se stabilise au niveau des valeurs de 2013, confirmant ainsi la tendance au rehaussement de la ligne d'eau par rapport à l'état initial. La période d'étiage ayant été très courte et peu marquée, il est difficile d'établir un lien sur ces débits. En effet, le débit minimal relevé pendant l'année 2014 est de 260 m³/s et seuls 30 jours ont enregistré un débit inférieur à 300 m³/s.

De façon globale, la ligne d'eau reste supérieure à l'année de référence de 20 à 25 cm pour des débits proches de 300 m³/s. Le manque de données à des débits très bas ne permet pas d'estimer le rehaussement de ligne d'eau en condition d'étiage sévère (150 m³/s).

Station de la Pointe

Il est encore une fois difficile d'interpréter les résultats pour des débits inférieurs à 250 m³/s faute de données pour cette dernière année de suivi. La tendance au rehaussement de la ligne d'eau semble s'estomper pour l'année 2014, notamment pour les bas débits, sauf pour les débits aux alentours de 270 m³/s qui montrent un rehaussement de 20 à 25 cm.

Pour information, cette station de suivi a été modernisée en 2011. L'outil de mesure a été modifié. Auparavant, des dérives étaient régulièrement observées, la station nécessitait un recalage régulier. Cette modification peut biaiser la comparaison au cours des années.

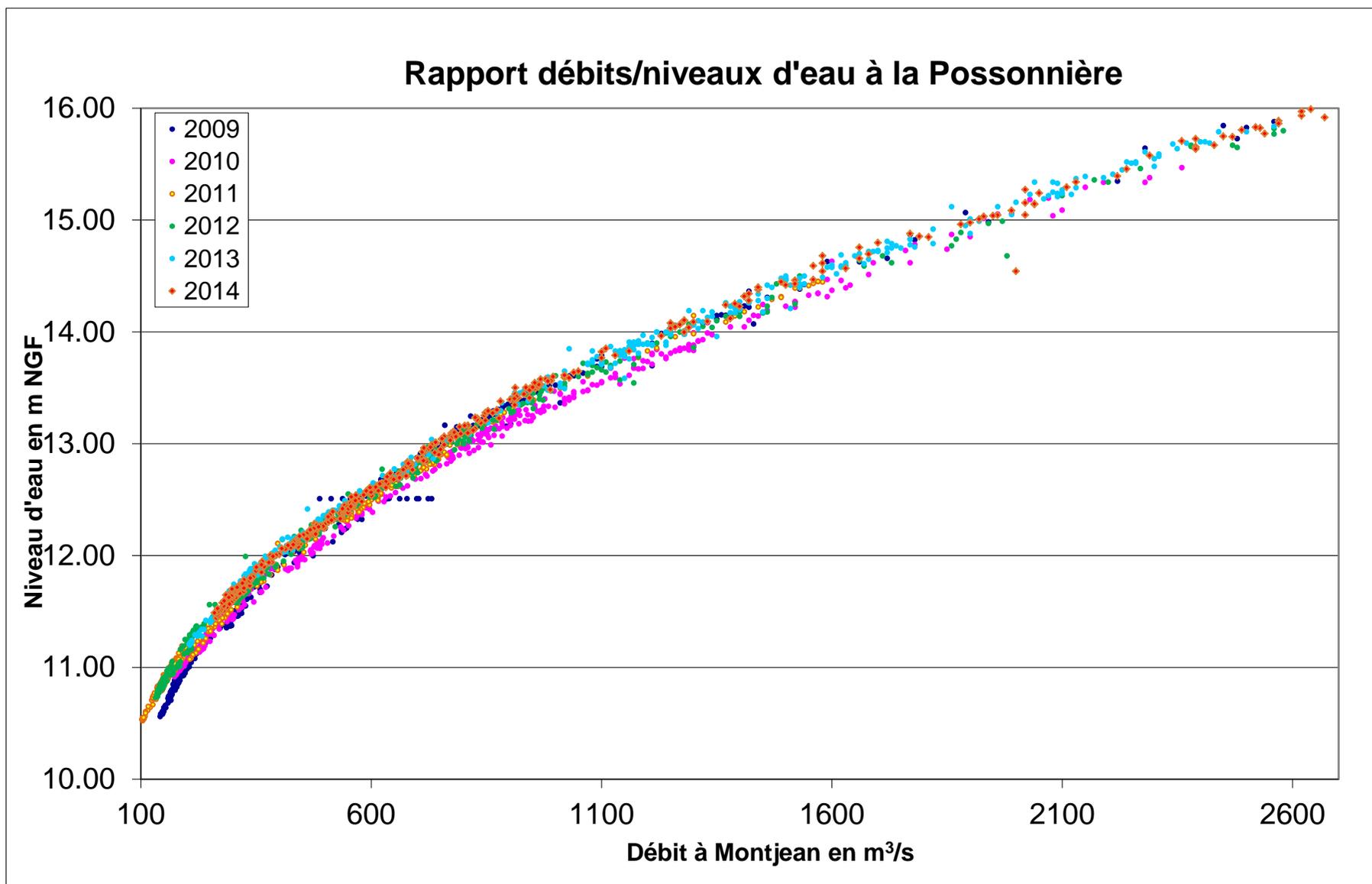


Figure 4 : Suivi de la station limnimétrique de la Possonnière – Ensemble des données relevées

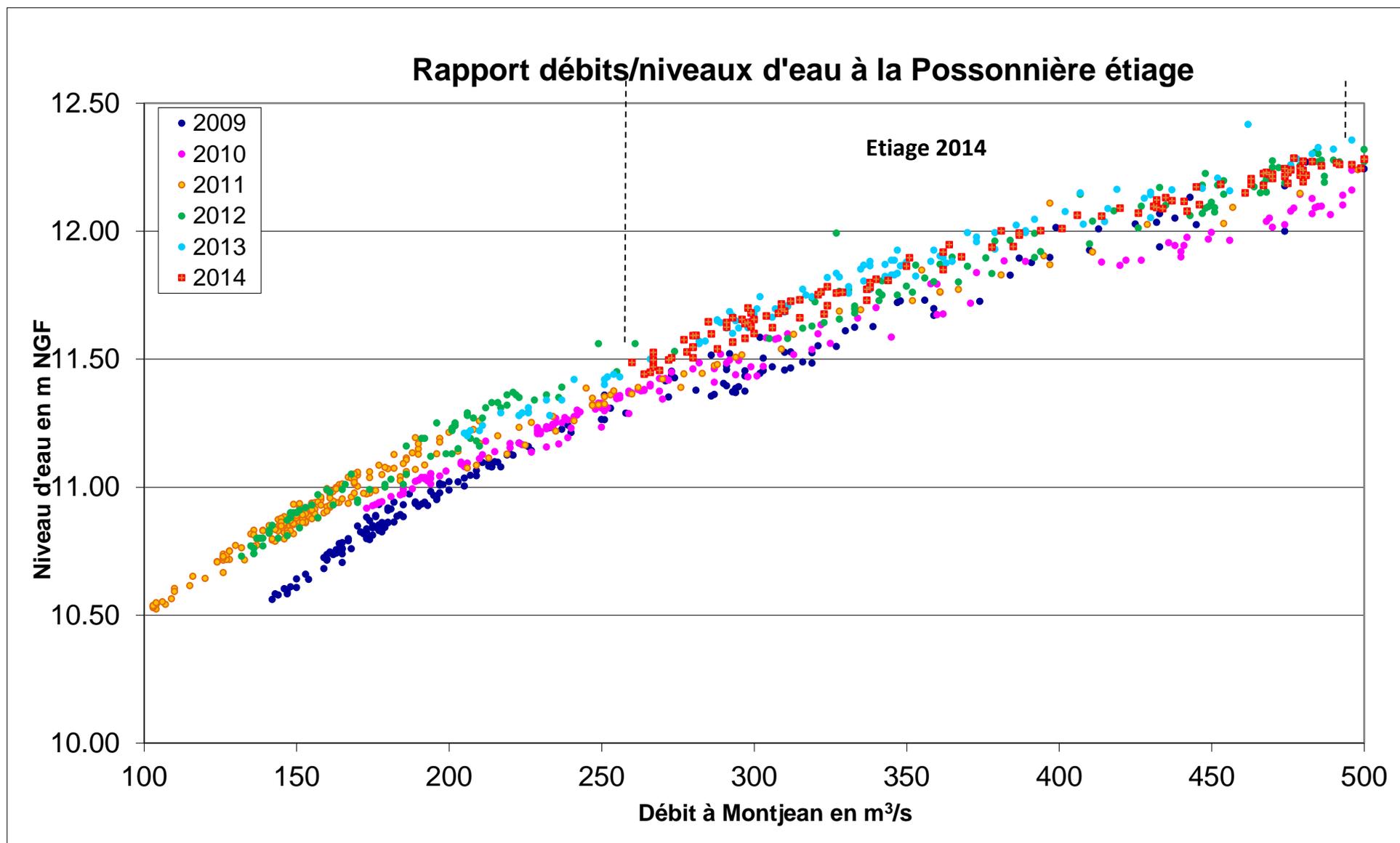


Figure 5 : Suivi de la station limnimétrique de la Possonnière – Données relevées en étiage

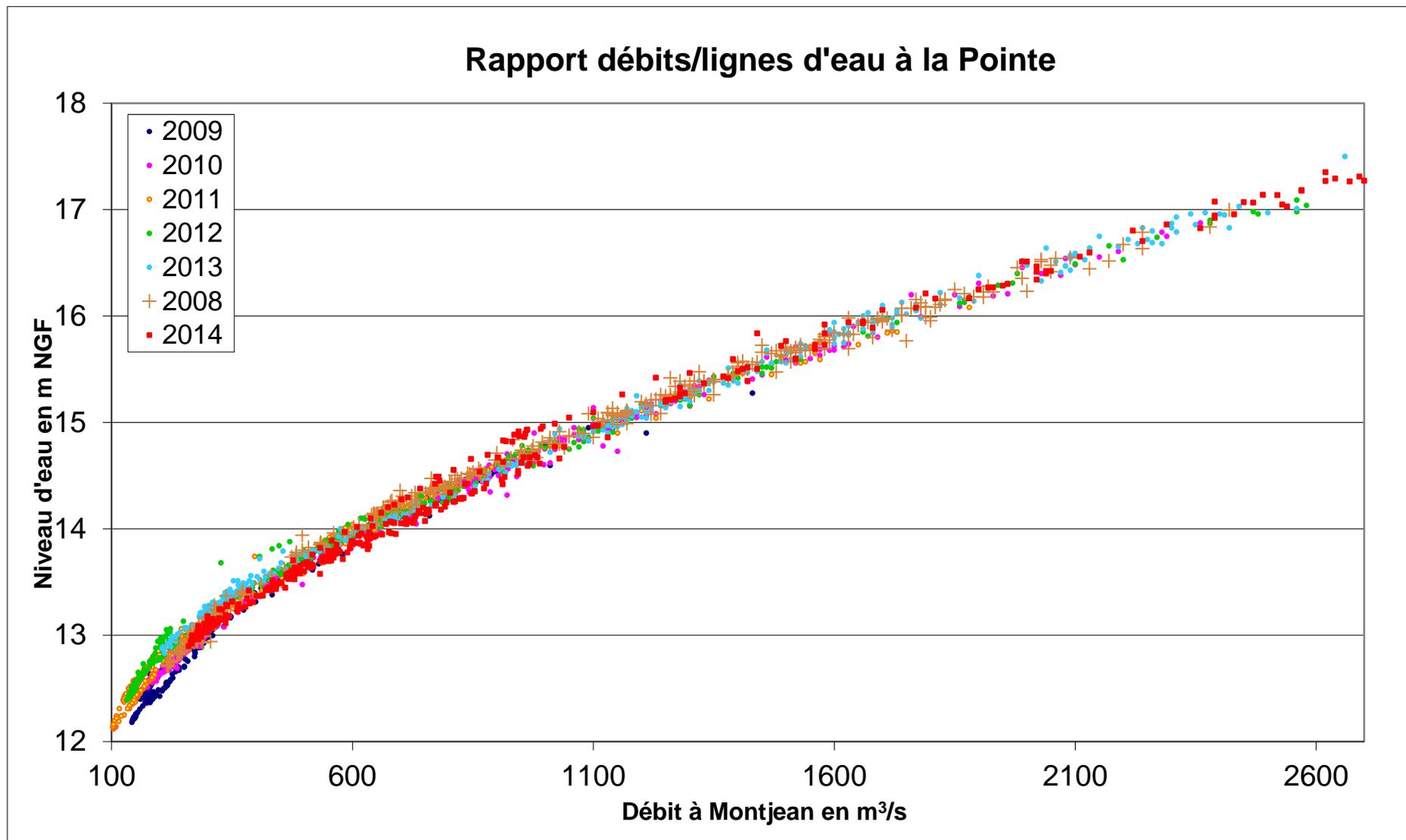


Figure 6 : Suivi de la station limnimétrique de la Pointe –Ensemble des données relevées

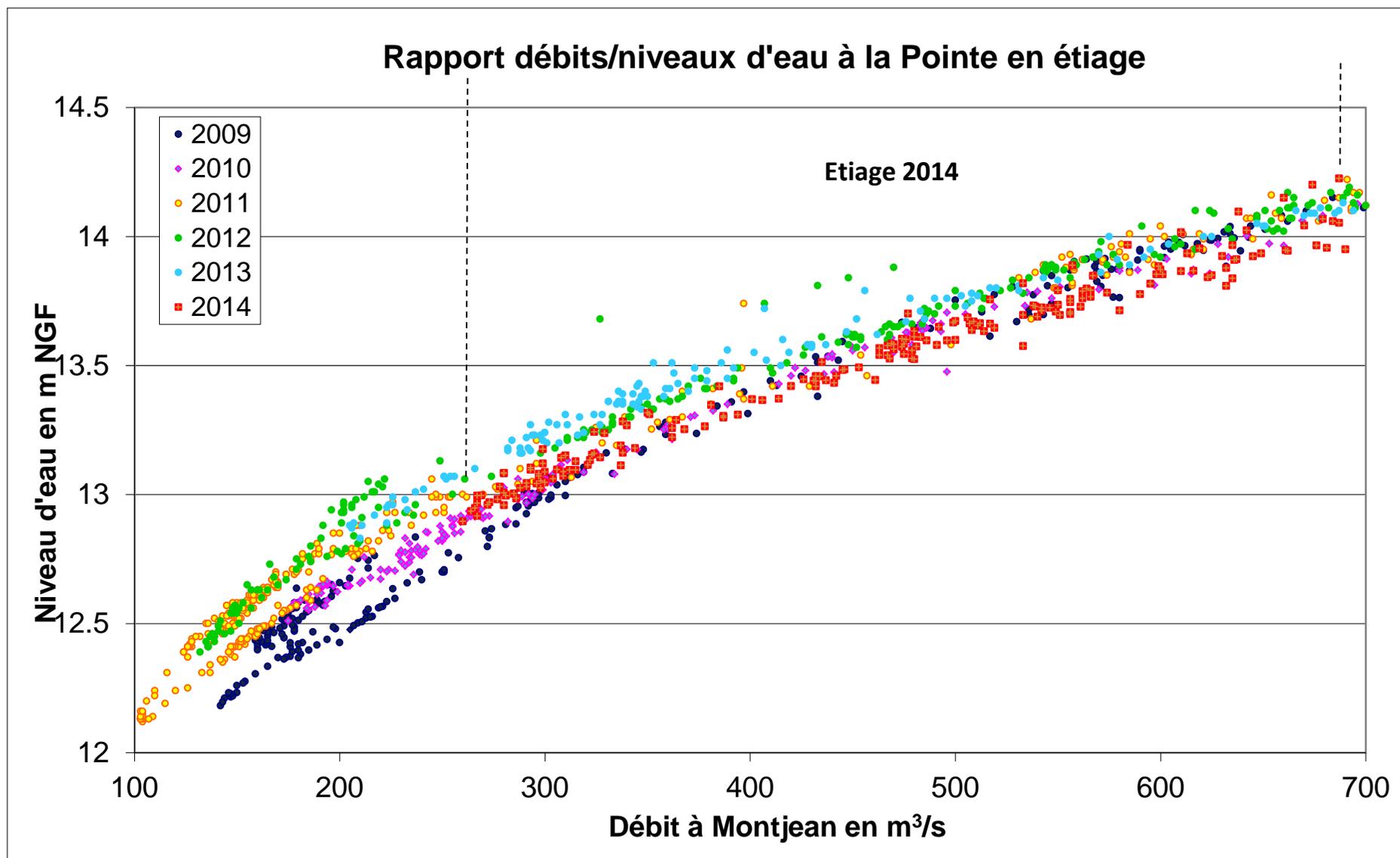


Figure 7 : Suivi de la station limnimétrique de la Pointe – Données relevées en étiage

2.1.2.2 Suivi des levés des lignes d'eau au DGPS

Rappel des conclusions des 4 premières années de suivi

Pour rappel, les effets attendus du projet sont une rehausse de 25 à 35 cm de la ligne d'eau en étiage. Le projet est censé avoir un effet nul à partir de la médiane (575 m³/s).

Les seules mesures de hauteurs d'eau comparables sur les 5 années consécutives (pas d'année 0 pour ce thème) correspondent à un débit aux alentours de 1 500 m³/s.

L'étude des hauteurs d'eau pour un débit voisin de 1 500 m³/s sur les trois premières années de suivi a montré une stabilité entre 2010 et 2011, et un résultat surprenant sur 2012 : une ligne d'eau sensiblement supérieure aux deux premières années. Les résultats se sont confirmés pour l'année 2013, avec un phénomène de rehausse hivernale surprenant, non cohérent avec les effets attendus du projet et contredisant les observations faites aux stations limnimétriques montrant l'absence d'incidence au-dessus de 700 m³/s. Cette incohérence a pu être expliquée par le manque de précision des données, de l'ordre de la rehausse (10 à 15 cm).

En comparant les hauteurs d'eau pour des débits voisins de 300 m³/s sur les années 2011, 2012 et 2013, il apparaissait une rehausse significative de 35 cm de la ligne d'eau, notamment sur la partie aval, et ce dans des conditions hydrologiques assez proches.

Résultats de l'année N+5

Débit de 300 m³/s

La figure 8 représente les hauteurs des lignes d'eau pour des débits voisins de 300 m³/s sur les années 2011, 2012, 2013 et 2014.

La ligne d'eau de 2014 demeure légèrement inférieure à celle relevée en 2013, différence qui peut s'expliquer du fait d'un débit légèrement moins élevé (297 m³/s au lieu de 320 m³/s). Mais d'une façon globale, elle reste largement plus élevée que la ligne d'eau de 2010, notamment entre les deux stations de la Possonnière et de la Pointe où la rehausse atteint 35 à 40 cm. Elle s'estompe en aval de la section de mesure pour se stabiliser entre 25 et 30 cm.

Il faut noter que les années 2012, 2013 et 2014 ont été suivies dans des conditions hydrologiques assez similaires, permettant de confirmer la tendance au rehaussement de la ligne d'eau (15 à 35 cm) durant ces trois années.

Débit de 1 500 m³/s

Il a été impossible d'exploiter les données de cette dernière année de suivi à un débit de 1 420 m³/s. Des différences significatives ont été observées avec les années précédentes. La hauteur d'eau maximale relevée était de 15,35 m en amont alors que celle de 2013 était de 15,80 m en amont. La pente relevée est également nettement inférieure.

Ces différences significatives peuvent s'expliquer par un problème de GPS. La précision du GPS en z utilisé est de 3 à 8 cm, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que la potentielle rehausse de la ligne d'eau. Des erreurs sur les coordonnées géographiques peuvent également avoir eu lieu. Il est donc impossible de conclure sur l'effet réel des travaux sur la ligne d'eau pour cette année 2014 à un débit de 1 500 m³/s.

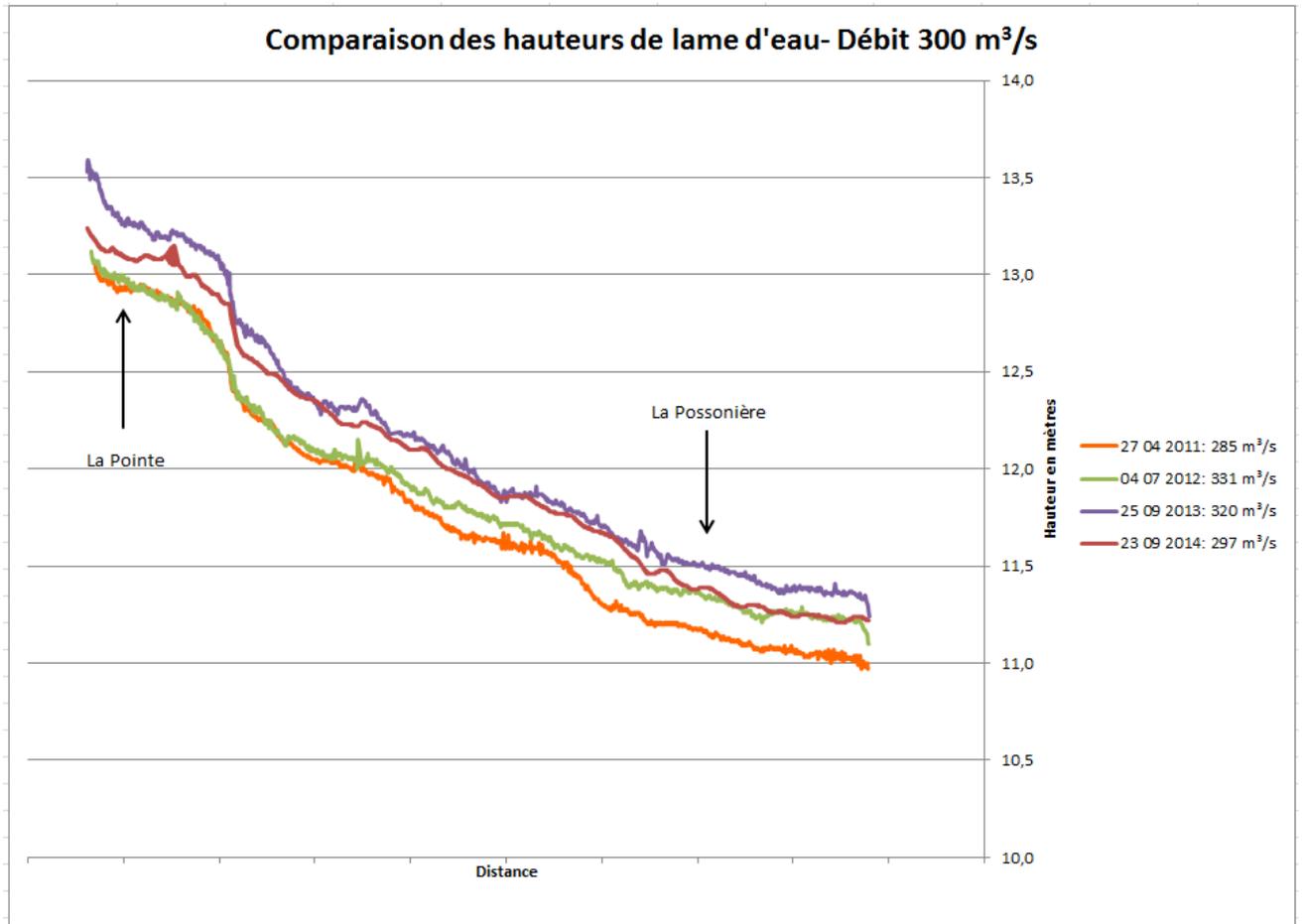


Figure 8 : Lignes d'eau sur le bras principal de la Loire pour un débit voisin de 300 m³/s

Conclusion générale

Le retour d'expérience est maintenant de 5 années de suivi, une légère évolution est constatée entre chacune des années de suivi, avec un rehaussement moyen d'une vingtaine de centimètres en étiage.

Les dernières années de suivi ont été marquées de deux crues morphogènes, en 2013 et 2014.

Cette cinquième et dernière année de suivi confirme la tendance à la rehausse de la ligne d'eau pour des débits inférieurs à 300 m³/s.
 Les différents suivis indiquent des rehaussements allant de 20 à 30 cm.
 Il est cependant nécessaire de considérer avec prudence ces valeurs puisque les mesures observées par les différents outils (stations et relevés lasers) montrent des précisions de 10 à 15 cm pour une même valeur.

Points d'amélioration pour le suivi expérimental

Les débits de suivi de 300 m³/s et 1 500 m³/s doivent impérativement être respectés afin de pouvoir comparer les données en fonction des années.

2.2 Thème 2 : Remobilisation des sédiments

2.2.1 Méthodologie

2.2.1.1 Suivi bathymétrique – zone d'étude globale

Modalités de mise en place :
Profils transversaux à pas de 50m.

Périodicité des interventions :
Après travaux puis 3 fois par an (1500 m³/s, 3000 m³/s et étiage).

2.2.1.2 Suivi topographique – zone d'étude globale

Modalités de mise en place :
Survol LIDAR ou DGPS avec 1 point tous les 5 m + 1 profil de berge sur chaque secteur.

Périodicités des interventions :
Tous les deux ans à l'étiage.

2.2.1.3 Suivi bathymétrique – zone d'étude locale

Modalités de mise en place :
Bathymétrie avec sondeur mono-faisceau et DGPS de précision centimétrique sur les secteurs 3, 7 et 8 réalisation de 20 profils incluant les zones inter-épis et le chenal principal jusqu'à la berge opposée. 3 profils longitudinaux.

Périodicité des interventions :
Annuelle avec 5 campagnes par crue : submersion épis (entre 1 000 et 1 500 m³/s), 2 000m³/s, après pic de crue, de nouveaux 2 000 m³/s puis avant retrait des eaux. Périodicité à adapter selon le pic de crue. 5 campagnes pour un pic excédant 3 000 m³/s, 4 pour un pic entre 2 000 et 3 000 m³/s et 3 campagnes pour un pic inférieur.

2.2.1.4 Granulométrie des sédiments – zone d'étude globale

Objectif :
Caractériser la charge de fond des chenaux et des stocks entre les épis, comparer la granulométrie des sédiments stockés dans le fond du chenal et ceux stockés entre les épis, estimer les conditions de mise en mouvement des matériaux (force tractrice).

Modalités de mise en place :

37 prélèvements sur la Loire répartis sur les sections transversales ayant déjà été levées en 1998 et 2 sur le Louet, partie aval. Pour les zones inondées prélèvements au cône berthois ou à la benne et pour les zones exondées, échantillonnage double de la surface et de la sous couche.

Périodicité des interventions :

Annuelle.

2.2.1.5 Granulométrie des sédiments – zone d'étude locale

Objectif :

Caractériser la charge de fond des chenaux et des stocks entre les épis, comparer la granulométrie des sédiments stockés dans le fond du chenal et ceux stockés entre les épis, estimer les conditions de mise en mouvement des matériaux (force tractrice).

Modalités de mise en place :

Prélèvements de surface au droit des chaînes d'érosion – doublés en cas de présence d'une armure (appréciation de la présence ou non sur le terrain).

Périodicité des interventions :

Annuelle.

2.2.1.6 Suivi des processus érosions/dépôts

Objectif :

Compréhension des processus d'érosion/dépôt.

Modalités de mise en place : mise en place de 100 chaînes d'érosion – soin particulier à apporter au géoréférencement de chaque chaîne. Relevés des chaînes à effectuer par un godet plat.

Périodicité des interventions :

Fréquence annuelle.

Secteur géographique :

Zone d'étude locale.

2.2.2 Résultats et discussion

Source : Université de Tours : T. Handfus, P. Jugé, S. Rodrigues
Opération de remodelage des épis du site de Chalonnes/Loire : Actualisation du suivi relatif à la dynamique hydrosédimentaire – Campagne N°5, Octobre 2013 à septembre 2014

Les données suivantes sont issues des rapports de l'Université de Tours (département Géosciences-environnement) relatifs au suivi de la dynamique hydrosédimentaire.

2.2.2.1 Rappel des conclusions des 4 premières années de suivi

A l'issue des suivis précédents (rapports 1, 2, 3 et 4), nous avons noté :

- Une érosion générale des grèves entre 2009 et 2010 ;
- Une évolution plus modérée entre 2010 et 2011 ;
- Une stabilité topographique couplée à un brassage sédimentaire entre 2011 et 2012 ;
- Des sédiments mobiles même pour de faibles débits dans le chenal, à l'origine d'une épaisseur active augmentée notamment en 2013 (de 30 cm à 65 cm) ;
- Des nombreux épisodes de crues ont permis une forte remobilisation des sédiments et un profond remaniement des grèves qui ont été redessinées, avec une tendance au déplacement sédimentaire vers l'aval.

2.2.2.2 Résultats de l'année N+5

Organisation des campagnes de mesure

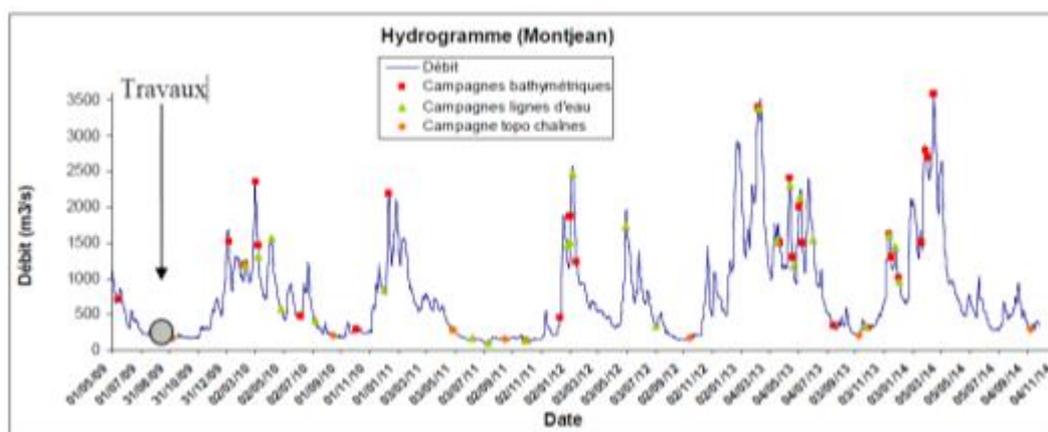


Figure 9 : Hydrogramme à Montjean/Loire de la Loire entre 2009 et 2014 et distribution temporelle des campagnes de mesures

Les données exploitées par l'université de Tours sont les suivantes :

- La campagne annuelle des chaînes d'érosion (topographique et granulométrique) ;
- Un relevé ADCP (en attente)
- 10 campagnes bathymétriques monofaisceau :
 - 2 octobre 2013 à 300 m³/s sur tout le tronçon hors bras de la Guillemette ;

- 14 novembre 2013 à 1620 m³/s sur l'ensemble du secteur hors bras de la Guillemette ;
- 15 novembre 2013 à 1580 m³/s sur les profils des grèves 2, 3, 8 et 9 ;
- 18 novembre 2013 à 1300 m³/s sur les profils des grèves 3, 7 et 8 ;
- 3 décembre 2013 à 1010 m³/s au droit des grèves 3, 7 et 8 ;
- 21 janvier 2014 à 1490 m³/s au droit des grèves 3, 7 et 8 ;
- 29 janvier 2014 à 2800 m³/s au droit des grèves 3, 7 et 8 ;
- 04 février 2014 à 2700 m³/s au droit des grèves 3, 7 et 8 ;
- 17 février 2014 à 3580 m³/s sur tout le tronçon hors bras de la Guillemette ;
- 21 octobre 2014 à 784 m³/s sur tout le tronçon hors bras de la Guillemette ;

En complément du LIDAR 2013, les bathymétries du 15 et 18 novembre 2013 ont été réalisées sur les profils en travers des secteurs 2, 3, 7, 8 et 9 afin de couvrir au maximum les grèves.

Les différents secteurs précisés se répartissent comme illustré sur la figure suivante :

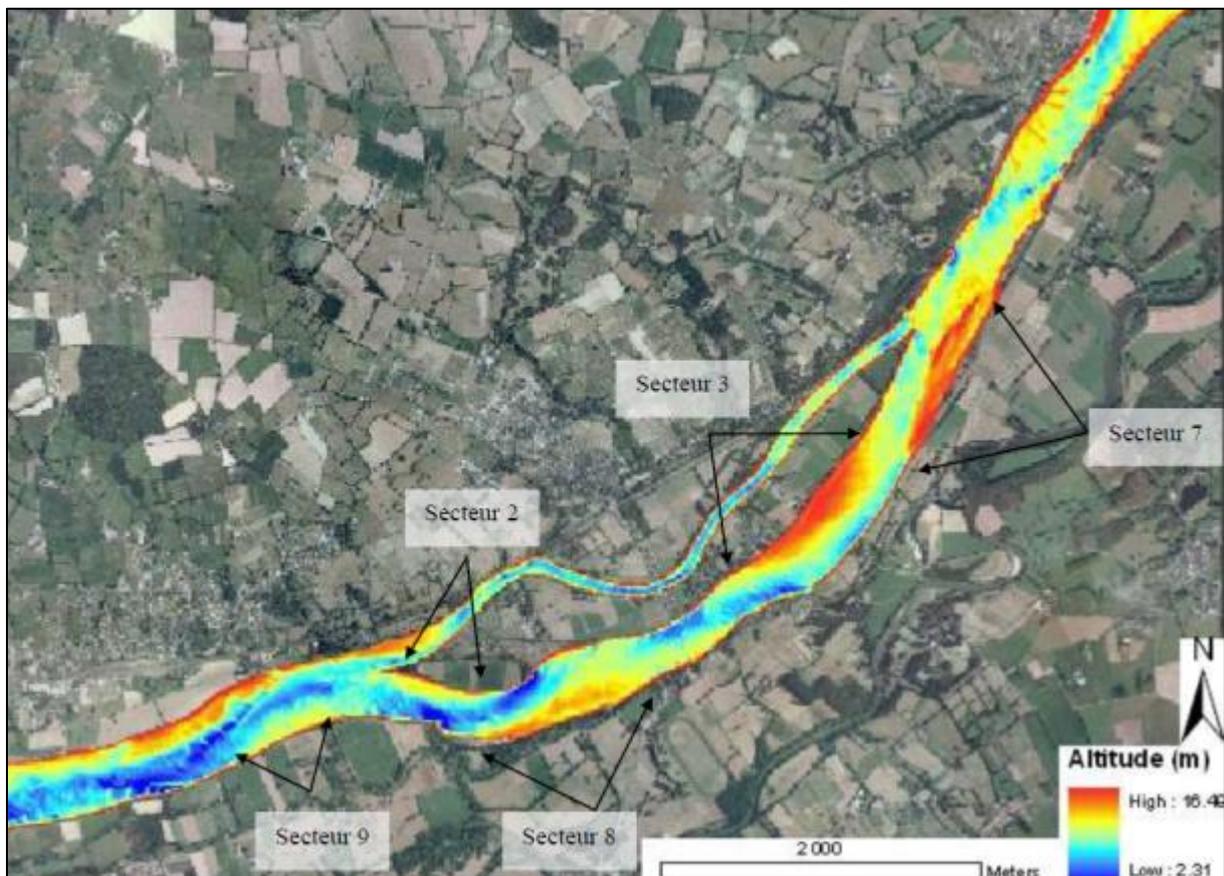


Figure 10 : Emplacement des secteurs étudiés

Evolution morphologique du chenal

Les études réalisées par l'université de Tours détaillent deux périodes distinctes :

- Les effets des crues morphogènes avec la comparaison des bathymétries du 6 février 2013 (3 300 m³/s) et du 17 février 2014 (3 580 m³/s) ;

- L'évolution de la morphologie du chenal entre le pic de crue de 17/02/2014 à 3580 m³/s et l'état final du lit pour le suivi avec la comparaison des bathymétries réalisées les 17 février 2014 et 21 octobre 2014.

2.2.2.2.1.1 Etude des effets des crues morphogènes entre 2013 et 2014

La bathymétrie du 6 février 2013 correspond à un débit enregistré à Montjean de 3 300 m³/s. Celle du 17 février 2014 correspond à un débit de 3 580 m³/s. Ces débits correspondent à des crues morphogènes.

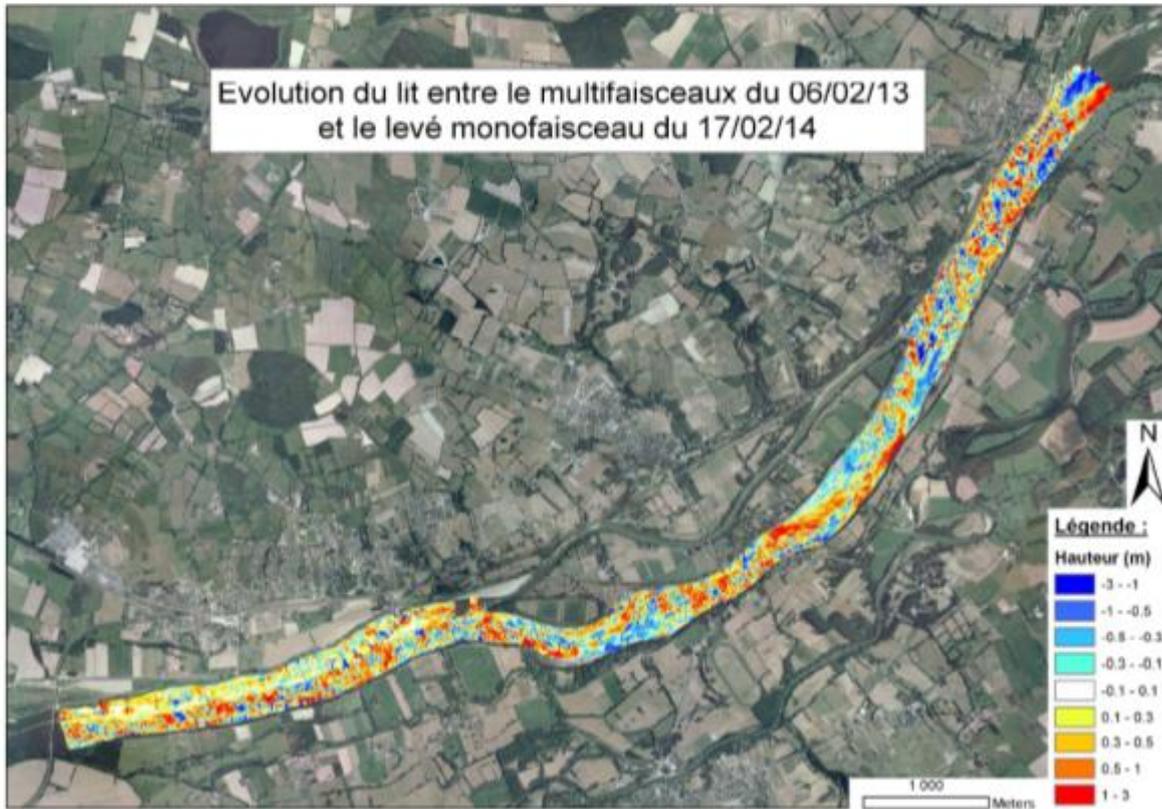


Figure 11 : Evolution des hauteurs du lit entre 2013 et 2014

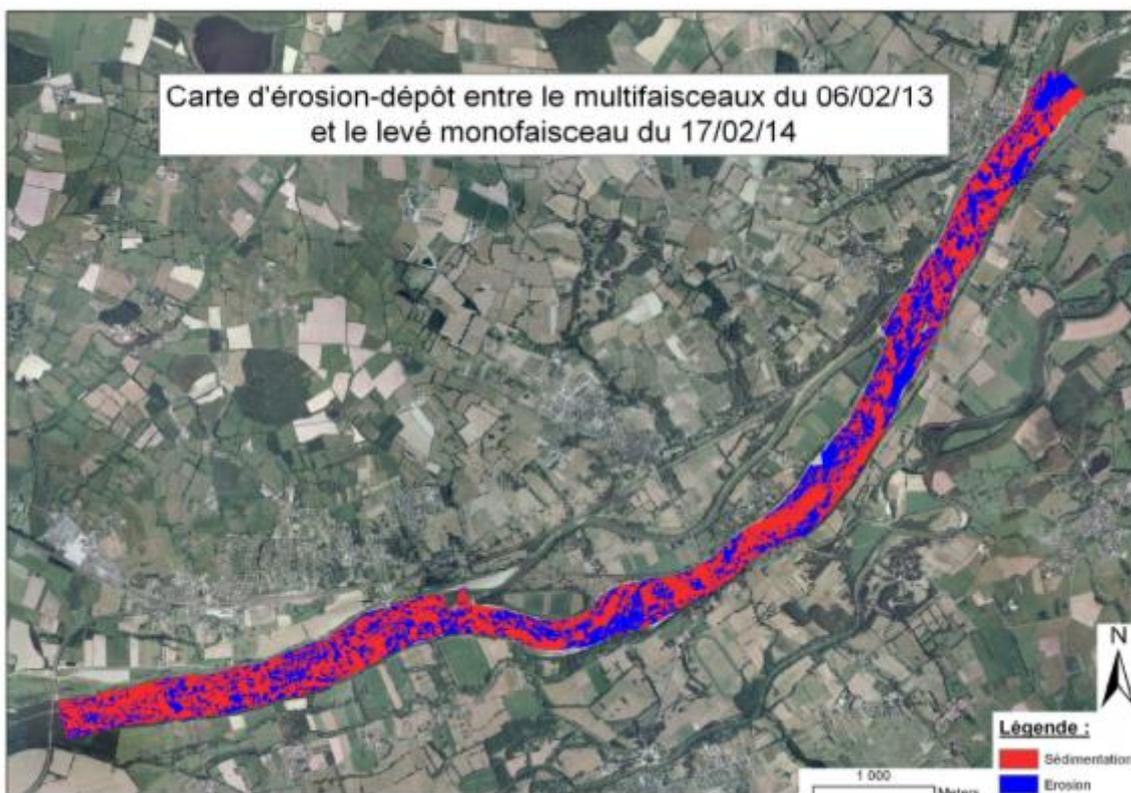


Figure 12 : Dynamique de dépôt et d'érosion du lit entre 2013 et 2014

Des variations de fond très hétérogènes sont observées, pouvant s'expliquer par la comparaison d'un levé monofaisceau en 2014 à un levé multifaisceau en 2013.

Les amplitudes d'évolution du fond sont très marquées sur la partie amont, avec des variations pouvant atteindre 3 m en valeur absolue. En aval, on remarque que les grèves sont soumises à l'érosion, alors que les dépôts sont localisés au niveau du chenal d'étiage.

Les cubatures de sédiments calculées à partir des grilles numériques figurent dans le tableau suivant.

06/02/13 - 17/02/14	Volume (m ³)	Surface (m ²)	Hauteur moyenne (m)
Dépôt	998975	2052554	0.49
Erosion	-528915	1328564	-0.40
Balance	470060	3381118	0.14

Tableau 5 : Quantification érosion/sédimentation du lit entre 2013 et 2014

La comparaison des volumes d'érosion et de dépôt montre une balance sédimentaire largement positive, avec des volumes de sédiments déposés représentant près du double des volumes érodés pour une surface 60 % plus étendue. Il en résulte une augmentation de la hauteur de sédiments. De façon globale, le chenal d'étiage s'est enrichi en sédiments alors que les grèves ont été érodées.

Cela montre que les crues morphogènes ont permis de remobiliser les sédiments immobilisés jusque-là sur les grèves. Cette remobilisation a favorisé les dépôts dans le lit d'étiage qui a vu sa hauteur augmenter.

2.2.2.1.2 Etude comparative février 2014 et octobre 2014

La bathymétrie du 17 février 2014 correspond à un débit de 3 580 m³/s, correspondant à une crue morphogène. La bathymétrie du 21 octobre 2014 correspond à un débit de 784 m³/s. Ces relevés étant les seuls depuis février 2014, ils représentent l'état final du lit dans le cadre de ce suivi. Il faut cependant noter que ce dernier relevé ne couvre pas totalement les grèves.

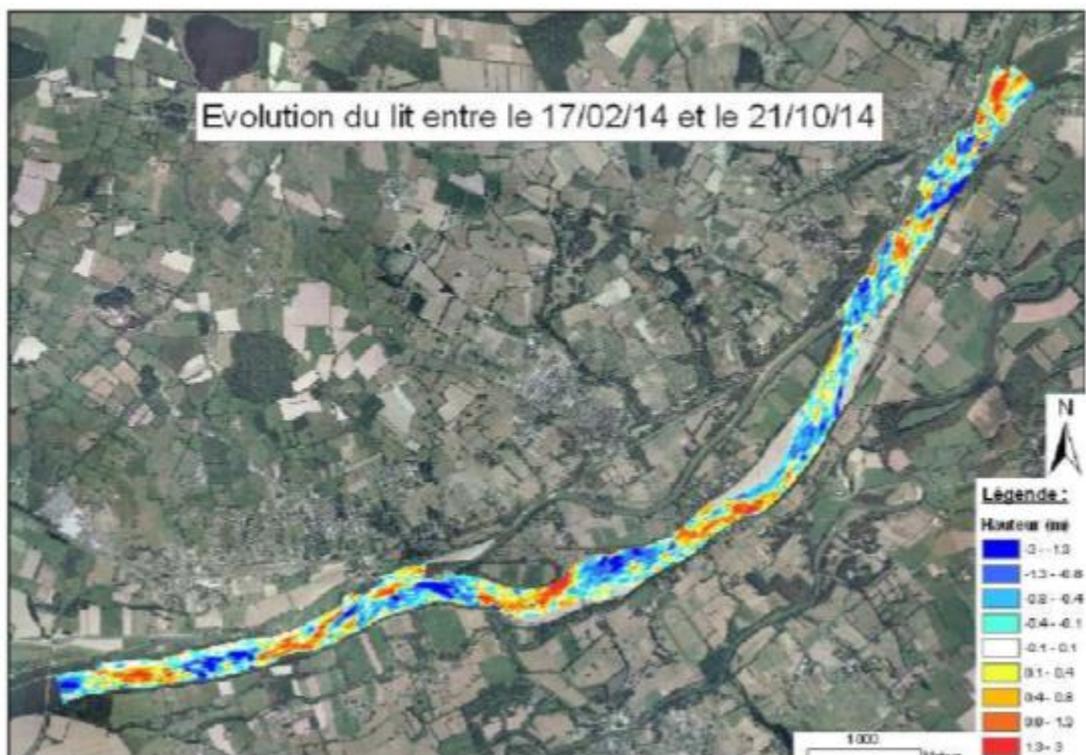


Figure 13 : Evolution des hauteurs du lit entre février 2014 et octobre 2014

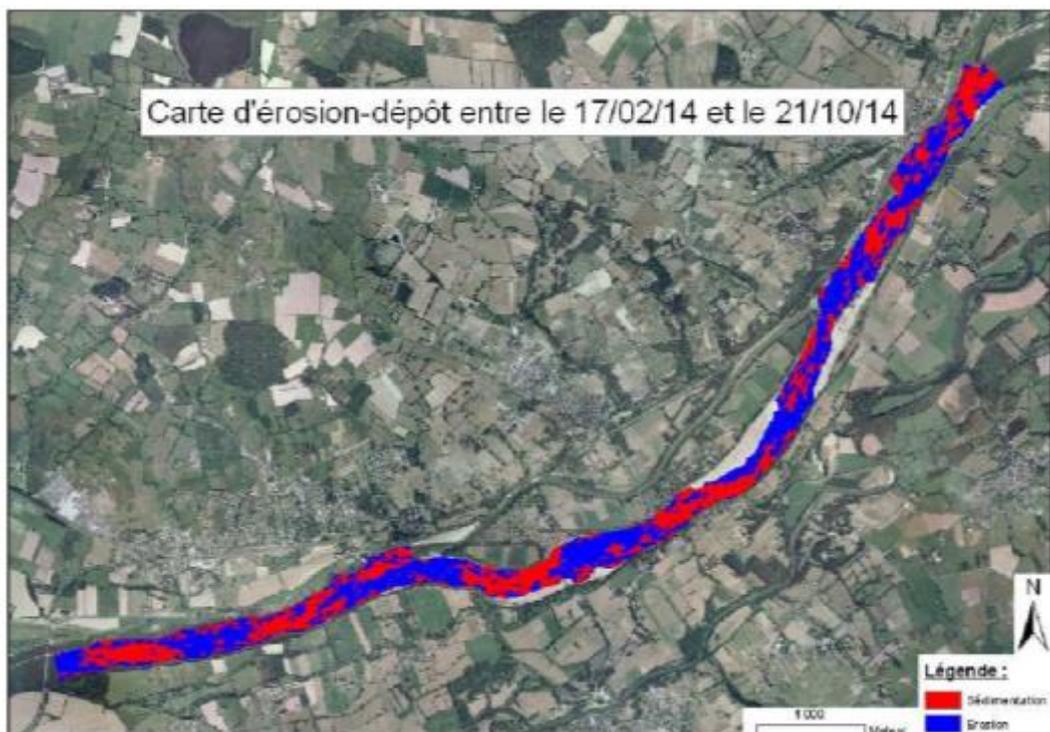


Figure 14 : Dynamique de dépôt et d'érosion entre février 2014 et octobre 2014

Des zones d'érosion et de dépôts distinctes sont bien visibles. Cette alternance des processus d'érosion/dépôt renvoie encore une fois à la migration de grands corps sédimentaires (barres). On pourra cependant noter une nette prédominance de processus d'érosion au droit des grèves étudiées, correspondant au lit d'étiage.

Les cubatures de sédiments calculées à partir des grilles numériques figurent dans le tableau suivant.

17/02/14 - 21/10/14	Volume (m ³)	Surface (m ²)	Hauteur moyenne (m)
Dépôt	592059	1106574	0.54
Erosion	-862771	1482314	-0.58
Balance	-270713	2588888	-0.10

Tableau 6 : Bilan sédimentaire du lit entre février 2014 et octobre 2014

Le bilan sédimentaire déficitaire montre une érosion du lit, synonyme d'une évacuation des sédiments durant cette courte période.

Ces observations permettent de voir qu'en absence de crue morphogène, la tendance reste à l'érosion du chenal d'étiage. Les sédiments des grèves ne sont que peu remobilisés, bien qu'il soit difficile de conclure en absence de couverture de ces derniers pour les relevés du 21/10/14.

Evolution de l'incision du bras principal

Le relevé des données de hauteur maximum et de hauteur moyenne dans le bras principal de 2009 à 2014 permettent d'apprécier son degré d'incision.

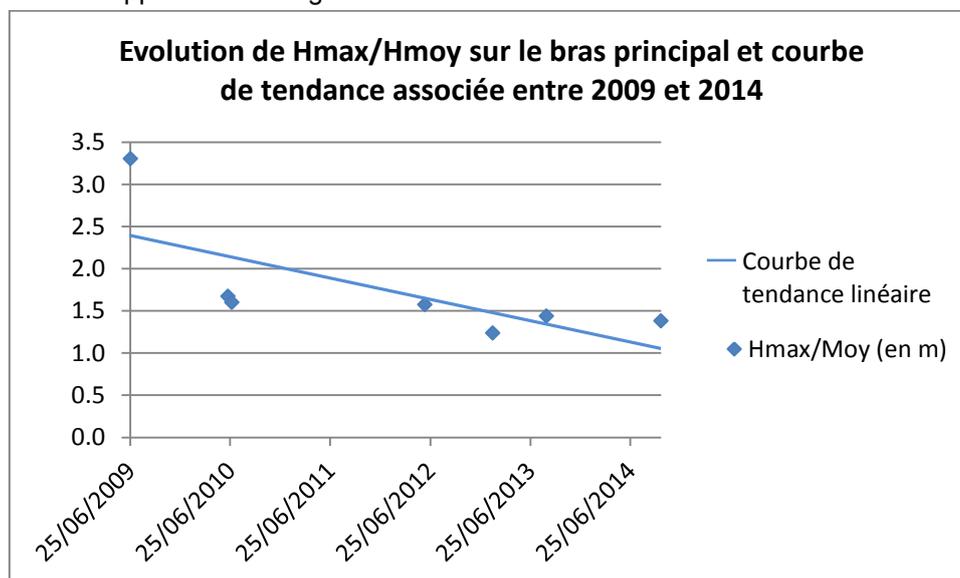


Figure 15 : évolution de Hmax/Hmoy sur le bras principal entre 2009 et 2014

Ce graphique sur cinq ans permet d'observer une nette diminution de l'incision du lit principal du fait des remaniements sédimentaires. Nous pouvons notamment observer que la valeur d'incision la plus faible correspond à la crue morphogène de février 2013 qui a permis une forte remobilisation des sédiments des grèves au profit du chenal d'écoulement.

Evolution morphologique des grèves

Comme en 2011 et 2012, il n'y a pas eu de relevé LIDAR en 2014. L'évolution est donc observée sur des profils en travers et en long des différents secteurs.

Secteur 7 :

Le secteur 7 a fait l'objet d'un arasement de casier dans la direction longitudinale.



Figure 16 : Profil en long secteur 7 (les barres verticales représentent les épis)

Ce profil en long est localisé en milieu de grève. D'importants dépôts sédimentaires ont eu lieu sur la partie amont du profil, alors que des forts remaniements sédimentaires par des phénomènes d'érosion ont eu lieu sur la partie aval.

Secteur 3 :

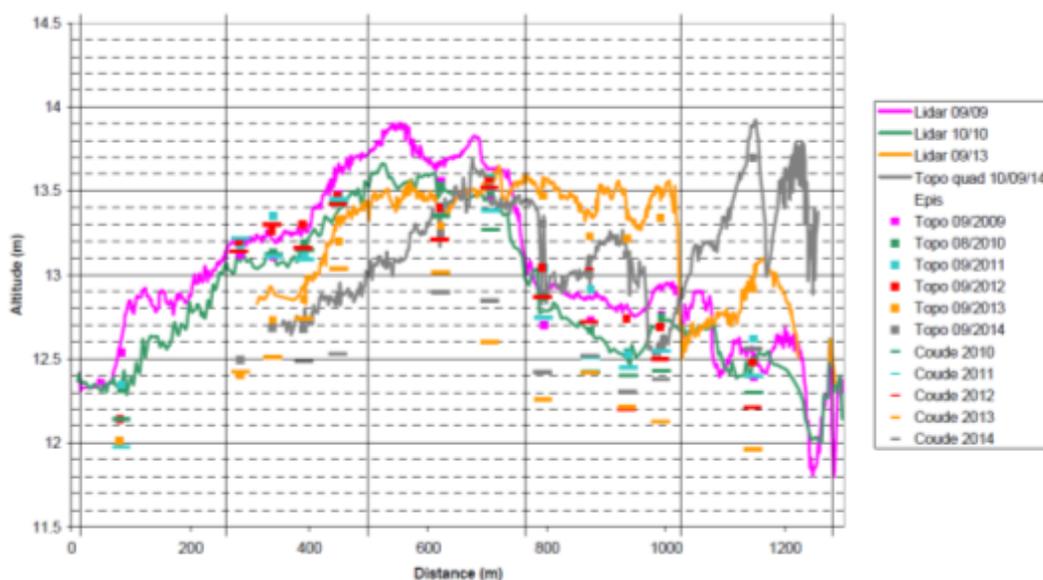


Figure 17 : Profil en long secteur 3 (les barres verticales représentent les épis)

Ce profil est localisé en milieu de grève. Entre 2013 et 2014, la partie amont de la grève s'est fortement érodée, atteignant jusqu'à 1 m entre 800 et 1000 m. La partie aval a quant à elle fait l'objet d'importants dépôts constituant le front de migration.

Secteur 8 :

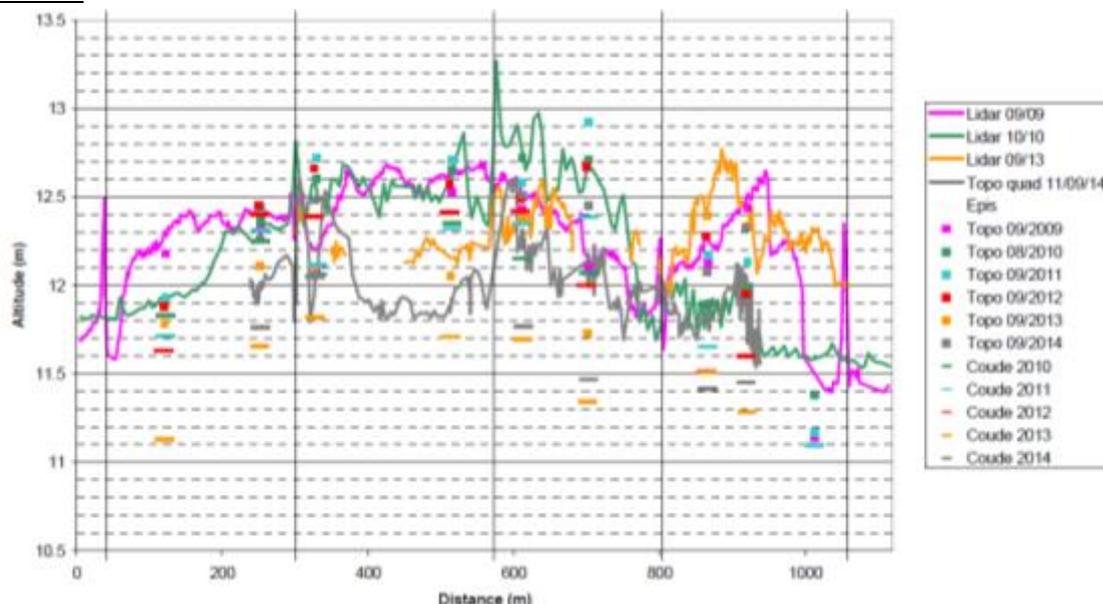


Figure 18 : Profil en long secteur 8 (les barres verticales représentent les épis)

Ce profil en long est situé en milieu de grève. Les profils montrent globalement que la grève s'est abaissée depuis 2013 du fait de l'érosion, avec une faible sédimentation en amont et une érosion sur la partie aval de la grève.

Les secteurs 2 et 9 :

En raison des conditions hydrologiques, il n'y a pas eu de résultats pour 2013. L'absence de chaîne dans ce secteur rend difficile l'exploitation des résultats. Une légère sédimentation a cependant été observée sur les deux secteurs.

Suivi des processus érosion/dépôt

Le tableau présenté ci-après est un récapitulatif des érosions maximales enregistrées sur les différentes années de suivi.

Sur l'ensemble des secteurs suivis, les moyennes des épaisseurs actives ont légèrement diminué par rapport à l'année précédente (2013), mais elles restent largement supérieures aux valeurs de 2010, 2011 et 2012.

D'une façon générale, il ressort des relevés de cette année que les remaniements sédimentaires les plus importants sont survenus sur la partie aval des grèves, semblant indiquer une érosion progressive et une augmentation de la mobilité sédimentaire vers l'aval de ces dernières.

Moyenne	2010	2011	2012	2013	2014
Total	0,27 (75)	0,25 (81)	0,31 (88)	0,67 (61)	0,59 (56)
Secteur 7	0,32 (21)	0,24 (24)	0,41 (17)	0,57 (16)	0,55 (13)
Secteur 3	0,20 (26)	0,17 (25)	0,21 (29)	0,56 (18)	0,66 (15)
Secteur 8	0,27 (20)	0,30 (22)	0,31 (31)	0,82 (23)	0,57 (23)
Secteur 2	0,54 (1)	0,50 (1)	0,94 (1)	/	/
Secteur 9	0,36 (7)	0,38 (9)	0,35 (10)	0,63 (4)	0,56 (5)

Tableau 7 : Valeur moyenne des érosions maximales (en m) enregistrées par les chaînes d'érosion pour chaque secteur avec entre parenthèses le nombre de chaînes relevées

Granulométrie des sédiments

Le tableau présenté ci-dessous présente la moyenne des D50 et D90 relevés par secteurs, entre 2012 et 2014.

	2012		2013		2014	
	D50	D90	D50	D90	D50	D90
Secteur 7	743	2940	1880	6649	1867	6772
Secteur 3	1593	7238	1421	6962	1386	6897
Secteur 8	871	2922	1324	5050	1075	4735
Secteur 2	958	2700	1095	2641	1092	2368
Secteur 9	1403	4352	Aucune donnée		1583	5684

Tableau 8 : Moyenne de la granulométrie par secteur

Il est intéressant de constater que les crues morphogènes ayant eu lieu durant l'hiver n'ont eu pratiquement aucun impact sur l'évolution granulométrique des sédiments pour l'ensemble des secteurs. Seul le secteur 8 montre une légère diminution des diamètres D50 et D90. Les changements ne sont donc pas significatifs entre 2013 et 2014.

La décroissance granulométrique depuis le secteur 7 au secteur 3 est toujours observable.

2.2.2.3 Conclusion générale

Cette année encore fut marquée par une crue morphogène avec un débit supérieur à 3 000 m³/s. Cette année humide, avec un étiage peu marqué, a permis de continuer le processus de modification des grèves évoqué l'année dernière, passant par une forte remobilisation sédimentaire. En effet, les sédiments de ce secteur présentent une grande mobilité lors des épisodes de crue, attestant de l'importance de l'hydrologie dans ces phénomènes. D'une façon générale, les grèves ont tendance à se déplacer vers l'aval, en présentant des zones d'érosion en amont et un front de sédimentation plus ou moins important en aval.

La diminution du rapport entre Hmax et Hmoy montre que l'incision du chenal a tendance à diminuer (1 étant synonyme d'une incision nulle). Cette constatation est d'autant plus marquée lors de la crue morphogène de février 2013 où les grèves ont été érodées au profit de dépôts sédimentaires dans le lit d'étiage.

2.3 Thème 3 : Répartition et vitesse des écoulements

Source : mesure de la courantologie de la Loire à la Possonière dans le cadre de la convention avec Voies Navigables de France, 3^{ème} rapport – DREAL – Décembre 2014

2.3.1 Méthodologie

Réalisation de jaugeages ADCP.

Modalités de mise en place : Mise en place d'un suivi sur 7 stations jaugeées.

Périodicités des interventions : un relevé doit être effectué pour les débits suivants : 160, 300, 575, 850 et >3100 m³/s. Ces relevés sont à faire l'année suivant une crue de 3100m³/s puis à T+5.

- 2 jaugeages ont été effectués avant travaux en 2009 à 170 m³/s et 350 m³/s,
- 2 jaugeages intermédiaires* ont été effectués en 2010 à 596 m³/s et 880 m³/s,
- 5 jaugeages ont été effectués après travaux en 2012, 2013 et 2014 à 298 m³/s, 632 m³/s, 846 m³/s, 856 m³/s et 3360 m³/s.

*Les jaugeages de 2010 ont été faits après les travaux mais avant les crues morphogènes (Qmax = 2 370 m³/s).

Les différents jaugeages du suivi sont résumés dans le tableau suivant :

	Avant travaux		Après travaux/avant crues		Après crues morphogènes		Après petites crues (2210 m ³ /s et 2370 m ³ /s)	
	Date	Débit (m ³ /s)	Date	Débit (m ³ /s)	Date	Débit (m ³ /s)	Date	Débit (m ³ /s)
Etiage 160 m ³ /s	18/08/2009	170	-	-	-	-	-	-
Etiage 300 m ³ /s	25/06/2009	350	-	-	22/08/2013	298		
Médian 575 m ³ /s	-	-	01/07/2010	596	14/10/2014	632		
Module 850 m ³ /s	-	-	16/06/2010	880	02/04/2014	846	04/06/2012	856
Crue morphogène	-	-	-	-	07/02/2013	3360		

Tableau 9 : dates et débits des jaugeages de suivi entre 2009 et 2014

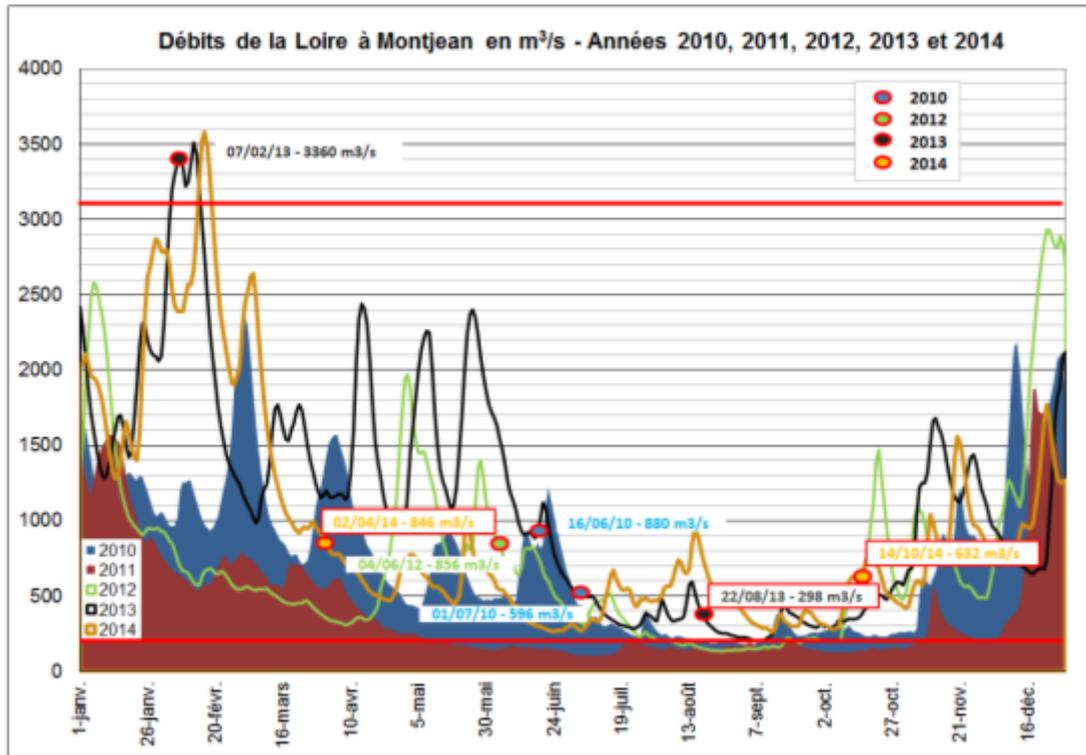


Figure 19 : dates des relevés courantologie DREAL de 2010 à 2014

Les données récupérées en 2014 peuvent être considérées comme postérieures à une crue morphogène, une crue atteignant $3\,510\text{ m}^3/\text{s}$ ayant eu lieu le 13 février 2013, et une crue atteignant $3\,580\text{ m}^3/\text{s}$ ayant eu lieu le 17 février 2014.

Les relevés à l'étiage $160\text{ m}^3/\text{s}$ n'ont pas pu être effectués en raison d'un étiage trop soutenu en 2014 (débit minimal de $260\text{ m}^3/\text{s}$).

2.3.2 Résultats et discussion

A ce stade, nous disposons de jaugeages effectués avant et après travaux dans des conditions hydrologiques comparables. La comparaison se fait donc entre les campagnes avant travaux du 16/16/06/2010 ($880\text{ m}^3/\text{s}$ à Montjean), du 04/06/2012 ($856\text{ m}^3/\text{s}$) qui a eu lieu après une petite crue morphogène, et la campagne après travaux du 02/04/2014 ($846\text{ m}^3/\text{s}$).

Cette troisième mesure au module de 2014 permet de confirmer les tendances esquissées entre les mesures avant travaux et celles de 2012, à savoir que la répartition des débits entre bras principal et bras secondaire évolue avec parcimonie dans le sens d'un renforcement des débits dans le bras secondaire (Figure 20).

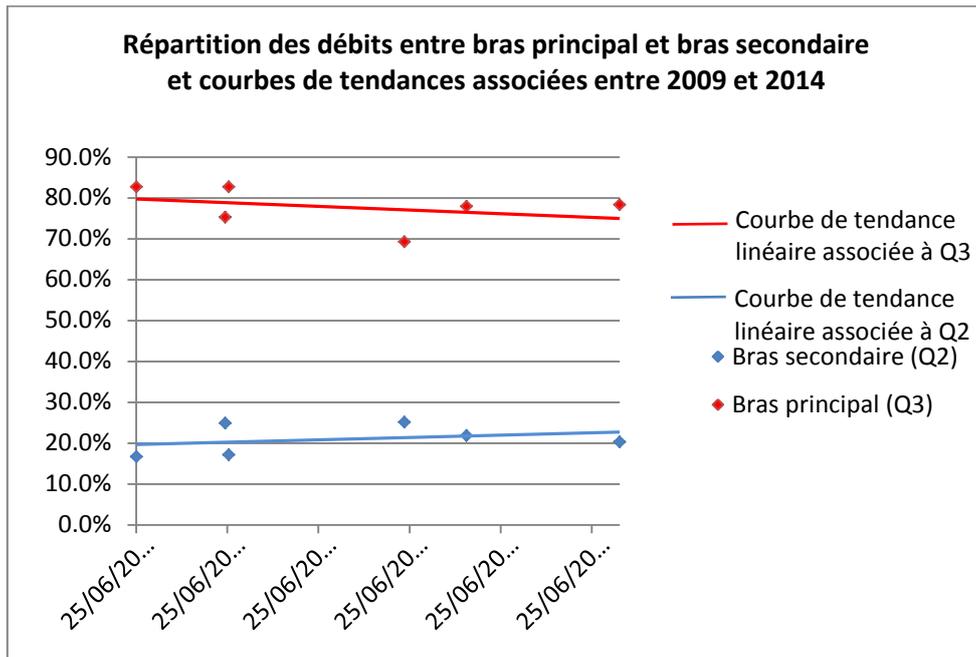


Figure 20 : répartition des débits entre bras principal et bras secondaire entre 2009 et 2014

Ce graphique permet de supposer une évolution de la répartition des débits en faveur de la réhabilitation du bras secondaire, bien que très lente. Cependant, la crue morphogène n'a pas eu un effet d'accélérateur de ces tendances comme nous aurions pu le supposer. La répartition des débits entre les bras n'évolue que très lentement, avec environ 25 % passant par le bras secondaire, ce qui est à peine plus qu'en 2010. Deux méthodes sont utilisées afin d'estimer l'évolution de la répartition des débits dans les différents bras, décrites dans la suite de ce rapport.

Ces résultats peuvent être complétés par l'évolution de la vitesse moyenne relevée sur le bras secondaire entre 2009 et 2014 (Figure 21).

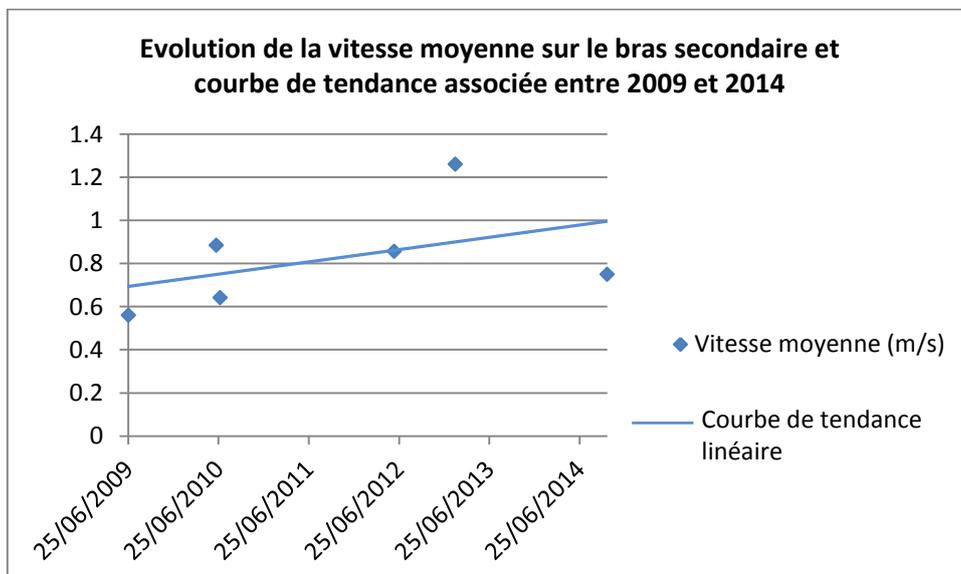


Figure 21 : évolution de la vitesse moyenne sur le bras secondaire entre 2009 et 2014

La nette tendance à l'augmentation de la vitesse moyenne sur le bras secondaire entre 2009 et 2014 permet de supposer un fort potentiel d'érosion et de remobilisation des sédiments sur ce bras, ce qui favoriserait sa totale réhabilitation dans les prochaines années. Ces observations sont confirmées par les données au débit médian.

Les jaugeages montrent une très légère augmentation de la part de débit passant par le bras secondaire, pouvant s'expliquer par la rehausse du lit sur le bras principal. Même si ces modifications restent peu marquées, des vitesses moyennes plus importantes dans le lit secondaire laissent présager une potentielle évolution positive dans les prochaines années.

2.3.2.1 Détails des deux méthodes d'évaluation de la répartition des débits entre les différents bras

La première méthode consiste à comparer le débit Q2 relevé au point de jaugeage P2 situé sur le bras secondaire, avec le débit Q1 relevé à P1 en amont de la séparation des bras. Des anomalies de mesures peuvent survenir lors des jaugeages, donnant une somme Q2+Q3 supérieure à Q1, ce qui est impossible en l'absence d'apports d'eau.

La seconde méthode consiste à comparer Q2 avec Q2+Q3.

Il est impossible de savoir avec certitude d'où viennent les erreurs. Une moyenne est donc faite entre les mesures obtenues par les méthodes différentes. Elles sont résumées sur les Figure 22, Figure 23 et Figure 24 suivantes.

Les figures suivantes montrent l'évolution de la répartition des débits entre le bras principal et le bras secondaire en fonction des jaugeages en 2010, 2012 et 2014 pour des débits proches de 850 m³/s. La mesure à l'étiage modéré (300 m³/s) de 2014 n'a pas été présentée ici car elle n'apporte que peu de renseignements : la hauteur d'eau trop faible dans le bras secondaire n'a pas permis la réalisation des mesures. D'autres mesures en 2015 sont donc prévues, à 350 m³/s ainsi qu'à l'étiage marqué, à 160 m³/s. Elles pourront alors être comparées aux données des années précédentes afin de compléter les observations des années précédentes.

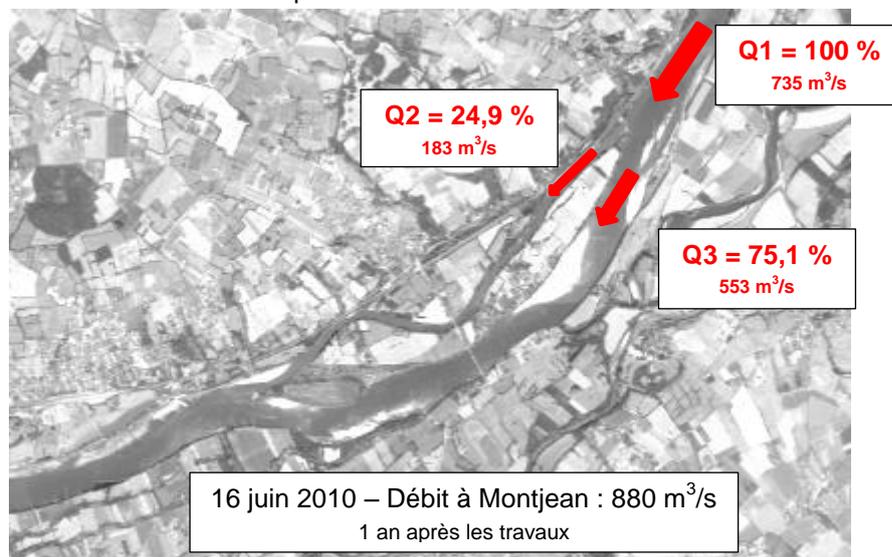


Figure 22 : répartition des débits entre bras principal (Q3) et bras secondaire (Q2) d'après les jaugeages du 16/06/2010 – 880 m³/s à Montjean et 0,49 m à la Possonnière

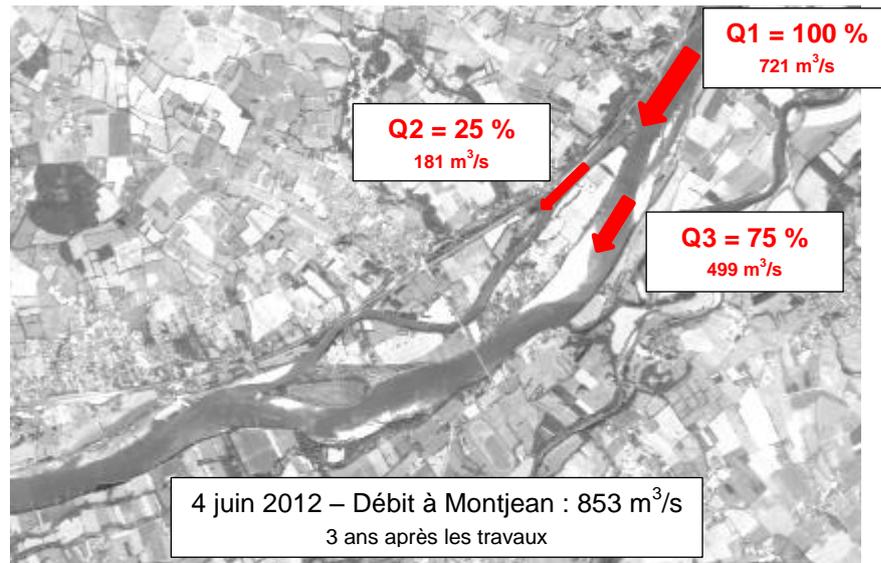


Figure 23 : répartition des débits entre bras principal (Q3) et bras secondaire (Q2) d'après les jaugeages du 04/06/12 – 856 m³/s à Montjean et 0,52m à la Possonnière

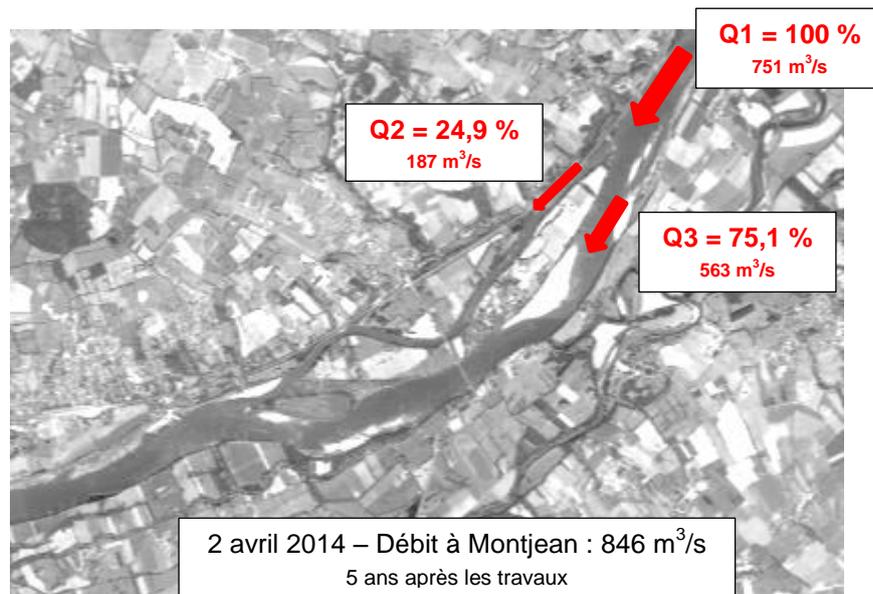


Figure 24 : répartition des débits entre bras principal (Q3) et bras secondaire (Q2) d'après les jaugeages du 02/04/14 – 846 m³/s à Montjean et 0,64 m à la Possonnière

3. Présentation des résultats du suivi des effets du projet sur l'environnement et les usages

3.1 Thème 4 : Suivi de la nappe

3.1.1 Méthodologie

Modalités de mise en place :

Suivi des niveaux de nappe au droit de la station existant sur le captage de Rochefort. Les données sont fournies par la SAUR. Elles correspondent aux relevés de niveaux d'eau au forage.

3.1.2 Résultats et discussion

Suite à la décision du comité de suivi, le niveau de nappe ne fait plus l'objet de suivi, la méthodologie souhaitée initialement n'étant pas valide.

3.2 Thème 5 : Suivi ornithologique

Source : *Suivi scientifique de l'opération de remodelage des épis de la Loire entre Chalonnes-sur-Loire et Bouchemaine – LPO – 2014*

3.2.1 Méthodologie

Protocole de suivi :

Dénombrement des oiseaux nicheurs (nombre d'individus et nombre d'espèces) par la méthode des Indices Ponctuels d'Abondance (IPA), complétée par une reconnaissance systématique en canoë.

Modalités de mise en place :

A réaliser dans des conditions standard : même durée d'observation de 30 minutes (cette durée est proposée car elle permet d'effectuer des points d'observation identiques) aux mêmes points, aux mêmes dates et aux mêmes heures (au plus tard 2 heures après le lever du soleil). Par le même observateur, et dans des conditions météorologiques similaires.

Périodicités des interventions :

Suivi à mettre en œuvre annuellement, à la même période : avec un premier passage en mai et un second passage à la mi-juin.

Principales espèces nicheuses suivies :

- La Sterne naine *Sternula albifrons* ;
- La Sterne pierregarin *Sterna hirundo* ;
- Le Petit Gravelot *Charadrius dubius* ;
- L'Hirondelle de rivage *Riparia riparia* ;
- Le Martin-pêcheur d'Europe *Alcedo atthis*.

3.2.2 Résultats et discussion

3.2.2.1 Nidification année de référence

Sur les principales espèces suivies, seul le petit gravelot et l'hirondelle de rivage sont nicheurs. La Sterne s'installe préférentiellement sur les îles isolées. Le site n'offre pas ce type de milieu.

Le petit Gravelot est recensé par deux couples installés. L'un en rive gauche de la Loire (Saint-Jean-de-la-Croix), face à la Pointe, l'autre au niveau des enrochements des piles du pont de l'Alleud. Le premier a eu quatre jeunes, le second n'a pas donné lieu à l'observation de jeunes.

Il est très probable que d'autres couples soient installés mais non recensés, l'espèce n'étant pas facile à détecter.

Les Hirondelles de rivage sont installées sur le secteur 6 (au niveau du lieu-dit « Les Jubeaux), au droit d'un secteur particulier présentant une berge haute et abrupte favorable à leur installation.

3.2.2.2 Nidifications observées sur les 4 premières années de suivi

Année 2010 : sur l'ensemble des espèces suivies, deux sont nicheuses avec la présence du petit gravelot et de l'hirondelle de rivage.

Année 2011 : le petit gravelot et l'hirondelle de rivage sont de nouveau nicheurs sur le site. Le martin pêcheur est un nicheur probable et le chevalier guinguette est observé pour la première fois sur le site.

Année 2012 : seule l'hirondelle de rivage est considérée comme nicheur certain.

Année 2013 : sur l'ensemble des espèces suivies, aucune n'est considérée comme nicheur certain, notamment à cause de la disparition du site de reproduction par modification du faciès en berge.

3.2.2.3 Observations de l'année 2014

Cette année encore, aucune des espèces suivies n'est considérée comme nicheur certain, bien que quatre nouvelles espèces d'oiseaux aient été repérées sur site.

3.2.2.4 Conclusion

Au terme de ces cinq années de suivi, aucune tendance d'évolution particulière ne semble se dégager.

Les variations observées traduisent des variations interannuelles qui semblent principalement liées à la disponibilité en milieux de reproduction (grèves et berges) et donc aux niveaux d'eau qui règnent lors de l'arrivée sur site des oiseaux. Des facteurs autres que les travaux, comme les conditions hydrologiques, entrent largement en compte, ce qui rend difficile une conclusion sur les impacts réels des travaux réalisés.

Pour de futurs suivis, il serait intéressant de croiser les relevés géomorphologiques qui ont dû être réalisés dans le cadre de l'opération de remodelage, avec les conditions stationnelles recherchées par les sternes en période de reproduction, afin de voir si le potentiel d'accueil a évolué. Il serait notamment intéressant de voir si les modifications apportées sur les épis ont entraîné l'apparition de grèves isolées, ou quelle est la période de connexion aux berges en année « classique ».

Au regard des suivis avifaunistiques effectués depuis 5 ans, les travaux de remodelage ne semblent pas avoir impacté négativement l'avifaune ligérienne, mais ils ne semblent pas non plus avoir engendré dans des proportions significatives une amélioration des conditions stationnelles recherchées par les oiseaux des bords de Loire. La tendance est donc plutôt neutre.

3.3 Thème 6 : Suivi de la flore et des habitats

Source : Opération expérimentale de remodelage des épis de la Loire entre Bouchemaine et Chalonnes-sur-Loire. Réalisation de 11 transects flore et habitats – THEMA – Novembre, 2014

3.3.1 Méthodologie

Protocole de suivi :

Réalisation de profils de végétation.

Modalités de mise en place :

Pour chaque station : effectuer un relevé phytosociologique de la végétation en notant les informations suivantes : date, exposition, altitude, pente, nature du substrat, enfin relevé de la végétation et coefficient d'abondance (recouvrement de la végétation).

Périodicités des interventions :

A réaliser 1 année après travaux pour analyser la cicatrisation du chantier puis à T+5.

3.3.2 Résultats et discussion

L'évolution des habitats sur les transects

Les principales évolutions qui ressortent de cette comparaison diachronique sont :

- des longueurs de transects significativement plus courtes pour les transects 1, 4, 8 et 9, liées à la ligne d'eau plus proche du pied de la berge. Les longueurs ont été divisées jusqu'à quatre par rapport à l'état initial de 2008,
- l'absence d'habitat du nanocypérion cette année, alors qu'il avait été jugé en bon état de conservation sur le transect 11 lors des relevés de 2010,
- une tendance globale à la dégradation des habitats par le développement d'espèces allochtones invasives (*Ludwigia* et *Paspalum distichum*). Cette dégradation est particulièrement marquée sur les habitats de Bidention, soit en pied de berge où *Paspalum distichum* prolifère, soit sur les secteurs de faible pente recouverts par l'eau une partie de l'année et sur lesquels un cortège amphibie monospécifique à *Ludwigia* recouvre l'habitat.
- Il est important de noter qu'aucune espèce végétale protégée n'a été relevée en 2014 sur les transects de suivi.

Corrélation avec le projet expérimental

Un seul suivi de la flore et des habitats a été réalisé pour ce projet, en 2010 (N+1). De façon globale, la longueur des transects réalisés en 2014 est inférieure à celles des transects de l'année de référence (2008) du fait des variations de niveau de la Loire aux périodes de prospection.

- Les débits aux moments des prospections 2014 étaient de 313 m³/s et 309 m³/s à la station de Montjean (2 et 3 octobre 2014). Ces débits à la station de Montjean en 2014 correspondent à une ligne d'eau de 13,10 m NGF sur la Pointe et 11,73 m NGF sur la Possonière.

- Les relevés effectués en 2008 ont été levés à une ligne d'eau de 13,42 m NGF à la Pointe et 11,60 m NGF sur la Possonière.
- Les relevés effectués en 2010 ont été levés à une ligne d'eau de 12,88 m NGF à la Pointe et 11,30 m NGF sur la Possonière.

Il existe donc des différences de niveau marquées entre les relevés de 2008, 2010 et 2014.

Points d'amélioration pour le suivi expérimental

Une attention particulière devra être portée sur les niveaux d'eaux lors des prospections : ces derniers devront être le plus semblables possibles au cours des années afin d'avoir des valeurs comparables.

Aucune tendance ne permet de conclure quant à l'incidence ou non du projet de remodelage des épis d'après les résultats de cette 5^{ème} année de suivi. Les évolutions observées sur les habitats sont plutôt liées au développement de plantes invasives allochtones au dépend de communautés autochtones sur le site. Le développement de ces dernières est également perturbé par des niveaux d'eau plus élevés lors des relevés de 2014.

3.4 Thème 7 : Suivi de la navigation et de la pêche

3.4.1 Méthodologie

3.4.1.1 Suivi des tirants d'eau

Modalités de mise en place :

Suivi des tirants d'eau en période d'étiage, chaque année.

Périodicités des interventions :

Pas d'intervention spécifique : suivi des bulletins de navigation.

3.4.1.2 Fréquentation du site

Modalités de mise en place :

Comptage.

Périodicités des interventions :

A réaliser à T0, T+2 et T+5 : 2 comptages durant l'étiage, entre 10h et 16h, en semaine et le week-end (samedi de préférence).

3.4.2 Résultats et discussion

3.4.2.1 Analyse des tirants d'eau

Les données sont extraites du bulletin de navigabilité fournit par VNF. Plusieurs points sont relevés dans la zone d'étude avec pour chaque point une indication sur la largeur du chenal et le tirant d'eau. Les relevés sont effectués uniquement lorsque le tirant d'eau est inférieur à 1.80m.

Le tableau présenté sur la page suivante synthétise le nombre de jours présentant un tirant d'eau inférieur à 1.80 m pour l'année de référence 2009 et les années N+1, N+2, N+3, N+4 et N+5. La hauteur moyenne des relevés est également indiquée.

	Année	Nbe de jours < 1,80 m						Hauteur moyenne					
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Bouchemaine	La Pointe	17	16	30	22	12	2	1,14	1,28	0,99	1,22	1,45	1,65
	Epiré	0	10	Non suivi	Non suivi	Non suivi	Non suivi	-	1,13	-	-	-	-
	La Croix Picot	Non suivi	Non suivi	34	15	0	0	-	-	1	1,21	-	-
Behuard	Aval tête de l'île de Behuard	21	16	22	22	15	15	1,14	1,34	0,95	1,21	1,23	1,50
	La Taure	9	15	34	22	15	14	1,02	1,38	0,93	1,18	1,11	1,42
	Amont Lombardières	19	12	34	22	10	8	1,06	1,15	0,95	1,15	1,22	1,55
	Aval pont des Lombardières	3	14	34	20	3	2	0,90	1,19	0,98	1,19	1,27	1,35
	Île Mureau	19	16	34	22	15	16	1,06	1,27	0,94	1,15	1,08	1,42
	Queue de l'île de Behuard	17	11	5	22	3	3	1,15	1,19	1,22	1,30	1,40	1,67
La Possonnière		8	15	34	22	14	14	1,30	1,28	0,97	1,23	1,37	1,44
	Les Robins	Non suivi	Non suivi	30	12	15	11	-	-	0,92	1,08	1,24	1,48
	Pont de l'Alleud	9	1	34	12	0	0	1,29	1,60	1,14	1,16	-	-

Tableau 10: Suivi des tirants d'eau sur les cinq années de suivi (+ année 0)

Ces données sont fournies à titre indicatif mais d'une année sur l'autre, selon la durée des étiages (année sèche ou non), le nombre de jours peut fortement varier sans lien particulier avec la remobilisation de matériaux dans le fond du chenal de la Loire. Il est donc plus pertinent de faire une analyse du tirant d'eau pour un débit donné.

		Hauteur moyenne					
		2009	2010	2011	2012	2013	2014
Bouchemaine	La Pointe	1,25	1,03	1,03	1,06	1,20	non suivi
	Epiré	non suivi	1,03	non suivi	non suivi	non suivi	non suivi
	La Croix Picot	non suivi	non suivi	1,10	1,16	1,20	non suivi
Behuard	Aval tête de l'île de Behuard	0,95	1,17	1,10	1,04	1,00	1,15
	La Taure	1,00	1,17	0,97	1,04	0,90	1,15
	Amont Lombardières	0,95	1,00	1,00	0,94	0,95	non suivi
	Aval pont des Lombardières	non suivi	0,97	1,03	1,02	non suivi	non suivi
	Île Mureau	0,95	0,97	1,07	1,00	0,85	1,05
	Queue de l'île de Behuard	1,05	1,03	1,10	1,20	non suivi	non suivi
La Possonnière		1,40	0,93	1,20	1,22	0,95	1,10
	Les Robins	non suivi	non suivi	1,13	1,16	0,90	1,30
	Pont de l'Alleud	1,00	non suivi	1,27	1,18	non suivi	non suivi

Tableau 11 : Moyenne des hauteurs de tirant d'eau observées pour un débit aux alentours de 200 m³/s

Dans le tableau de synthèse ci-dessus, les valeurs les plus faibles pour chaque année de suivi sont mises en évidence en bleu.

Pour un même débit et sur un même secteur géographique, le tirant d'eau moyen aux alentours de 200 m³/s varie dans une fourchette d'une vingtaine de centimètres au cours des 5 années. Les valeurs pour l'année 2014 peuvent paraître légèrement plus élevées, mais les débits utilisés pour la comparaison sont de 273 et 297 m³/s. Il n'y a donc pas de tendance générale à l'augmentation ou à la baisse.

Il est important pour la navigation que le tirant d'eau minimum ne descende pas sous 0,80m. Cette valeur n'est pas atteinte en 2014.

Le tirant d'eau minimum de 80 cm est respecté. Il n'y a pas à ce jour de tendance identifiée pour la navigation.

3.4.2.2 Fréquentation du site

Bien que prévu au protocole cette année, il n'y a eu aucune donnée.

3.5 Thème 8 : Reportage photographique

3.5.1 Méthodologie

Modalité de mise en place :

Prises de vue photographiques annuelles au niveau de sites prédéfinis (emplacement des prises de vue détaillé sur la carte ci-dessous).

Objectif :

Analyser la modification de perception visuelle des épis en période d'étiage.

3.5.2 Résultats et discussion

Bien que les prises de vues aient été programmées dans le protocole pour cette 5^{ème} année de suivi, celles-ci n'ont pas été réalisées.

4. Conclusion

Cette cinquième et dernière année de suivi apporte la confirmation quant à la tendance au rehaussement de la ligne d'eau en étiage, avec des valeurs supérieures de 20 à 30 cm par rapport aux premières années de suivi.

Toutefois, cette tendance doit être observée avec précaution. En effet, au cours de ces 5 années de suivi, de nombreuses données ont été collectées et exploitées. Nous pouvons souligner une faible précision des mesures par rapport aux effets attendus du projet. Les analyses détaillées de lignes d'eau montrent une incertitude des mesures de 10 à 15 cm soit la moitié de l'effet attendu. Cela s'explique probablement par plusieurs facteurs :

- la précision du matériel utilisé,
- les variations naturelles de la Loire pour un même débit,
- la difficulté de l'intervention des différents prestataires à des conditions hydrologiques précises et toujours similaires.

Les suivis complémentaires sur les cinq années permettent de voir une modification de la répartition des débits entre les deux bras, avec une remobilisation progressive du bras secondaire qui a vu sa vitesse moyenne augmenter après les travaux. L'incision du lit principal a également diminué, témoignant des remaniements sédimentaires par les dernières crues morphogènes

Tous les indicateurs depuis 5 ans permettent de confirmer la tendance de rehausse de la ligne d'eau ainsi qu'une évolution positive du secteur, avec un bras secondaire davantage alimenté. Cependant, le protocole de suivi ne permet pas de déterminer avec précision les impacts liés.