

ETUDE DES DEBITS MORPHOGENES SUR LA RIVIERE DORDOGNE



Novembre 2015



EPIDOR
la rivière solidaire

Coulobre faisant son nid

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
2	DYNAMIQUE MORPHOGENE DES COURS D'EAU	2
2.1	Paramètres d'évolution des hydrosystèmes fluviaux	2
2.2	Mécanismes du transport sédimentaire	7
2.3	Mobilité des macroformes sédimentaires	9
2.4	Conclusion	10
3	ANALYSE HYDROLOGIQUE DE LA DORDOGNE	11
3.1	Les stations de la Banque HYDRO	11
3.2	L'Aménagement hydroélectrique du bassin de la Dordogne	12
3.2.1	Présentation des aménagements.....	12
3.2.2	Le contrôle hydrologique de la Dordogne.....	12
3.3	Incidence sur les crues	14
3.3.1	Historique de l'aménagement et statistiques de crue	14
3.4	Typologie des hydrogrammes	19
3.5	Conclusion	21
4	ANALYSE DIACHRONIQUE DU LIT DE LA DORDOGNE	22
4.1	Evolution spatiale de la bande active.....	22
4.2	Analyse du profil en long.....	34
4.3	Analyse diachronique des macro-formes (bancs de sédiments)	37
4.3.1	Hydrologie de la Dordogne entre 1995 et 2012.....	41
4.3.2	Cartographie de l'évolution des bancs par tronçons de 10 km sur le secteur d'étude	42
4.4	Conclusion	49
5	ANALYSE DE LA CAPACITE MORPHOGENE DE LA DORDOGNE	50
5.1	Dynamique fluviale à débit de plein bord du secteur d'étude.....	50
5.1.1	Détermination du débit de plein bord	51
5.1.2	Détermination des valeurs du diamètre médian D_{50} du substrat	54
5.1.3	Analyse de la dynamique fluviale	56
5.2	Analyse de débits morphogènes sur le secteur d'étude	61
5.3	Synthèse des résultats.....	64
6	MESURES SUR DEUX SITES A ENJEUX	65
6.1	Mesure de la capacité de transport sédimentaire	65
6.1.1	Diversité des profils dans un même tronçon	65
6.1.2	Diversité des écoulements dans un même profil.....	68

7	SYNTHESE ET PROPOSITIONS D'AMENAGEMENTS.....	73
8	CONCLUSIONS DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES.....	76
9	BIBLIOGRAPHIE	77
10	ANNEXE 1 : MODELE HYDRAULIQUE DE LA DORDOGNE	78
10.1	Mise en place du domaine d'étude.....	78
10.2	Calage du modèle	80
10.3	Conclusion	84
11	ANNEXE 2 : MESURES DOPPLER	85
11.1	Limites méthodologiques	85
11.2	Site de Pinsac, le 6 mai 2015 entre 10h00 et 13h00	86
11.2.1	Analyse hydraulique	89
11.2.2	Transport sédimentaire	96
11.3	Site de Montfort, le 6 mai 2015 entre 15h00 et 18h00	101
11.3.1	Analyse hydraulique	103
11.3.2	Transport sédimentaire	111

Liste des figures

Figure 2-1 : Structure et évolution des écosystèmes	2
Figure 2-2 : Echelles spatiales et temporelles des ajustements des formes fluviales	3
Figure 2-3 : Détermination du débit morphogène d'un cours d'eau	4
Figure 2-4 : Classification des valeurs seuil de paramètre de Shields	5
Figure 2-5 : Modélisation des valeurs seuil de paramètre de Shields en fonction du nombre de Reynolds particulaires (Re_p).....	6
Figure 2-6 : Largeur de plein bord adimensionnelle en fonction du débit de plein bord adimensionnel	8
Figure 2-7 : Hauteur de plein bord adimensionnelle en fonction du débit de plein bord adimensionnel	8
Figure 3-1 : Secteur d'étude et stations hydrométriques.....	11
Figure 3-2 : Réseau hydrographique du secteur d'étude Argentat-Limeuil	11
Figure 3-3 : Carte des ouvrages hydroélectriques sur la partie amont du bassin de la Dordogne	12
Figure 3-4 : Régimes hydrologiques annuels avant et après aménagement hydroélectrique.....	13
Figure 3-5 : Evolution de la consommation journalière électrique en 2004	13
Figure 3-6 : Historique des crues journalières annuelles entre 1900 et 2013 à Argentat.....	15
Figure 3-7 : Historique des crues journalières annuelles entre 1900 et 2013 à Cénac	16
Figure 3-8 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Argentat.....	17
Figure 3-9 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Montignac.....	17
Figure 3-10 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Cénac	18
Figure 3-11 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Bergerac.....	18
Figure 3-12 : Synthèse des indicateurs de la typologie des hydrogrammes - Période 1900-1950	19
Figure 3-13 : Synthèse des indicateurs de la typologie des hydrogrammes - Période 1951-2013	20
Figure 3-14 : Comparaison du nombre de hausses significatives par an du débit à Argentat	20
Figure 3-15 : Comparaison des gradients de montée et de descente à Argentat	21
Figure 4-1 : Numérotation des grands tronçons d'analyse	22
Figure 4-2 : Fond d'image de la carte d'Etat-major 1820-1866.....	23
Figure 4-3 : Fond d'image de la campagne de photos aériennes de 1995	23
Figure 4-4 : Fond d'image de la campagne de photos aériennes de 2012	24
Figure 4-5 : Fond d'image de la superposition des 3 bandes actives	24
Figure 4-6 : Superposition du lit moyen de la Dordogne sur le secteur d'étude (1820-1866, 1995, 2012)	25
Figure 4-7 : Evolution du lit de la Dordogne - Secteur d'Aillac/Veyrignac	26
Figure 4-8 : Evolution du lit de la Dordogne - Secteur de Lacave	26
Figure 4-9 : Evolution du lit - Tronçon 17	27
Figure 4-10 : Evolution du lit - Tronçon 16	27
Figure 4-11 : Evolution du lit - Tronçon 15	28
Figure 4-12 : Evolution du lit - Tronçon 14	28
Figure 4-13 : Evolution du lit - Tronçon 13	29
Figure 4-14 : Evolution du lit - Tronçon 12	29
Figure 4-15 : Evolution du lit - Tronçon 11	30
Figure 4-16 : Evolution du lit - Tronçon 10	30
Figure 4-17 : Evolution du lit - Tronçon 9	31
Figure 4-18 : Evolution du lit - Tronçon 8	31
Figure 4-19 : Evolution du lit - Tronçon 7	32
Figure 4-20 : Evolution du lit - Tronçon 6	32
Figure 4-21 : Evolution du lit - Tronçon 5	33
Figure 4-22 : Evolution du lit - Tronçon 4	33
Figure 4-23 : Evolution du lit - Tronçon 1 à 3	34
Figure 4-24 : Profil en long de la ligne d'eau d'étiage de la Dordogne (Macé, 2002)	36
Figure 4-25 : Méthodologie d'analyse de l'évolution des bancs sédimentaires.....	38
Figure 4-26 : Répartition des typologies d'évolution des bancs sédimentaires	39
Figure 4-27 : Apparition de nouveaux bancs entre 1995 et 2012 entre le Buisson-de-Cadouin et Siorac-en-Périgord	39

Figure 4-28 : Evolution des bancs de sédiments au niveau de Lacave entre 1995 et 2012	40
Figure 4-29 : Episodes de crues supérieurs au débit de plein bord entre 1996 et 2012 à Cénac	41
Figure 4-30 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 17	42
Figure 4-31 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 16	42
Figure 4-32 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 15	43
Figure 4-33 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 14	43
Figure 4-34 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 13	44
Figure 4-35 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 12	44
Figure 4-36 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 11	45
Figure 4-37 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 10	45
Figure 4-38 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 9	46
Figure 4-39 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 8	46
Figure 4-40 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 7	47
Figure 4-41 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 6	47
Figure 4-42 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 5	48
Figure 4-43 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 4	48
Figure 4-44 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçons 1 à 3	49
Figure 5-1 : Profil en travers et côte d'eau pour 8 valeurs de débit allant de 500 m ³ /s à 850 m ³ /s	51
Figure 5-2 : Cartographie des valeurs de débit de plein bord par tronçon de 10 km	52
Figure 5-3 : Numérotation des tronçons d'analyse du secteur d'étude.....	52
Figure 5-4 : Puissance spécifique moyenne par tronçon – Débits de plein bord.....	54
Figure 5-5 : Profil granulométrique à Carennac et à Brivezac (1979).....	55
Figure 5-6 : Profils en travers et substrat dominant du lit de la Dordogne.....	55
Figure 5-7 : Largeurs de plein bord en fonction du débit sur le secteur d'étude (Echelles log-log)	57
Figure 5-8 : Hauteurs de plein bord en fonction du débit sur le secteur d'étude (Echelles log-log)	58
Figure 5-9 : Répartition spatiale des largeurs de plein bord adimensionnées de la Dordogne	59
Figure 5-10 : Répartition spatiale des hauteurs de plein bord adimensionnées de la Dordogne	59
Figure 5-11 : Largeur adimensionnelle de plein bord de la Dordogne et rivières de référence	60
Figure 5-12 : Hauteur adimensionnelle de plein bord de la Dordogne et rivières de référence	60
Figure 5-13 : Paramètre de Shields en fonction du débit par tronçon d'analyse	61
Figure 5-14 : Diamètre maximum potentiellement mobilisable par tronçon – Débits de plein bord.....	62
Figure 5-15 : Diamètre maximum potentiellement mobilisable par tronçon – Crue du 14/02/2014.....	63
Figure 6-1 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)	66
Figure 6-2 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (site Geoportail)	66
Figure 6-3 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)	67
Figure 6-4 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (carte Géoportail)	67
Figure 6-5 : Site de Pinsac - Atterrissement entre les profils T16 et T20.....	68
Figure 6-6 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur le profil en travers T1	69
Figure 6-7 : Site de Pinsac - Profil en travers T1, bathymétrie et vitesses	69
Figure 6-8 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T1	70
Figure 6-9 : Site de Pinsac - Répartition latérale des diamètres mobilisables sur profil T1.....	70
Figure 6-10 : Site de Pinsac - Répartition latérale des diamètres mobilisables sur profil T2	71
Figure 6-11 : Sites de Pinsac et Montfort - Distribution des vitesses horizontales mesurées par colonne d'eau échantillonnée	72
Figure 7-1 : Les gravières d'Argentat (environ 22 ha sur 2m équivalent à un matelas de 3 cm d'alluvions sur 150 km de rivière)	74
Figure 10-1 : Assemblage bathymétrie 1998 & LIDAR 2010	78
Figure 10-2 : Exemple de points de berge rive gauche mal identifiés.....	79
Figure 10-3 : Exemple de lissage de la bathymétrie sur un profil en travers	80
Figure 10-4 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Cénac et St Julien	81
Figure 10-5 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Siorac	82
Figure 10-6 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Souillac.....	82
Figure 10-7 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Carrenac.....	83
Figure 10-8 : Evolution du débit mesuré à la station de Siorac-en-Périgord.....	83
Figure 10-9 : Limite du calage d'HEC-RAS - Profil RS89902 au niveau d'une annexe hydraulique.....	84
Figure 11-1 : Débit de la Dordogne à Souillac le jour de la mesure (site www.debits-dordogne.fr)	85
Figure 11-2 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)	86
Figure 11-3 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (Geoportail)	87

Figure 11-4 : Site de Pinsac - Zone d'érosion en rive gauche au niveau du profil T12	88
Figure 11-5 : Site de Pinsac - Zone d'érosion en rive droite entre profils T16 et T20	88
Figure 11-6 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur le profil en travers T1	89
Figure 11-7 : Site de Pinsac - Profil en travers T1, bathymétrie et vitesses	89
Figure 11-8 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T1	90
Figure 11-9 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T2 à T4	91
Figure 11-10 : Site de Pinsac - Profil en travers T4, bathymétrie et vitesses	91
Figure 11-11 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T4 à T9	92
Figure 11-12 : Site de Pinsac - Profil en travers T9, bathymétrie et vitesses	92
Figure 11-13 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T10 à T23	93
Figure 11-14 : Site de Pinsac - Profils en travers T13 (haut) et T15 (bas), bathymétrie et vitesses	93
Figure 11-15 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T23 à T28	94
Figure 11-16 : Site de Pinsac - Profils en travers T23 (haut) et T25 (bas), bathymétrie et vitesses	94
Figure 11-17 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T26 à T29	95
Figure 11-18 : Site de Pinsac - Profil en travers T28, bathymétrie et vitesses.....	95
Figure 11-19 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T1	97
Figure 11-20 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T4	97
Figure 11-21 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T9	98
Figure 11-22 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T13	98
Figure 11-23 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T15	99
Figure 11-24: Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T22	99
Figure 11-25 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T25	100
Figure 11-26 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T28	100
Figure 11-27 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)	101
Figure 11-28 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (Géoportail)	101
Figure 11-29 : Site de Montfort - Ripisylve en lit mineur	102
Figure 11-30 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T1 à T3	103
Figure 11-31 : Site de Montfort - Profil en travers T3, bathymétrie et vitesses	103
Figure 11-32 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T4 à T6	104
Figure 11-33 : Site de Montfort - Profils en travers T4 (haut) et T6 (bas), bathymétrie et vitesses.....	104
Figure 11-34 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T6 à T9	105
Figure 11-35 : Site de Montfort - Profils en travers T8 (haut) et T9 (bas), bathymétrie et vitesses.....	105
Figure 11-36 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T10 à T11	106
Figure 11-37 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T12 à T19	106
Figure 11-38 : Site de Montfort - Profil en travers T17, bathymétrie et vitesses	106
Figure 11-39 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T19 à T24	107
Figure 11-40 : Site de Montfort - Profils en travers T19 (haut) à T22 (bas), bathymétrie et vitesses	107
Figure 11-41 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T25 à T28	108
Figure 11-42 : Site de Montfort - Profil en travers T26, bathymétrie et vitesses	108
Figure 11-43 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T28 à T30	109
Figure 11-44 : Site de Montfort - Profils en travers T29 (haut) et T30 (bas), bathymétrie et vitesses.....	109
Figure 11-45 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T31 à T34	110
Figure 11-46 : Site de Montfort - Profil en travers T32, bathymétrie et vitesses	110
Figure 11-47 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T3	112
Figure 11-48 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T4	112
Figure 11-49 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T6.....	113
Figure 11-50 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T8.....	113
Figure 11-51 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T9.....	114
Figure 11-52 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T17.....	114
Figure 11-53 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T19.....	115
Figure 11-54 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T20.....	115
Figure 11-55 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T21.....	116
Figure 11-56 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T22.....	116
Figure 11-57 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T26.....	117
Figure 11-58 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T29.....	117
Figure 11-59 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T30.....	118
Figure 11-60 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T32.....	118

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Statistiques de crues de la Dordogne à Argentat.....	15
Tableau 3-2 : Statistiques de crues de la Dordogne à Cénac	16
Tableau 4-1 : Caractéristiques des clichés de la campagne de photos aériennes 1995.....	37
Tableau 4-2 : Caractéristiques des clichés de la campagne de photos aériennes 2012.....	37
Tableau 4-3 : Résultat d'analyse de l'évolution des bancs sédimentaires.....	39
Tableau 5-1 : Débit, largeur au miroir et hauteur d'eau sur chaque tronçon – Régime de plein bord	53
Tableau 5-2 : Diamètre médian moyen du substrat sur les tronçons du secteur d'étude.....	56
Tableau 5-3: Valeurs du Reynolds particulière en fonction de la taille de substrat	61
Tableau 11-1: Site de Pinsac - Diamètre max potentiellement mobilisable par profil en travers	96
Tableau 11-2: Site de Montfort - Diamètre max potentiellement mobilisable par profil en travers	111

1 INTRODUCTION

Les processus d'érosion, de transport de sédiments, de dépôt dans un cours d'eau ont pour effet de créer, détruire, recréer une diversité de milieux dont la grande richesse écologique tient justement à leur fréquence de régénération et à leur assemblage sous forme de mosaïque. Le rajeunissement lié aux crues et au transport sédimentaire est le garant d'une diversité maximale des milieux et donc de la faune aquatique et terrestre qui leur est associée.

La rivière Dordogne subit depuis plus de 50 ans des pressions anthropiques qui ont influencé l'évolution de sa physionomie et de sa biodiversité. En particulier, son régime hydraulique a été artificialisé, causé par la présence et l'exploitation de grandes chaînes de barrages, installées entre 1922 et 1957, qui fonctionnent par éclusées et dont le débit à l'aval est bridé par les débits d'équipement des usines hydroélectriques. Une première analyse hydrologique avait été menée dans le cadre du PAPI Dordogne de 2005 et avait mis en évidence une modification des régimes et des extrêmes qui, associée à d'importantes extractions de granulats entre 1920 et 1981 (environ 15 millions de mètres-cubes entre Argentat et Limeuil¹), a entraîné une modification de l'hydromorphologie de la Dordogne, créant un fort déficit sédimentaire et une incision du lit mineur.

D'un point de vue réglementaire, le SDAGE Adour-Garonne souligne la nécessité de restaurer les phénomènes de régulation naturelle et de dynamique fluviale des cours d'eau, afin d'atteindre les objectifs de retour au bon état écologique, fixés par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, incluant pour une grande part la qualité hydromorphologique des cours d'eau.

Cette étude a pour but de dégager les premiers éléments d'analyse, d'ordre macroscopique, sur la capacité de la rivière Dordogne, entre Argentat et Limeuil, à redévelopper des formes de diversité des milieux aquatiques fluviaux, en rapport avec les débits restituables à l'aval de la chaîne de barrages en période de hautes-eaux. L'approche se veut hydraulique et non biologique ou écosystémique, le fonctionnement du transit sédimentaire en lien avec des débits dits « morphogènes » étant considéré comme structurant pour l'écologie du cours d'eau.

Après avoir contextualisé les mécanismes de la dynamique morphogène de la Dordogne par une recherche bibliographique et une analyse hydrologique détaillée à l'aval d'Argentat, une analyse diachronique sur le secteur d'étude, s'appuyant sur les cartes d'état-major du XIX^{ème} siècle et les photos aériennes de 1995 et de 2012, permet d'apprécier les principales modifications du lit de la Dordogne au cours du siècle passé, et dégage une première vision de la dynamique des bancs sédimentaires.

En faisant l'hypothèse que le débit de plein bord est un débit morphogène, un modèle hydraulique a été mis en place pour estimer les débits de plein bord, sur la Dordogne, par tronçon de 10 km sur le secteur d'étude, et simuler, en fonction de ces conditions de plein bord, la capacité de mobilisation des substrats du lit de la rivière. Des mesures de terrain viennent compléter ces résultats de simulation de manière à préciser les diversités d'écoulements existants et, en particulier, d'évaluer localement la capacité érosive en lien avec les caractéristiques de ces sites : mise en eau d'annexes hydrauliques, érosion des berges, végétalisation de la ripisylve.

Les premières conclusions de cette étude débouchent sur des propositions d'analyses et de mesures complémentaires, ainsi que sur des perspectives de gestion et des choix de stratégie ouverts au débat.

Deux stations de mesures ont été réalisées de manière à préciser les diversités d'écoulements existants en lien avec des enjeux locaux : mise en eau d'annexes hydrauliques, érosion des berges, végétalisation de la ripisylve.

Une synthèse des résultats obtenus est présentée ainsi que des propositions de scénarios de gestion des débits associés à des suivis d'évolution hydromorphologique.

¹Source : (Macé, 2002)

2 DYNAMIQUE MORPHOGENE DES COURS D'EAU

Les éléments présentés dans ce chapitre sont généraux, certains sont mobilisés pour analyser la capacité morphogène de la Dordogne à l'aide du modèle hydraulique (cf. §10 Annexe 1).

2.1 Paramètres d'évolution des hydrosystèmes fluviaux

Les principes de l'étude hydromorphologique des cours d'eau sont basés sur les notions de système fluvial à l'échelle des bassins versants et d'un sous-système nommé hydrosystème fluvial à l'échelle des cours d'eau.

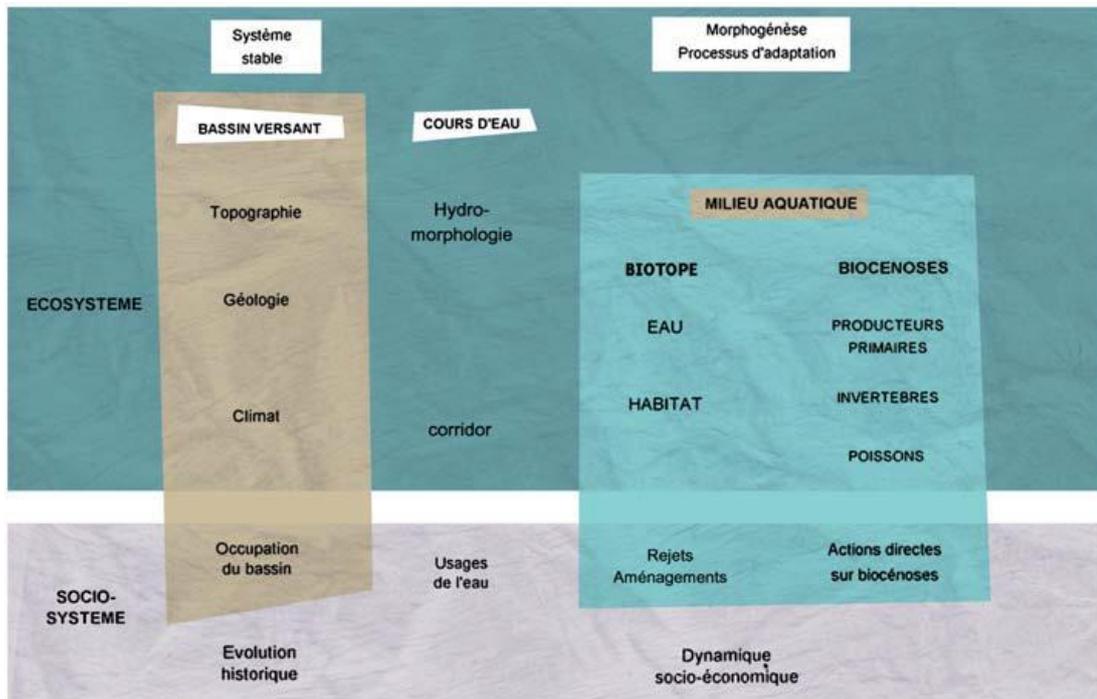
A l'échelle du bassin versant, trois grandes zones caractérisent la dynamique de transport de sédiments le long d'un cours d'eau :

- La production de sédiments plus grossiers en amont ;
- Le transport de sédiments devenant plus fin vers l'aval ;
- Le dépôt de sédiments fins dans la plaine alluviale en aval.

L'étude des phénomènes morphogènes au sein de l'hydrosystème se situe dans le contexte de la zone du système fluvial associé.

Comme indiqué dans l'ouvrage de Malavoi et Bravard (Malavoi & Bravard, Elements d'hydromorphologie fluviale, 2010), la dynamique fluviale incluant la morphologie des cours d'eau et leur évolution spatio-temporelle régit aussi la dynamique des écosystèmes qui leur sont associés.

Ces écosystèmes sont répartis spatialement sur le lit mineur, le lit moyen (assimilé au lit mineur dans les approches de modélisation hydraulique) et le lit majeur ou plaine alluviale.



Source : Malavoi & Bravard, Elements d'hydromorphologie fluviale, 2010

Figure 2-1 : Structure et évolution des écosystèmes

La morphologie d'un cours d'eau est caractérisée par la géométrie de son lit (largeur de plein bord, profondeur de plein bord, pente, sinuosité...) répondant à des **variables de contrôle** :

- Débit liquide (et puissance) ;
- Débit solide ;
- Pente et géométrie de la vallée ;
- Caractéristiques sédimentologiques du fond du lit et des berges ;
- Végétation des berges.

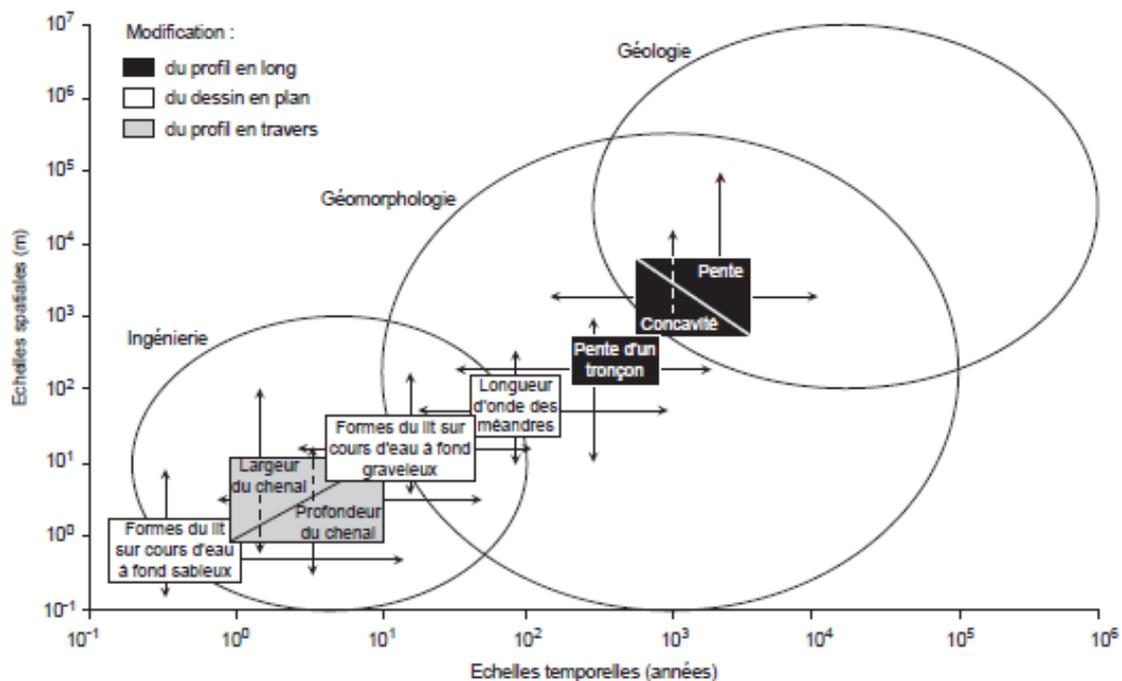
La dynamique fluviale résultante est un ajustement de la morphologie du cours d'eau aux processus d'érosion-dépôt. Cet ajustement morphologique se stabilise autour des valeurs moyennes de ces processus, il peut se mesurer à l'aide de paramètres nommés **variables de réponse** dont :

- la pente du lit du cours d'eau ;
- la largeur de plein bord ;
- la profondeur de plein bord ;
- le style fluvial...

Les échelles spatio-temporelles sur lesquelles interviennent les processus morphodynamiques d'un cours d'eau se situent à plusieurs niveaux :

- Le réseau hydrographique ;
- Les segments de cours d'eau ;
- Les tronçons ;
- Les formes dont les macroformes de type dunes et bancs, et microformes de type colmatage de galets.

La figure ci-dessous représente les échelles spatiales et temporelles des évolutions morphologiques fluviales, indiquant les disciplines d'étude impliquées.



Source : (Chapuis, 2012)

Figure 2-2 : Echelles spatiales et temporelles des ajustements des formes fluviales

Les facteurs hydrauliques associés à la dynamique morphogène des cours d'eau sont liés à l'échelle spatiale et temporelle des phénomènes étudiés. Dans tous les cas il est intéressant d'évaluer les débits relatifs à ces phénomènes.

Dans cette étude, l'évolution hydromorphologique de la Dordogne comme support important d'accueil du milieu aquatique (cf. Figure 2-1) est étudiée. Le secteur d'étude entre Argentat et la confluence avec la Vézère s'étend sur un linéaire d'environ 170 km de cours d'eau.

Comme indiqué sur la figure ci-dessus l'échelle spatiale et temporelle des phénomènes analysés pour la Dordogne intègre l'étude de l'évolution de la largeur et de la profondeur du chenal sur quelques dizaines d'années, l'évolution des formes du lit du cours d'eau sur une dizaine à une centaine d'années, et l'évolution de la longueur d'onde des méandres sur une centaine d'années.

Dans ce contexte de dynamique spatiale et temporelle, en tenant compte de la complexité de la dynamique d'évolution d'un écosystème, les 60 années écoulées depuis la construction des aménagements hydroélectriques s'intègrent dans l'échelle de temps de la présente analyse. Ainsi des modalités de gestion de l'eau adaptées et accompagnées d'un suivi de leurs effets peuvent être proposées pour favoriser l'équilibre de la dynamique de l'écosystème sur la Dordogne.

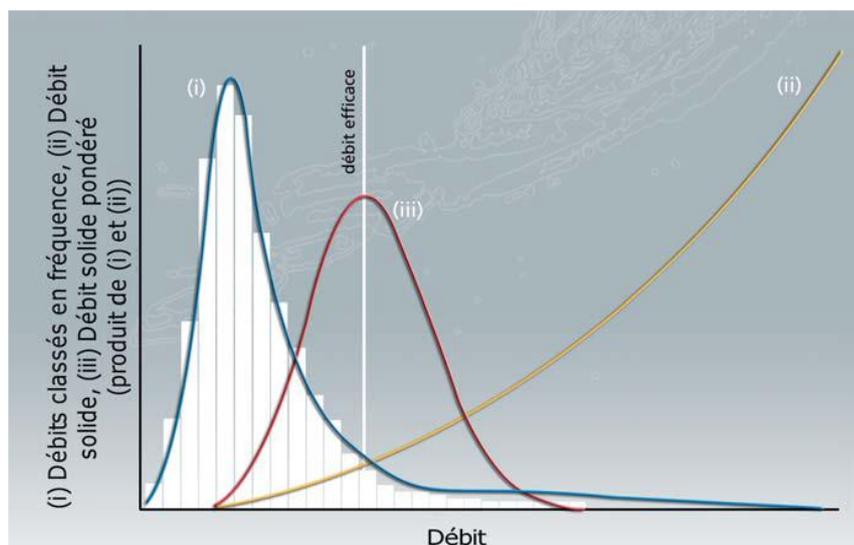
Dans sa thèse, M. Chapuis (Chapuis, 2012) distingue les gammes de débits suivants pour la mobilité de matériaux grossiers :

- **Le débit d'entraînement** ou le débit seuil de mise en mouvement correspondant à la mise en mouvement de particules par charriage ;
- **Le débit morphogène** correspondant à la mise en mouvement de macroformes et des berges ;
- **Le débit dominant** étant le plus efficace en termes de quantité de matériaux transportés.

La notion de transport généralisé est aussi introduite pour définir la mobilisation d'une quantité importante de matériaux sur une certaine épaisseur. Ce transport généralisé est la condition de transport longitudinal entre formes (par exemple entre berge et banc ou entre bancs) et dans le réseau hydraulique du cours d'eau.

L'étude portera sur l'analyse des débits morphogènes de la Dordogne sur le secteur d'étude, définis aussi comme étant ceux qui façonnent le lit au gré des crues successives.

La détermination des débits morphogènes pourrait se définir en établissant les courbes exposées sur la figure suivante :



Source : (Malavoi, Garnier, Landon, Recking, & Baran, 2011)

Figure 2-3 : Détermination du débit morphogène d'un cours d'eau

La courbe (iii) en rouge, représentant la distribution des débits solides transportés, montre que les crues les plus extrêmes ne sont pas forcément les plus efficaces pour le transport de sédiments. Pour établir ce type de courbes sur le secteur d'étude de la Dordogne, il faudrait identifier les différentes distributions granulométriques en présence pour calculer un débit solide. Aujourd'hui, cet exercice n'est pas réalisable sur tout le secteur par manque de données sur ces distributions granulométriques présentes.

Dans la suite de l'étude, afin d'avoir une première idée de la dynamique sédimentaire de la Dordogne, le débit morphogène sera assimilé au **débit de plein bord**, déterminé par une modélisation hydraulique (cf. §5 pour les valeurs de débits et cf. §10 Annexe 1 pour la modélisation).

A l'échelle spatiale des particules, le paramètre hydraulique permettant de définir les conditions de leur mise en mouvement est la contrainte de cisaillement au fond du lit. Comme détaillé par Malavoi et Bravard (Malavoi & Bravard, Elements d'hydromorphologie fluviale, 2010), il existe en théorie un seuil à partir duquel les particules sont mises en mouvement. Sous l'hypothèse d'un écoulement graduellement varié, le **débit d'entraînement** peut être déduit de cette contrainte connaissant la hauteur d'eau, le coefficient de Strickler et la pente du lit.

La capacité de transport sédimentaire d'un cours d'eau est proportionnelle à la contrainte de cisaillement τ (notée aussi contrainte de frottement, exprimée en Pa) exercée par l'écoulement sur le fond du lit. Le débit nécessaire à la mise en mouvement du substrat par charriage est exprimé par le critère de Shields. La relation ci-dessous représente, dans le cadre d'une modélisation filaire 1D des écoulements, le **paramètre de Shields** :

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D}$$

Où g est l'accélération due à la gravité

ρ_s, ρ sont respectivement la masse volumique des particules et de l'eau

D le diamètre des particules

Si la valeur de τ^* dépasse un certain seuil alors les particules sont entraînées et le charriage peut commencer.

Selon les données disponibles dans le chapitre 2 du manuel (Degoutte, 2012), ainsi que (Parker, 2004), les valeurs seuil du paramètre de Shields sont les suivantes :

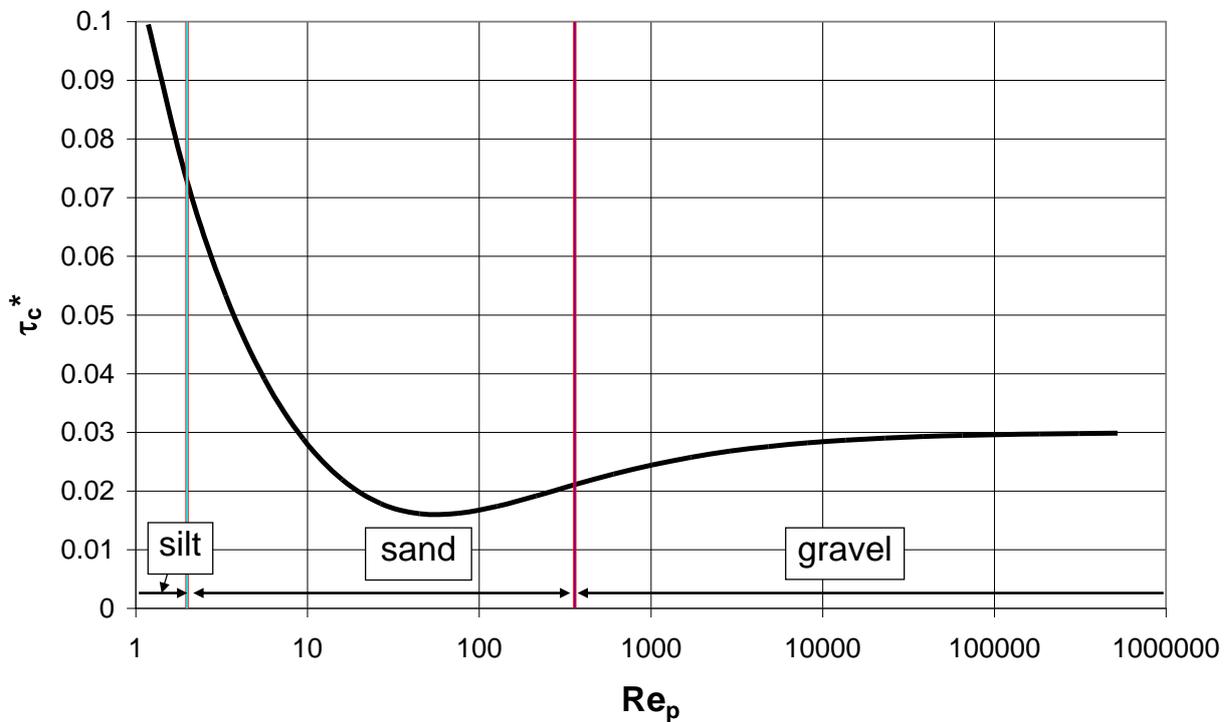
Une classification pratique est proposée par Ramette [56] :

- pour $\tau^* < 0,027$	le grain de diamètre d est au repos ; le fond est plat ;
- pour $0,027 < \tau^* < 0,047$	il y a apparition des tous premiers mouvements, mais pas assez pour générer un débit solide ;
- pour $0,047 < \tau^* < 0,062$	le grain est charrié sur fond plat ;
- pour $0,062 < \tau^* < 0,25$	le grain est charrié par dunes ;
- pour $0,25 < \tau^* < 2,5$	le grain est transporté par dunes en suspension ;
- pour $\tau^* > 2,5$ environ	le grain est transporté en suspension sur fond plat.

Source : Guide d'hydraulique fluviale de M Ramette, 1981 et Degoutte 2012

Figure 2-4 : Classification des valeurs seuil de paramètre de Shields

La prise en compte du diamètre des particules dans l'établissement des valeurs seuil du paramètre de Shields fait intervenir le nombre de Reynolds particulaire. Ce nombre lie le diamètre des particules et la nature turbulente de l'écoulement au fond du lit.



Source : Parker, 2004

Figure 2-5 : Modélisation des valeurs seuil de paramètre de Shields en fonction du nombre de Reynolds particulaire (Re_p)

Le nombre de Reynolds particulaire se calcule par la relation

$$Re_p = \frac{\sqrt{Rg}(D)^{3/2}}{\nu}$$

Où D est le diamètre de la particule
 g l'accélération due à la gravité
 ν la viscosité cinématique de l'eau

$$R = \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \cong 1,6$$

Dans cette étude, l'étendue du diamètre des particules considérées est telle que la **valeur seuil du paramètre de Shields** est de l'ordre de **0,03** (classe 'gravel').

Différentes formules de transport basées sur le critère de Shields sont décrites dans l'ouvrage de Malavoi et Bravard (Malavoi & Bravard, Elements d'hydromorphologie fluviale, 2010). Elles ne sont pas mobilisées dans le cadre de cette étude par manque de données précises sur les distributions granulométriques.

2.2 Mécanismes du transport sédimentaire

La mobilité des particules grossières sur un banc est caractérisée soit par un mouvement de type « tapis roulant » ou par un mouvement plus profond que la couche superficielle selon les cas.

M. Chapuis (Chapuis, 2012) décrit les conditions de ces mécanismes de transport sédimentaire par charriage.

En notant Q_c le débit de début de mobilité des particules, deux mécanismes sont identifiés :

1. Si le débit Q est très inférieur à Q_c alors le transport de type « tapis roulant » pourrait mobiliser certaines classes de granulométrie en un mouvement superficiel. Ce sont les particules de la classe D_{90} qui sont concernées ici.
2. Si le débit Q est très supérieur à Q_c , le même mécanisme se met en place mais en ajoutant aussi des interactions entre particules, ce qui conduit à une mobilité sur une plus grande épaisseur. Dans ce cas, l'auteur précise que cette mise en mouvement implique des changements morphologiques significatifs du lit et la mobilité est dite « morphogène ».

Le premier type de mobilité indiqué ci-dessus pourrait aussi être morphogène dans la mesure où le débit serait proche de Q_c sur une durée assez longue (plusieurs semaines).

Les conditions hydrauliques de déplacement d'une nappe de charriage épaisse, notée dune graveleuse par Malavoi (Malavoi, Garnier, Landon, Recking, & Baran, 2011), sont beaucoup plus complexes à déterminer car les propriétés mécaniques du déplacement de l'interface de déplacement de l'ensemble de la dune ne sont pas bien décrites.

A l'échelle d'un tronçon de cours d'eau, Parker (Parker, 2004) montre le lien entre les caractéristiques sédimentaires du lit et les conditions hydrauliques d'écoulement de plein bord. Les indicateurs de référence suivants sont introduits (ils sont repris aussi par Malavoi et Bravard) à partir du diamètre médian du substrat du lit D_{50} :

$\hat{B} = \frac{B_b}{D_{50}}$, la largeur de plein bord adimensionnelle, B_b étant la largeur de plein bord ;

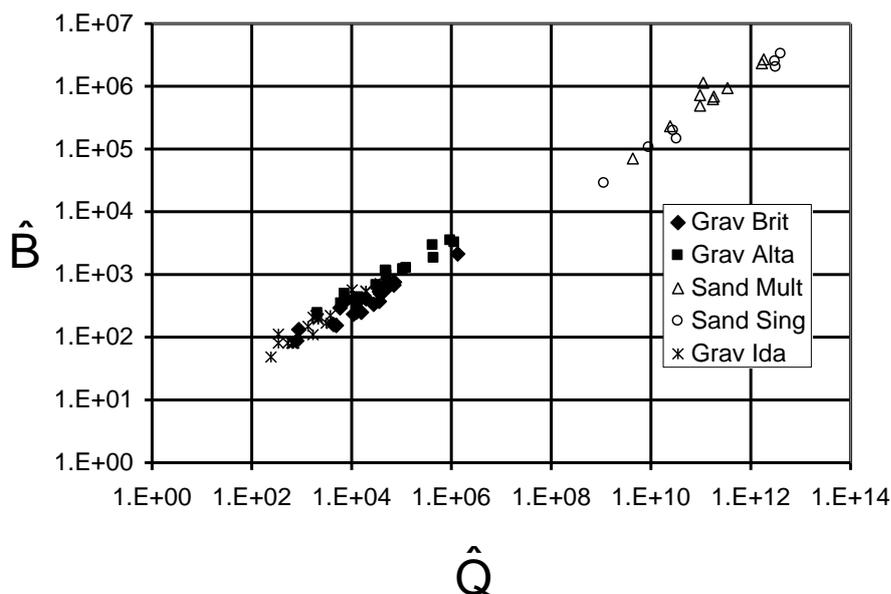
$\hat{H} = \frac{H_b}{D_{50}}$, la hauteur d'eau de plein bord adimensionnelle, H_b étant la hauteur d'eau de plein bord ;

$\hat{Q} = \frac{Q_b}{D_{50}^2 \sqrt{g D_{50}}}$, le débit de plein bord adimensionnel, Q_b étant le débit de plein bord ;

Un ensemble de rivières a été analysé de manière à calculer les grandeurs caractéristiques de plein bord définies ci-dessus : deux ensembles provenant d'Alberta au Canada (Kellerhals, Neill, & Bray, 1972) et les autres provenant du Japon (Fujita, Yamamoto, & Akabori, 1998).

Les résultats obtenus par Parker ont été établis à partir de cours d'eau de référence, considérés en équilibre hydromorphologique, non soumis à des modifications anthropiques fortes (extraction de granulats, aménagements hydroélectriques, recalibrage du lit...).

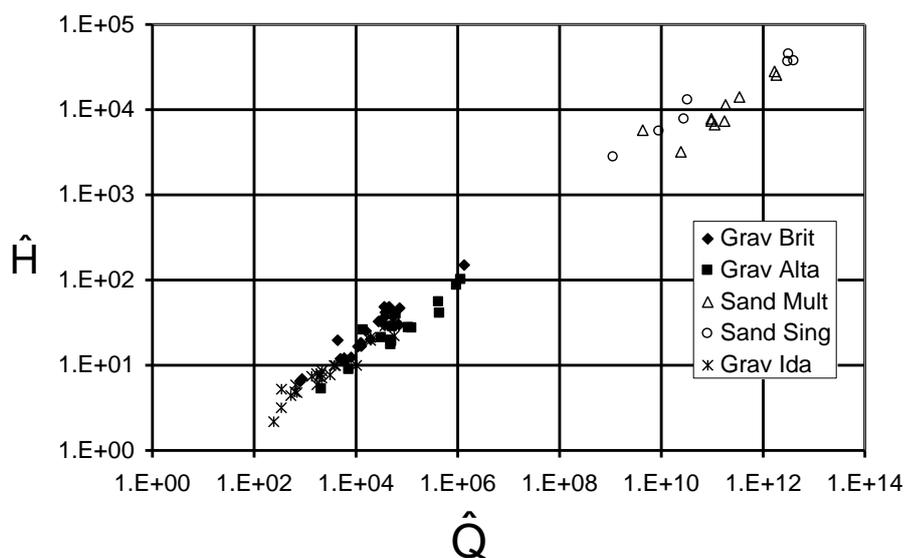
La figure ci-après représente la relation entre \hat{B} et \hat{Q} pour un échantillon de rivières à charge grossière ($D_{50} \geq 16$ mm, notées Grav) et à charge sableuse ($D_{50} \leq 2$ mm, notées Sand) :



Source (Parker, 2004)

Figure 2-6 : Largeur de plein bord adimensionnelle en fonction du débit de plein bord adimensionnel

La figure ci-dessous représente la relation entre \hat{H} et \hat{Q} pour un échantillon de rivières à charge grossière et à charge sableuse :



Source (Parker, 2004)

Figure 2-7 : Hauteur de plein bord adimensionnelle en fonction du débit de plein bord adimensionnel

Les conditions hydrauliques de plein bord sont donc structurantes vis-à-vis de la morphologie du cours d'eau pour le débit Q , la hauteur d'eau H , la largeur B et le diamètre médian D_{50} des sédiments formant le lit mineur.

Parker montre, cependant, que la relation entre le débit de plein bord et la pente du fond du lit à l'échelle d'un tronçon est moins marquée, et l'explique par le fait que la pente du lit dépend aussi d'autres paramètres comme la géologie du bassin versant du cours d'eau.

Les droites de régression issues des deux graphes précédents, en échelle logarithmique, permettent d'établir les relations suivantes pour \hat{B} et \hat{H} en fonction de \hat{Q}

$$\hat{B} = \begin{cases} 4.87 \hat{Q}^{0.461}, \text{ lit charge grossière} \\ 0.274 \hat{Q}^{0.565}, \text{ lit sableux} \end{cases}$$

$$\hat{H} = \begin{cases} 0.368 \hat{Q}^{0.405}, \text{ lit charge grossière} \\ 3.01 \hat{Q}^{0.321}, \text{ lit sableux} \end{cases}$$

L'étude hydraulique présentée au chapitre 5 permettra de positionner la Dordogne parmi les rivières de référence présentées ci-dessus, et d'analyser, selon le résultat, l'équilibre ou le déséquilibre hydromorphologique de cette rivière.

Le cas des conditions hydrauliques de **l'érosion des berges** est étudié sur la Durance par M. Chapuis (Chapuis, 2012). Les observations suivantes sont issues de prises de mesures de mobilité des sédiments par traçage RFID (radio frequency identification) :

1. Un départ de matériau au pied de la berge est observé, de manière aléatoire, à la façon d'un affouillement ;
2. L'affouillement du pied de berge entraîne un net recul de celle-ci par effondrement de la terrasse alluvionnaire ;
3. Les sédiments provenant des berges participent au mouvement inter-formes du lit du cours d'eau.

Ces différentes étapes de reprise de sédiments sur les berges ont été observées dans des conditions hydrauliques très variées et nécessitent une analyse au cas par cas. La détermination d'un débit d'érosion des berges est difficilement généralisable.

Les mécanismes du transport sédimentaire présentés ci-dessus fondent l'analyse des phénomènes morphogènes à grande échelle.

La notion de débit morphogène intervient dans le contexte du transport de sédiment comme valeur seuil impliquant un transport suffisant pour modifier la morphologie du cours d'eau à l'échelle d'un tronçon et sur une durée suffisamment grande.

2.3 Mobilité des macroformes sédimentaires

La mobilité longitudinale des formes le long du cours d'eau a été vue dans le paragraphe précédent en lien avec les débits morphogènes : le débit de plein bord est structurant, en lien avec la largeur du cours d'eau à l'échelle d'un tronçon, la hauteur d'eau correspondante et le substrat associé.

Les éléments présentés dans ce paragraphe ne sont pas mobilisés dans cette étude pour la Dordogne, ils sont présentés à titre indicatif comme une perspective d'analyse avec des données complémentaires. Cependant il sera vu que l'analyse diachronique présentée au §4 apporte déjà des informations sur la mobilité du lit de la Dordogne et permettra d'identifier des tronçons où une étude plus poussée pourra être utile. L'estimation du débit solide sur un tronçon repose sur une analyse de la distribution des sédiments présents selon leur taille, et leur déplacement peut être étudié conjointement à une analyse du comblement des anciennes fosses d'extraction de granulats.

La mobilité latérale du lit et des berges est en général repérée par analyse diachronique d'une bande active du lit à partir de photos aériennes, cela permet d'identifier la variabilité spatiale de ce phénomène.

La variabilité temporelle des mouvements latéraux est analysée par M. Chapuis (Chapuis, 2012) en introduisant un indice de mobilité associé à une année donnée. Les données mobilisées dans cette partie des travaux de M. Chapuis sont une analyse fine, par SIG, de différentes séquences de photos aériennes, permettant d'évaluer différents types de mobilité latérale et leur vitesse.

Le point de départ de cette analyse est le constat que la dynamique fluviale dépend de l'hydrologie de l'année en cours mais aussi de celle des années précédentes.

L'intervalle de temps entre les crues successives est important, comme leur intensité.

Dans le cas de la Durance, l'indice de mobilité d'une année est calé de telle sorte que l'effet de l'hydrologie d'une année donnée dure pendant environ 4 ans.

Cet indice est présenté comme un indicateur de la variation de la mobilité latérale relativement d'une année sur l'autre, l'analyse des autres facteurs de contrôle de la mobilité latérale comme la géométrie de la sinuosité du lit doit être analysée par ailleurs.

Dans le cas de l'étude de la Durance, des disparités spatiales sont apparues lors de l'analyse de l'indice de mobilité. M. Chapuis précise que des formes structurelles du lit sont identifiables selon les tronçons et conditionnent la dynamique d'évolution du lit.

Le facteur hydrologique de la mobilité latérale du lit est identifiable de manière relative grâce à l'indice de mobilité, mais reste difficile à quantifier dans le cas général parce que, lors de l'analyse de données mesurées sur le terrain, la part de la mobilité venant du débit solide amont est difficilement séparable de l'influence du débit liquide au sens strict.

2.4 Conclusion

L'objectif de cette étude est de qualifier les débits morphogènes et la capacité érosive de la Dordogne sur un secteur d'étude de 170 km de linéaire.

Les éléments théoriques présentés dans ce chapitre, utiles pour élaborer des éléments de réponse, sont les suivants :

- L'échelle spatio-temporelle des phénomènes analysés est importante (Figure 2-2)
En effet la mobilité à l'échelle des méandres (latérale et longitudinale) se mesure sur une durée de l'ordre de la centaine d'années (traitée dans le § 4), tandis que celle des macroformes se déroule sur des périodes de quelques années à la dizaine d'années et sur quelques dizaines à centaines de mètres (traitée chapitres 5, 6 et 10).
- Les conditions hydrauliques de plein bord sont structurantes vis-à-vis de la morphologie du cours d'eau pour le débit, la hauteur d'eau, la largeur et le diamètre médian des sédiments formant le lit mineur. Le débit de plein bord sera identifié au débit morphogène dans toute l'étude. La dynamique fluviale à l'état d'équilibre sera analysée dans le cas de la Dordogne, et comparée à la situation de grands cours d'eau de référence.
- La modélisation hydraulique du secteur d'étude permettra d'estimer sur des tronçons d'environ 10 km : les hauteurs et largeurs de plein bord de la Dordogne, la contrainte de cisaillement au fond τ , le critère de Shields en fonction des diamètres de sédiments et enfin les diamètres théoriques maximums des particules mobilisables.

L'évaluation du débit solide de la Dordogne en fonction du débit liquide n'est pas exposée par manque de données sur tout le secteur d'étude. La mobilité du lit de la Dordogne sera analysée à travers l'analyse diachronique exposée au § 4.

3 ANALYSE HYDROLOGIQUE DE LA DORDOGNE

3.1 Les stations de la Banque HYDRO

La Banque HYDRO donne accès à une grande quantité d'information hydrométrique quantitative (débits), fournie par les DREAL (Aquitaine, Auvergne, Limousin, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes). Certaines stations EDF sont aussi consultables sur la Banque HYDRO.

Sur la zone d'étude, plusieurs stations de mesure permettent d'étudier les régimes hydrologiques de la Dordogne. La carte des stations en service, disposant d'un historique assez long pour permettre l'analyse hydrologique et l'impact des aménagements hydroélectriques, est présentée ci-dessous.

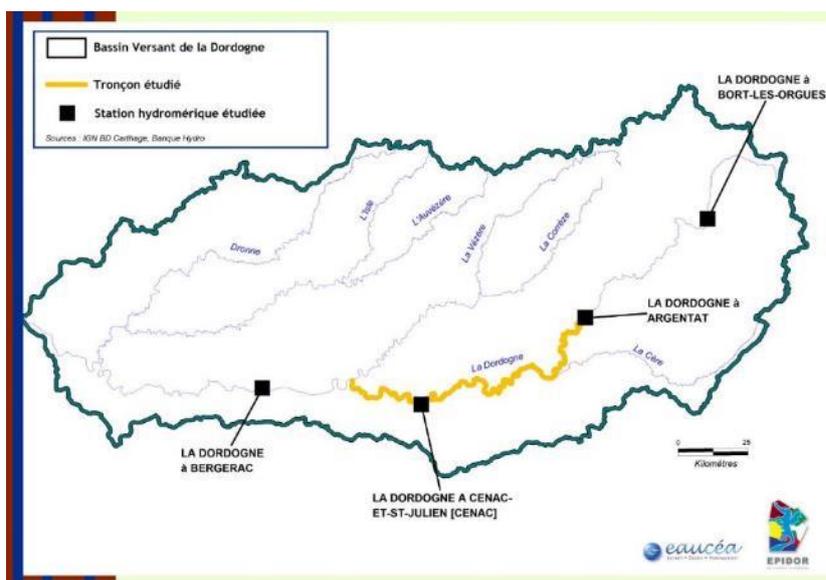


Figure 3-1 : Secteur d'étude et stations hydrométriques

La carte ci-dessous représente le réseau hydrographique du secteur d'étude, d'Argentan en amont à la confluence avec la Vézère en aval :

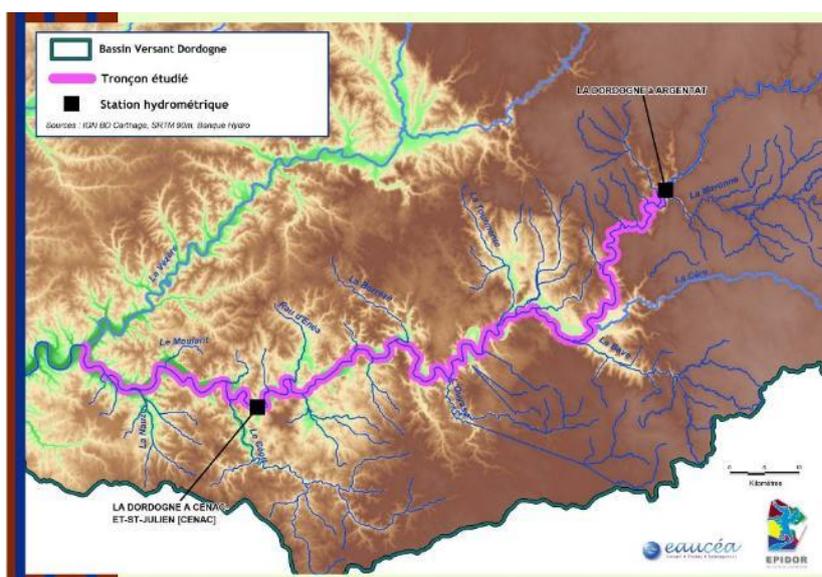


Figure 3-2 : Réseau hydrographique du secteur d'étude Argentan-Limeuil

3.2 L'Aménagement hydroélectrique du bassin de la Dordogne

3.2.1 Présentation des aménagements

3.2.1.1 Schéma hydraulique du bassin

La Dordogne et les principaux affluents issus des reliefs du massif central, ont été équipés d'un important parc d'aménagement hydroélectrique qui rend ce bassin stratégique pour l'équilibre du réseau hydroélectrique français.

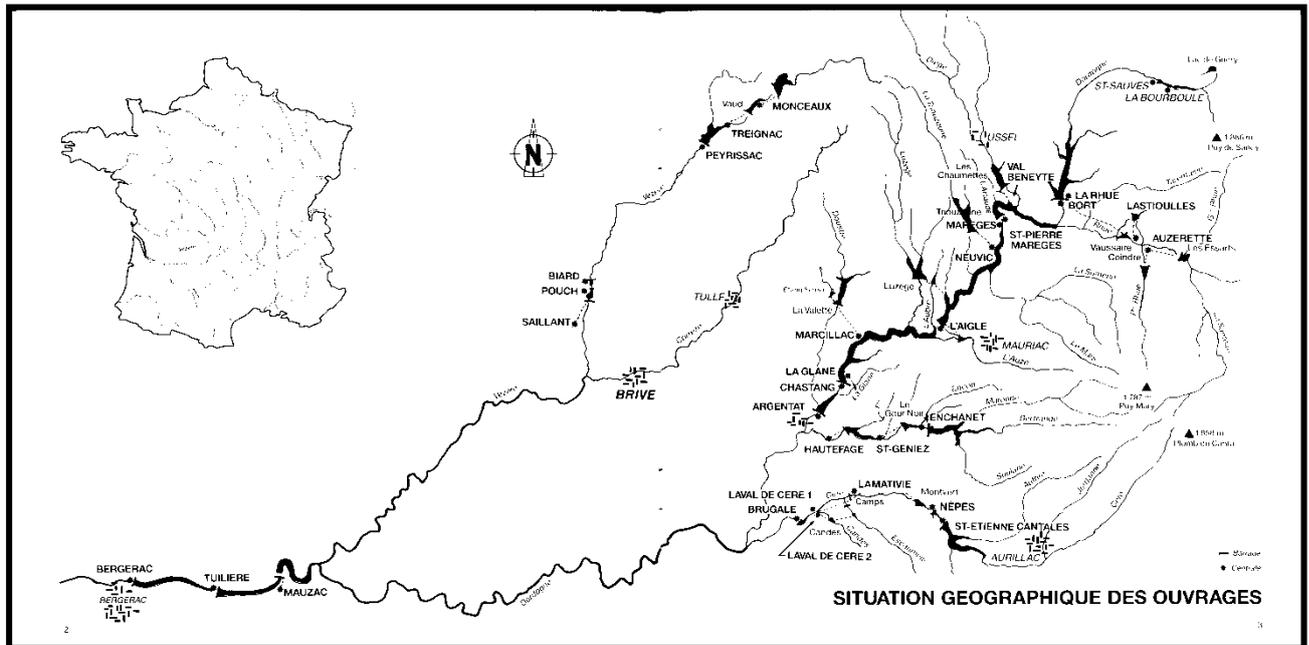


Figure 3-3 : Carte des ouvrages hydroélectriques sur la partie amont du bassin de la Dordogne

3.2.1.2 Principe de gestion

La puissance électrique susceptible d'être injectée sur le réseau à tout instant est le premier argument technique et économique des centrales hydroélectriques de lac. Aucune autre source d'énergie ne présente une telle disponibilité ; ceci confère à l'hydroélectricité un rôle stratégique de premier plan pour la sécurité du réseau de distribution d'électricité renforcé.

L'équipement de la Haute Dordogne se caractérise par des volumes stockés très importants et par des hauteurs de chutes moins fortes que dans les grands équipements alpins ou pyrénéens.

Cette faiblesse relative est donc compensée par des débits maxima turbinés qui sont parmi les plus importants au niveau national. Ainsi l'Aigle et Chastang peuvent turbiner jusqu'à 550 m³/s, soit plus de cinq fois le débit moyen de la Dordogne à Argentat et équivalent à 75% du seuil d'alerte aux crues.

3.2.2 Le contrôle hydrologique de la Dordogne

La principale conséquence de cet équipement très important est le contrôle des débits sur l'essentiel du bassin de la Dordogne aval. Ainsi on estime que les grands barrages contrôlent 49% du bassin de la Dordogne à Bergerac et que 61% des volumes transitant à Bergerac sont passés par une grande retenue. Ce taux de maîtrise hydrologique, et donc potentiellement d'artificialisation du régime, est le plus important d'Adour Garonne.

Les modalités de gestion des grands ouvrages sont donc déterminantes pour les débits à l'aval. Grâce à la capacité de stockage des grands barrages, les débits turbinés sont placés au moment économiquement le plus favorable dans le cycle de la journée, de la semaine et des saisons. Pour optimiser sa production, le gestionnaire de retenue doit être sans cesse plus attentif à l'environnement économique du marché de l'énergie.

Le régime hydrologique de la Dordogne à l'aval d'Argentat est de type pluvial, caractérisé par une seule alternance annuelle de hautes et de basses-eaux, le bassin étant principalement alimenté par les précipitations. La figure ci-après représente le débit médian à Argentat, c'est-à-dire dépassé une fois sur deux, et montre le contrôle hydrologique de la Dordogne par l'équipement du Sablier (340 m³/s sur 4 turbines) : depuis l'implantation des grands barrages, la période de hautes-eaux s'est décalée vers les mois d'hiver (forte consommation énergétique), et la fin d'étiage s'opère plus tôt avec une remontée des débits dès septembre, avec la création d'un palier avant la période hivernale. Il est vrai que ce régime recouvre idéalement le régime de la demande en énergie électrique. C'est ce qu'illustrent les deux graphes ci-dessous qui montrent qu'à l'échelle annuelle, la période de forte hydraulité naturelle correspond à la période de forte demande énergétique.

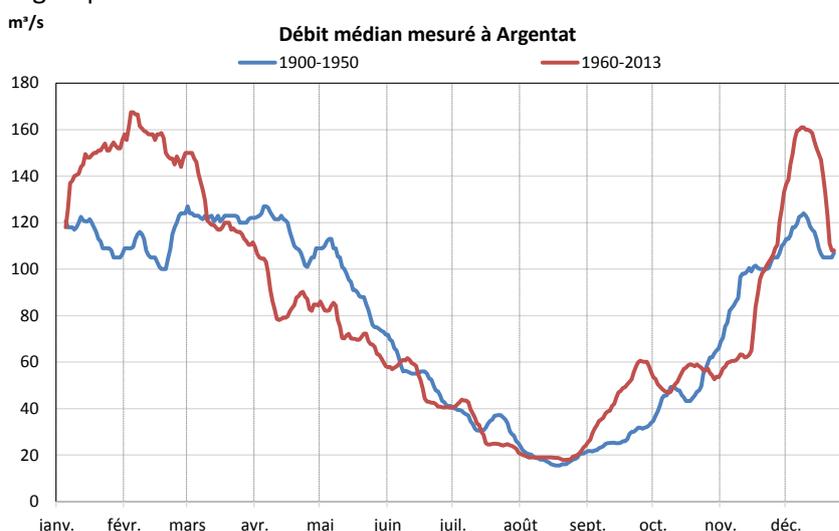


Figure 3-4 : Régimes hydrologiques annuels avant et après aménagement hydroélectrique

A l'échelle de l'année, le régime naturel des eaux (débit mesuré avant 1950) et le régime de la demande en énergie sont globalement synchrones. La gestion de stock permet cependant d'accentuer ce régime en renforçant les volumes turbinés l'hiver, ce qui a tendance à "vider" les retenues sur la période où le risque de crue est maximal.

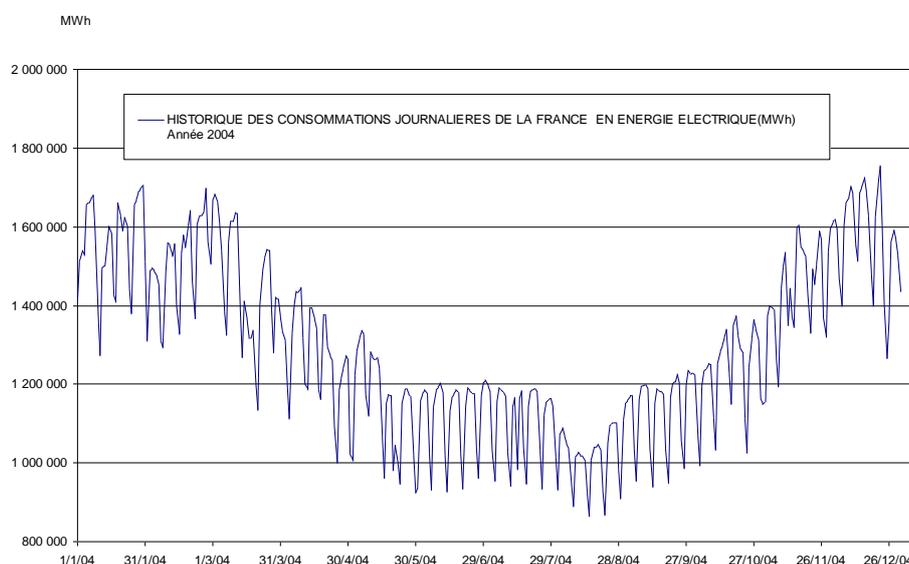


Figure 3-5 : Evolution de la consommation journalière électrique en 2004

3.3 Incidence sur les crues

Les crues sont des phénomènes hydrologiques majeurs qui imposent pour les gestionnaires d'ouvrage une gestion sécuritaire de l'événement. L'objectif général vise la sécurité des infrastructures hydrauliques et la non-aggravation de la crue en aval.

Chez les gestionnaires d'ouvrages hydroélectriques, un service hydrométéorologique anticipe l'effet de fortes précipitations ce qui permet une mise en alerte du personnel. Lorsqu'une crue arrive, le gestionnaire suit le remplissage de la retenue et, en fonction des gradients de montée de la côte dans le plan d'eau et du volume de crue attendu en amont, engage différentes procédures d'ouverture de vanne qui garantissent un passage contrôlé des débits non stockables. Le volume de crue entrant se décompose donc en trois parts :

1. Une part qui correspond au remplissage complet de la retenue et qui sera donc stockée. Cette part dépend du remplissage initial de la retenue et du volume de "creux" disponible en début de crue. Ces volumes seront valorisés énergétiquement ultérieurement. Il contribue à la réduction du volume vers l'aval (comme le ferait un champ d'expansion des crues);
2. Une part des volumes transitant peut bien sûr être turbinée et valorisée sur le plan énergétique pendant la crue elle-même. Sur la Dordogne le débit turbinable sur l'essentiel de la chaîne est estimé à environ 550 m³/s;
3. Si les volumes entrant excèdent les capacités de stockage et de turbinage, alors cet excédent est géré par déversement ou au niveau des vannes de crue. Cette part de volume n'est pas valorisée énergétiquement.

Enfin, notons qu'un laminage partiel de la crue peut être obtenu au niveau des plans d'eau par un simple phénomène hydraulique. Par ailleurs, l'augmentation des débits entrant dans la retenue se transmet quasi instantanément de la queue de retenue aux vannes du barrage du fait de la montée uniforme du plan d'eau ; il est donc possible que les grands barrages de la Dordogne aient une incidence sur le temps de propagation de la crue, en accélérant celui-ci à la traversée des plans d'eau. Ce phénomène d'accélération entre en relation avec celui d'écèlement, ce qui complique la compréhension des débits observés en sortie de chaîne.

3.3.1 Historique de l'aménagement et statistiques de crue

Le programme de construction de ces équipements est relativement concentré dans le temps, et permet de distinguer deux états du bassin : avant 1950 un état quasi naturel, et après les années 50 un état fortement influencé par les aménagements.

La mise en parallèle de l'évolution des cumuls stockés avec l'historique des crues annuelles, mesurés à Argentat, est intéressante : depuis la mise en service des barrages de Chastang et surtout de Bort-les-Orgues en 1952, i.e. depuis 63 ans, plus aucune crue à Argentat n'a dépassé le niveau de 880 m³/s (crue de 1955).

Ce fort niveau d'artificialisation a fondamentalement modifié la statistique des débits de crue.

Le tableau suivant présente la statistique de crues de la Dordogne à Argentat, avant et après 1952 et montre une réduction de l'amplitude des débits de crue de l'ordre de 40% :

Débit de crue à Argentat (Méthode de Gumbel) - m ³ /s BV = 4420 km ²			
Période de retour (années)	Avant 1952	1952-2013	Taux de réduction du débit de crue
2	711	381	46%
5	1023	607	41%
10	1230	756	39%
20	1428	900	37%
50	1685	1085	36%

Tableau 3-1 : Statistiques de crues de la Dordogne à Argentat

Le graphique suivant présente l'évolution des débits de crue annuels, rapportée à la statistique de crue sur la période avant 1952 dite « naturelle ». En 62 ans, aucune crue n'a atteint la crue quinquennale historique « naturelle ».

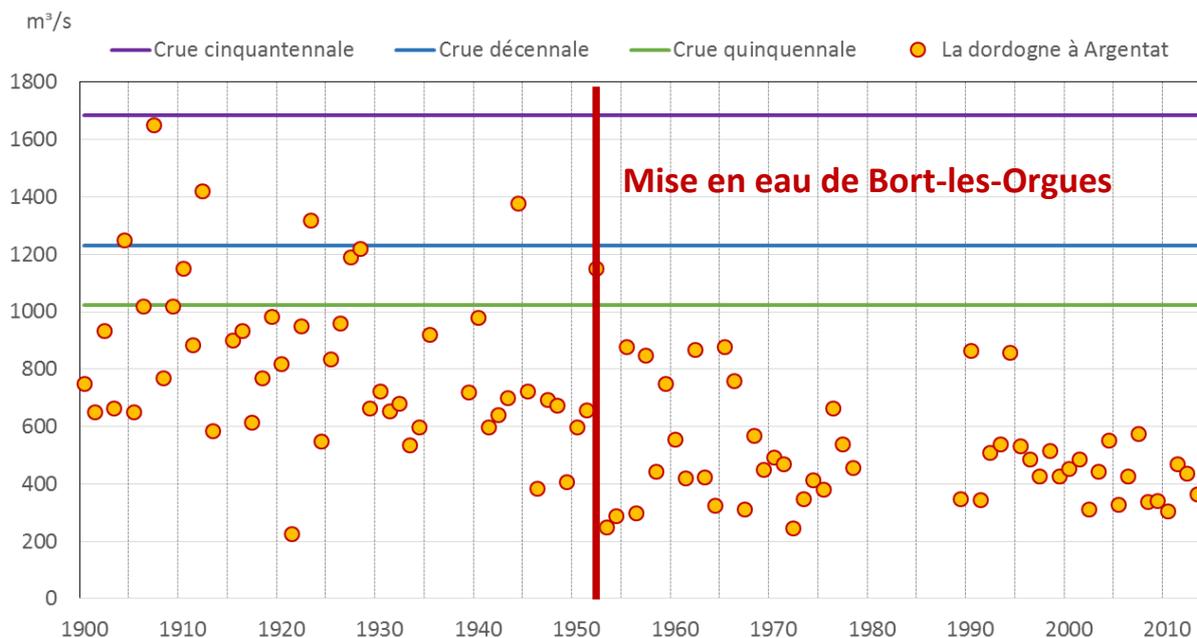


Figure 3-6 : Historique des crues journalières annuelles entre 1900 et 2013 à Argentat

En dissociant la chronique de crues annuelles à Argentat en deux séries, avant et après 1952, puis en recalculant sur ces deux chroniques les débits statistiques par la méthode de Gumbel, ceux-ci ont dérivé à la baisse entre les deux périodes.

De même, les aménagements de l’amont du bassin de la Dordogne ont une répercussion plus à l’aval avec un taux de réduction moindre, de l’ordre de 20%, mais tout de même visible. A Cénac, les statistiques de crue avant et après 1952 sont les suivantes :

Débit de crue à Cénac (Méthode de Gumbel) - m ³ /s BV = 8705 km ²			
Période de retour (années)	Avant 1952	1952-2013	Taux de réduction du débit de crue
2	1168	881	25%
5	1437	1186	18%
10	1615	1387	14%
20	1786	1581	11%
50	2007	1832	9%

Tableau 3-2 : Statistiques de crues de la Dordogne à Cénac

Le graphique suivant présente l’évolution des débits de crue annuels, rapportée à la statistique de crue sur la période avant 1952. Le bassin versant à Cénac est le double de celui de la Dordogne à Argentat en superficie : les apports intermédiaires atténuent donc l’impact des aménagements sur l’amplitude des débits avec des crues observées atteignant encore la valeur quinquennale d’avant 1952.

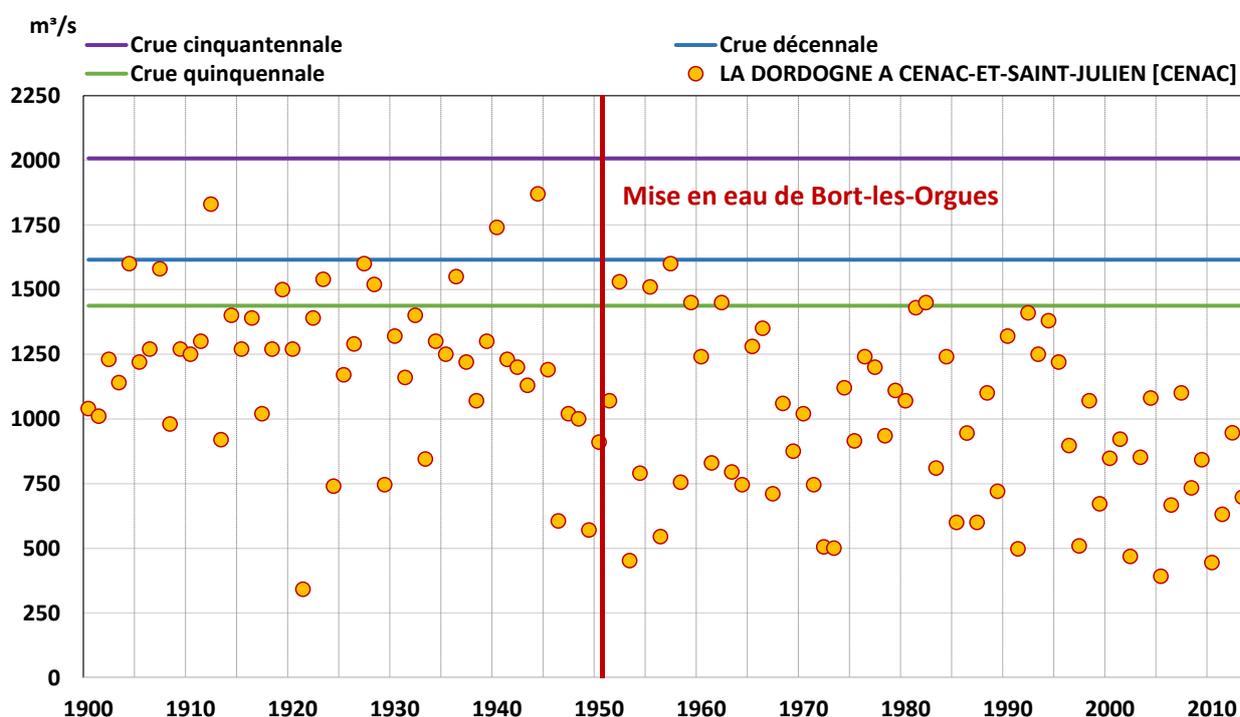


Figure 3-7 : Historique des crues journalières annuelles entre 1900 et 2013 à Cénac

Sur le graphe ci-après, sur lequel les crues sont triées en ordre croissant suivant leur période de retour, les deux séries de mesures sont comparées avec la série prise en entier : logiquement, les trois courbes sont décalées, la courbe "Après 1952" étant bien en dessous de celle de la chronique entière, montrant une diminution des amplitudes de crues après l'implantation des barrages.

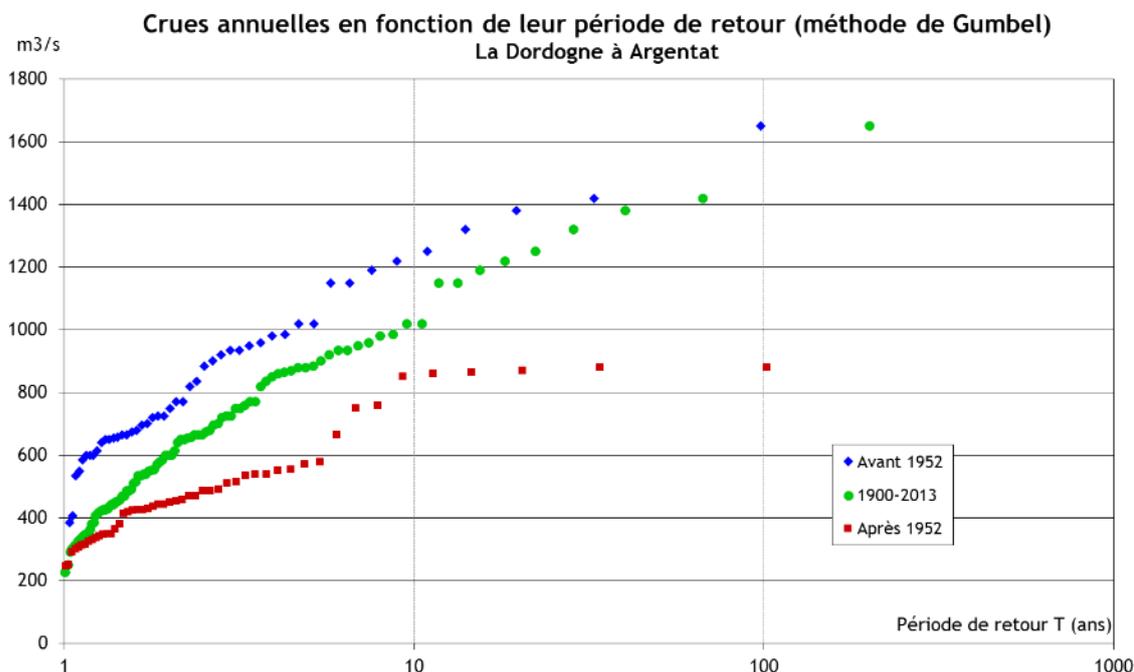
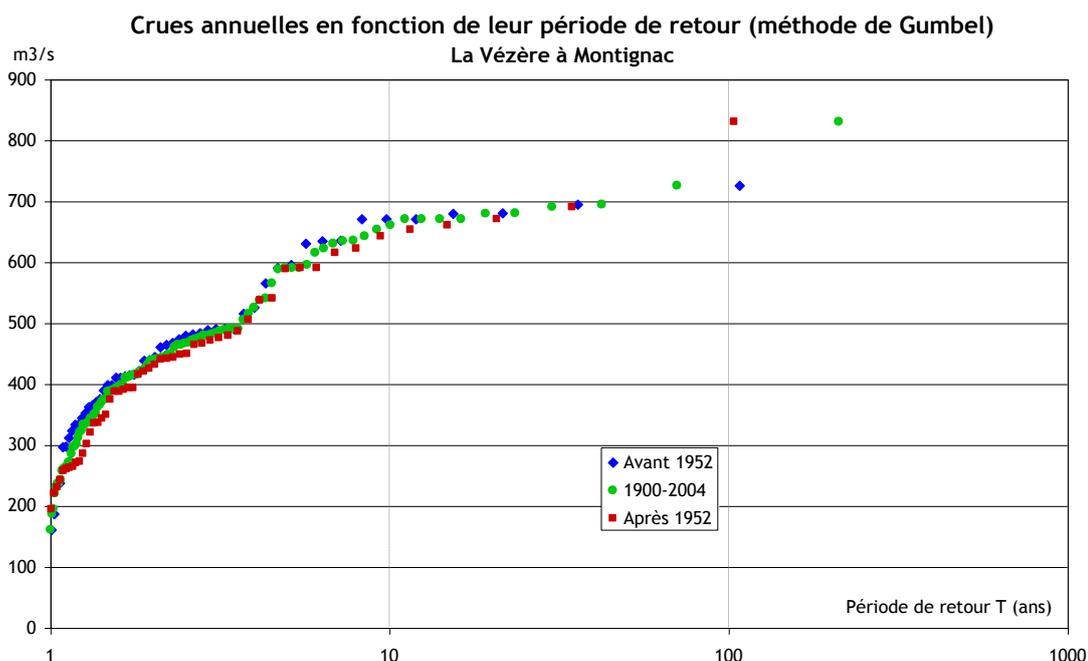


Figure 3-8 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Argentat

Pour comparaison, le même traitement statistique sur le bassin de la Vézère à Montignac (graphe ci-dessous), pour lequel la chronique de mesures est longue, confirme ce phénomène localisé sur Argentat. La distinction des deux périodes avant et après 1952 n'induit pas de modification majeure de la répartition statistique des crues, on ne peut donc pas invoquer une modification de la pluviométrie pour expliquer la dérive statistique mise en évidence avec les débits de crue à Argentat.



Source PAPI Dordogne 2005

Figure 3-9 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Montignac

Un simple ordre de grandeur précise les incidences potentielles de la régulation des grandes crues. La comparaison de ces volumes d'écêtement et les volumes utiles sur le bassin, explique pourquoi ces bassins hydroélectriques ont une réelle et forte incidence sur le régime des crues de la Dordogne, et en particulier des petites crues. Même avec un creux de remplissage de seulement 10 %, la capacité d'écêtement reste considérable. Face à ce phénomène, la nécessité de maintenir une certaine transparence aux crues de l'aménagement hydroélectrique du bassin est parfois évoquée. L'objectif de cette attente est l'entretien hydraulique "naturel" du lit de la Dordogne.

Sur le secteur de la zone d'étude, l'influence des aménagements se fait toujours ressentir, malgré l'augmentation de bassin versant. Les graphiques suivant présentent l'analyse pour les stations de Cénac et à l'aval de la zone d'étude à Bergerac. Les débits n'étant pas disponibles pour Bergerac, l'analyse est faite à partir des hauteurs d'eau.

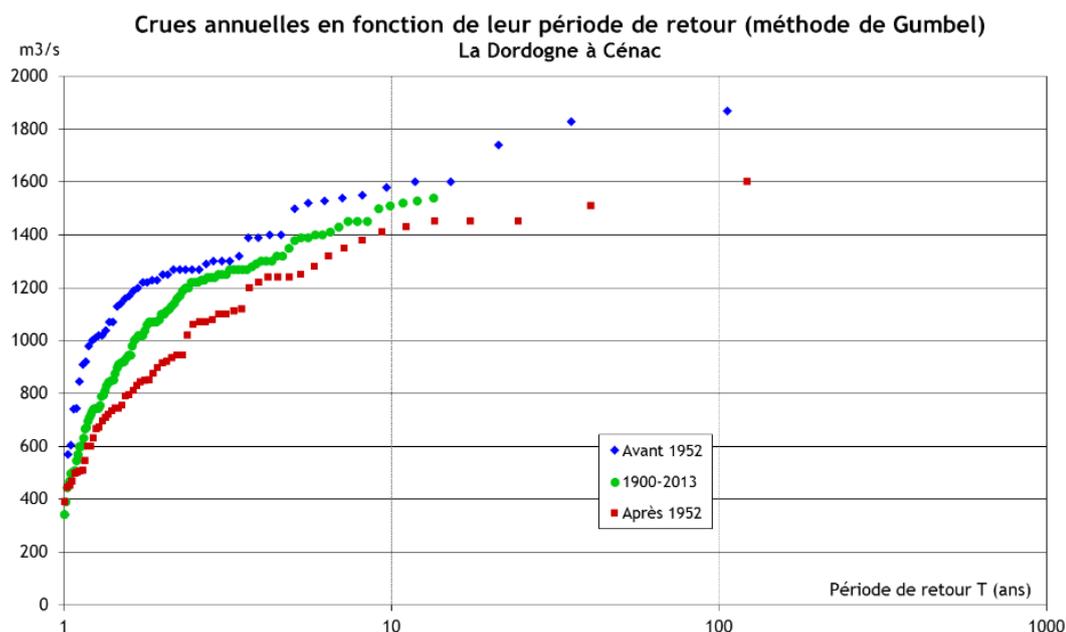


Figure 3-10 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Cénac

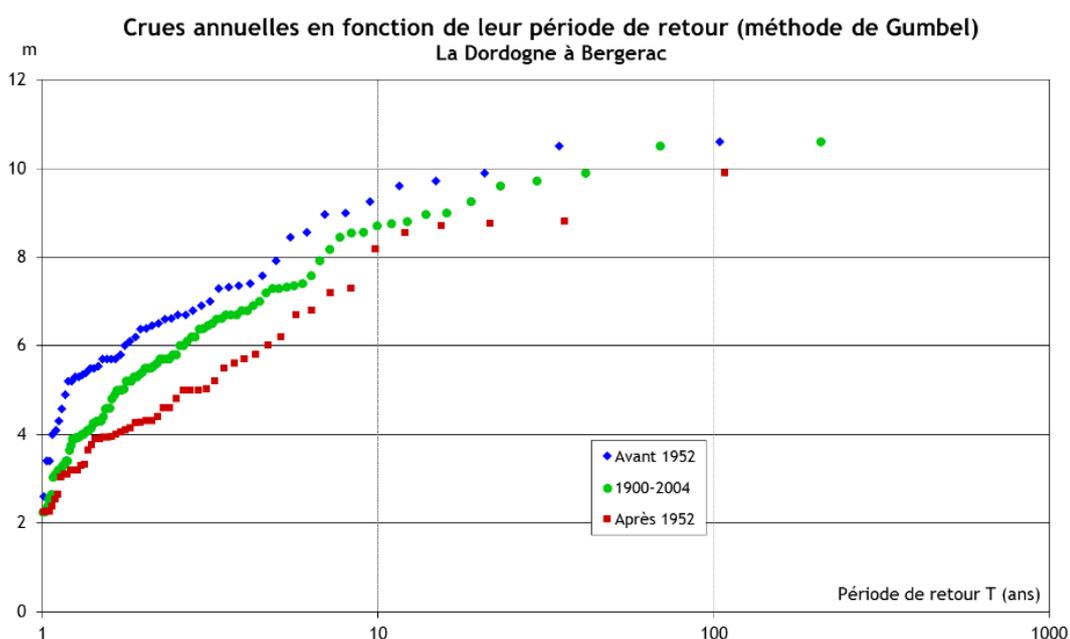


Figure 3-11 : Crues annuelles en fonction de leur période de retour à Bergerac

3.4 Typologie des hydrogrammes

Au-delà de l'analyse des maximums annuels de débit, il est intéressant d'analyser l'ensemble des crues et des montées d'eau significatives pour caractériser la typologie des hydrogrammes. Pour permettre l'analyse sur plus de 100 ans de chroniques, les valeurs de débits moyens journaliers ont été retenues comme donnée d'entrée.

La première étape a porté sur le repérage automatique des variations de débits. Dès cette étape, un certain nombre de partis pris doivent être arrêtés. Pour ce faire, il est nécessaire de repérer chaque min et chaque max de l'hydrogramme ; par définition, ils sont alternés.

Nous avons considéré comme une variation significative toutes les augmentations de plus de 100 % de la valeur du débit entre deux jours consécutifs. Chaque variation ainsi identifiée, il devient possible de les compter et de qualifier leur amplitude.

Les tableaux suivants synthétisent les résultats moyens annuels pour les débits mesurés à Argentat, sur la période 1900-1950 d'une part, et sur la période 1951-2013 d'autre part.

La Dordogne à Argentat (P1350020)						
Module : 106 m ³ /s		Période : du 1 janvier 1900 au 31 décembre 1950				
MOIS	Débit moyen mensuel (m ³ /s)	Nb de hausses significatives (*)	Amplitude moyenne des hausses (m ³ /s)	Amplitude maximale des hausses (m ³ /s)	Débit minimum observé (m ³ /s)	Temps de montée / temps de descente
Janvier	152.5	2	235.9	965.0	10.5	0.38
Février	160.3	1	310.4	1 129.0	4.4	0.51
Mars	165.9	1	275.0	870.0	5.8	0.49
Avril	150.4	1	210.1	834.5	6.6	0.46
Mai	116.5	2	134.7	496.0	3.7	0.43
Juin	76.2	2	111.4	480.0	1.6	0.43
Juillet	50.1	1	98.0	1 099.0	1.6	0.38
Août	37.5	2	80.4	439.0	1.6	0.48
Septembre	45.4	2	84.3	607.0	1.4	0.48
Octobre	70.6	2	127.6	1 502.0	1.4	0.57
Novembre	135.9	2	215.3	904.0	2.3	0.53
Décembre	161.2	2	275.7	1 227.0	1.9	0.57
Année	109.9	20	174.7	1 502.0	1.4	0.465

(*) hausse significative = variation de débit entre un minimum et maximum consécutifs, supérieure à 100%

Figure 3-12 : Synthèse des indicateurs de la typologie des hydrogrammes - Période 1900-1950

La Dordogne à Argentat (P1350020)

Module : 106 m³/s

Période : du 1 janvier 1951 au 31 décembre 2013

MOIS	Débit moyen mensuel (m ³ /s)	Nb de hausses significatives (*)	Amplitude moyenne des hausses (m ³ /s)	Amplitude maximale des hausses (m ³ /s)	Débit minimum observé (m ³ /s)	Temps de montée / temps de descente
Janvier	168.5	3	156.3	776.0	2.2	0.94
Février	164.9	2	156.5	852.1	4.2	0.84
Mars	136.2	2	129.2	496.4	2.3	0.84
Avril	111.6	2	107.0	388.3	2.6	0.87
Mai	94.5	3	93.4	409.0	2.2	0.90
Juin	78.7	2	79.2	425.0	1.8	0.96
Juillet	53.1	1	68.9	283.5	1.2	1.02
Août	35.0	1	64.4	229.5	1.2	0.82
Septembre	60.7	1	78.2	299.2	1.3	0.88
Octobre	76.0	2	99.2	400.6	1.5	0.88
Novembre	108.9	3	119.4	495.0	3.3	0.88
Décembre	155.6	2	148.3	920.0	2.2	0.88
Année	103.4	25	113.4	920.0	1.2	0.892

(*) hausse significative = variation de débit entre un minimum et maximum consécutifs, supérieure à 100%

Figure 3-13 : Synthèse des indicateurs de la typologie des hydrogrammes - Période 1951-2013

Les différences des paramètres entre les données avant et après 1950 les plus marquantes sont :

1. La diminution des amplitudes maximales observées
2. L'augmentation du nombre de hausses annuelles
3. L'augmentation du rapport entre temps de montée et temps de descente, passant en valeur annuelle d'environ 0,5 à 0,9.

Après les années 1950 il y a donc plus de hausses en moyenne par an mais elles sont de plus faible amplitude, ce qui est accord avec l'analyse des crues du paragraphe précédent. De plus il apparaît que depuis 1950, les rapports entre temps de montée et temps de descente ont été fortement modifiés. Ce point est analysé ci-dessous.

Pour la suite de l'analyse il est proposé de comptabiliser les hausses supérieures au module et de regarder leur répartition par tranche de débit en % du module. Le graphique suivant présente les résultats pour les deux périodes analysées :

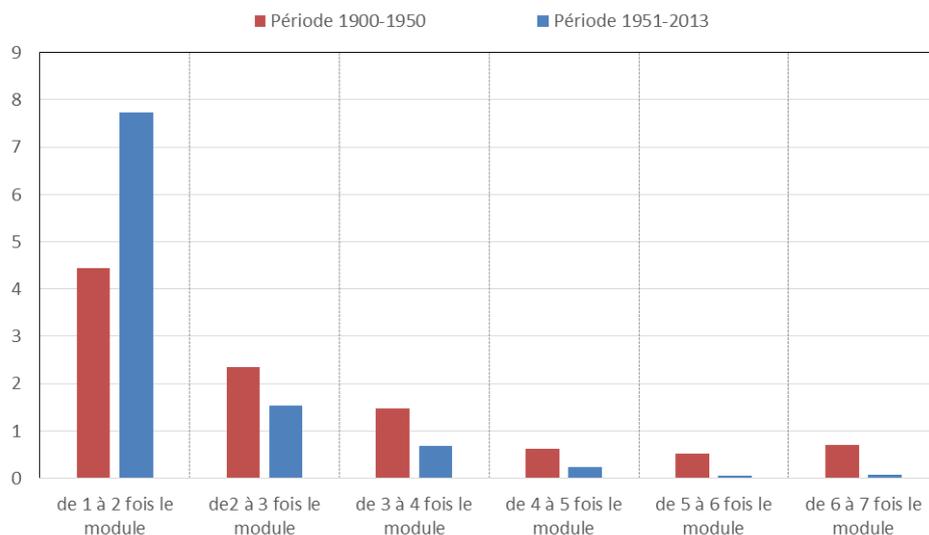


Figure 3-14 : Comparaison du nombre de hausses significatives par an du débit à Argentat

Le nombre de hausses de débit d'une amplitude de 1 à 2 fois le module a presque doublé alors que le nombre de hausses de débit de plus forte amplitude diminue d'autant plus que l'amplitude de la hausse est grande.

Ce résultat montre que la distribution de toutes les montées d'eau observées a été fortement modifiée sur la période 1951-2013, avec un resserrement vers des montées d'eau de faible amplitude.

Le graphique suivant présente la comparaison des gradients de montée et de descente en % du module par jour sur les deux périodes analysées :

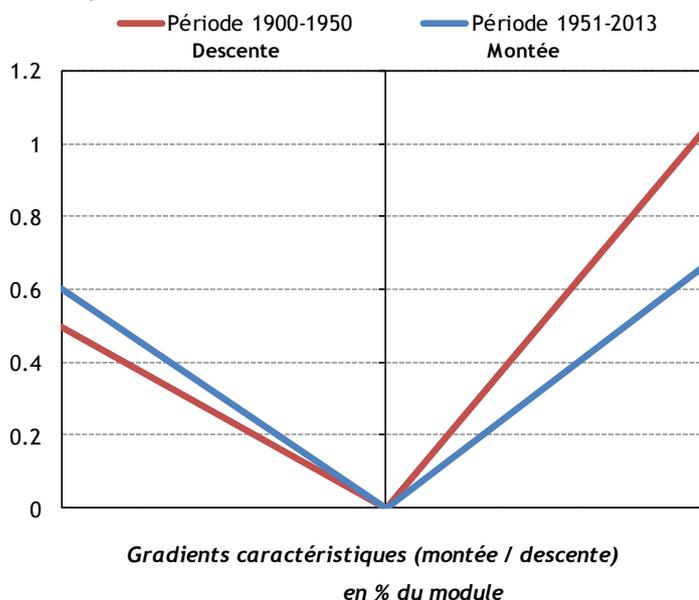


Figure 3-15 : Comparaison des gradients de montée et de descente à Argentat

Sur la période 1900 à 1950, les gradients moyens étaient de l'ordre du module à la montée et de 50 % du module à la descente. Sur la période 1951 à 2013, les gradients de montée ont fortement diminué et sont d'environ 65 % du module et les gradients de descente de 60 % du module. Avant l'aménagement de la chaîne hydroélectrique en amont d'Argentat, les crues mettaient en moyenne 2 fois plus de temps à descendre qu'à monter, situation de décrue « classique ». Depuis 1951 les temps de montée et de descente sont identiques. Cette symétrie des montées et descentes traduit une artificialisation du signal hydrologique de crue qui normalement, met plus de temps à descendre qu'à monter.

3.5 Conclusion

L'impact des aménagements hydroélectriques de la Dordogne sur l'hydrologie du cours d'eau est important. Le régime hydrologique est modifié sur l'ensemble du secteur d'étude, même s'il est plus important en amont qu'en aval. Les modifications se résument par :

- Une diminution des débits de crues maxima mesurés ;
- Une diminution de la fréquence des crues (à débit fixé) ;
- Une augmentation de la fréquence des petites hausses de débits (cf. Figure 3-14) ;
- Une modification du rapport entre vitesse de hausse et de baisse des débits (cf. Figure 3-15).

La conséquence de ces observations est aussi que la période des débits morphogènes est naturellement la période de hautes-eaux ; elle est cohérente avec l'activité hydroélectrique et la forte demande en électricité de la période hivernale. L'impact prépondérant du contrôle hydrologique par les aménagements en amont d'Argentat est la diminution de la durée des événements de crues : le temps de descente suite à une hausse de débit est diminué de moitié. Enfin le nombre de jours au-dessus d'un débit donné est inférieur à la situation équivalente avant la construction des aménagements hydroélectriques. Le cas particulier des débits de plein bord sera analysé §5.

4 ANALYSE DIACHRONIQUE DU LIT DE LA DORDOGNE

Afin de décrire les évolutions globales hydromorphologiques de la Dordogne, une analyse diachronique a été réalisée à partir des cartes de l'état-major (levées entre 1820 et 1866) et des photos aériennes de 1995 et 2012.

Les dates des prises de vues des deux campagnes ne sont pas connues, cependant les photos exposant l'analyse des bancs (Figure 4-25, Figure 4-27 et Figure 4-28) montrent un niveau d'eau de la Dordogne en étiage, laissant apparaître les mêmes bancs principaux structurant son lit.

Dans la suite du document, les analyses sont présentées par tronçons de 10km de linéaire de cours d'eau environ. Ces tronçons sont numérotés en partant de l'aval (queue de retenue de Mauzac) comme indiqué sur la carte ci-dessous :

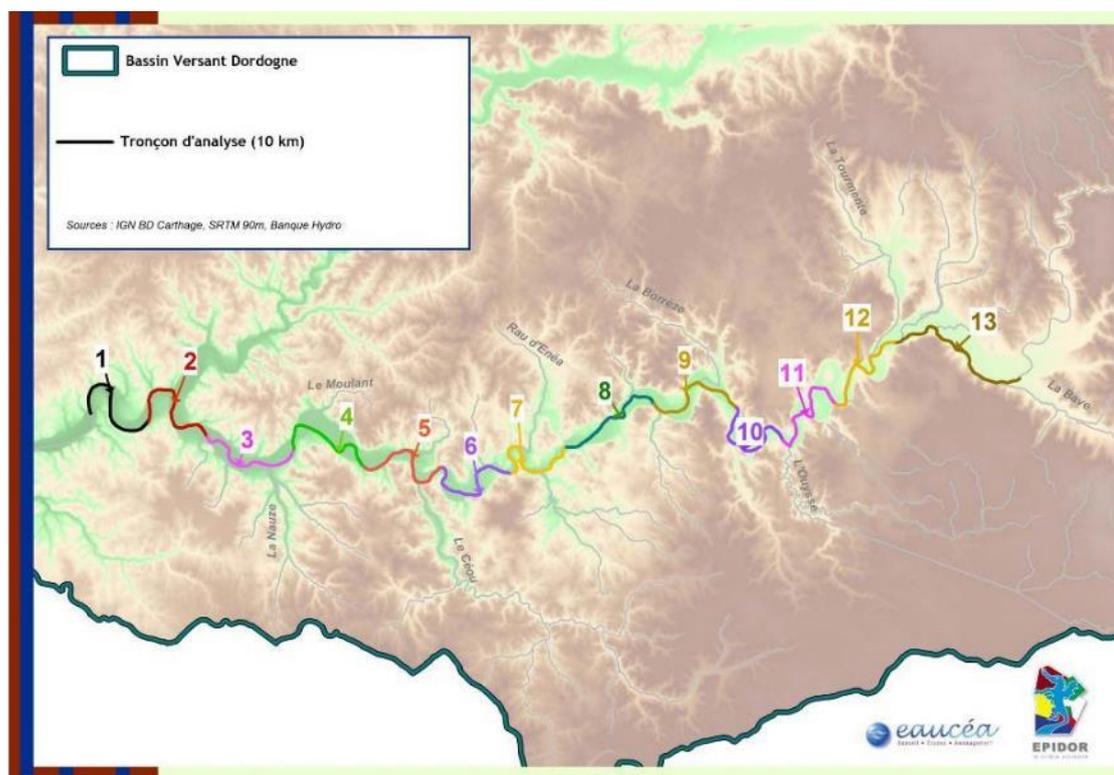


Figure 4-1 : Numérotation des grands tronçons d'analyse

Nota : la carte ci-dessus ne représente que les tronçons étudiés dans le modèle hydraulique (cf. §10 Annexe 1)). Les tronçons 14 à 17, de Beaulieu-sur-Dordogne à Argentat, sont présentés dans l'analyse diachronique ci-dessous, et correspondent aux 30 km de cours d'eau en amont de la confluence avec la Bave.

4.1 Evolution spatiale de la bande active

La « Bande active (ou lit moyen) » de la Dordogne entre Limeuil et Argentat (170 km de linéaire) a été numérisée pour les 3 périodes considérées. Elle se constitue de bancs alluviaux peu ou pas végétalisés, remaniés et rajeunis par des événements hydrologiques de fréquence moyenne à forte (entre la crue annuelle et la crue biennale environ). Elle est souvent considérée comme la zone majeure de stockage temporaire de la charge alluviale de fond en transit à l'échelle des décennies (Bravard 1996).

Les illustrations suivantes présentent des extraits des fonds d'images utilisées pour l'analyse diachronique et la bande active numérisée sur le secteur de Beaulieu.

- Les cartes de l'Etat-major réalisées entre 1820 et 1866



Figure 4-2 : Fond d'image de la carte d'Etat-major 1820-1866

- Les photographies aériennes de 1995

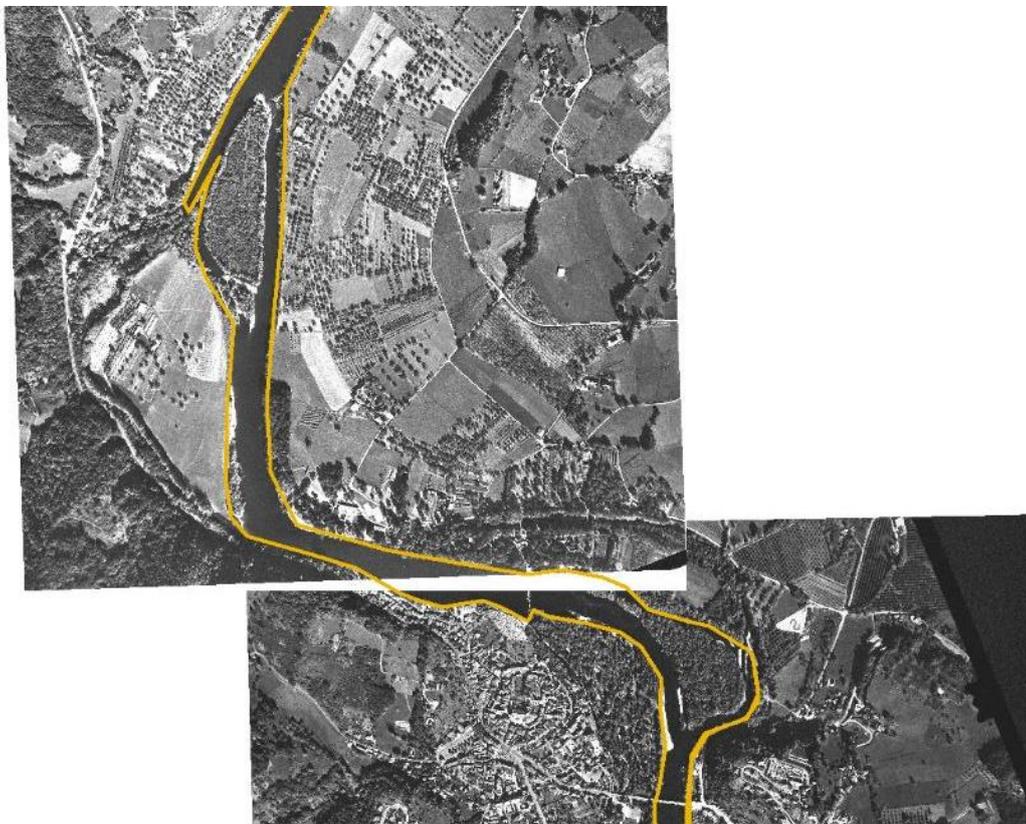


Figure 4-3 : Fond d'image de la campagne de photos aériennes de 1995

- Les photographies aériennes de l'IGN de 2012

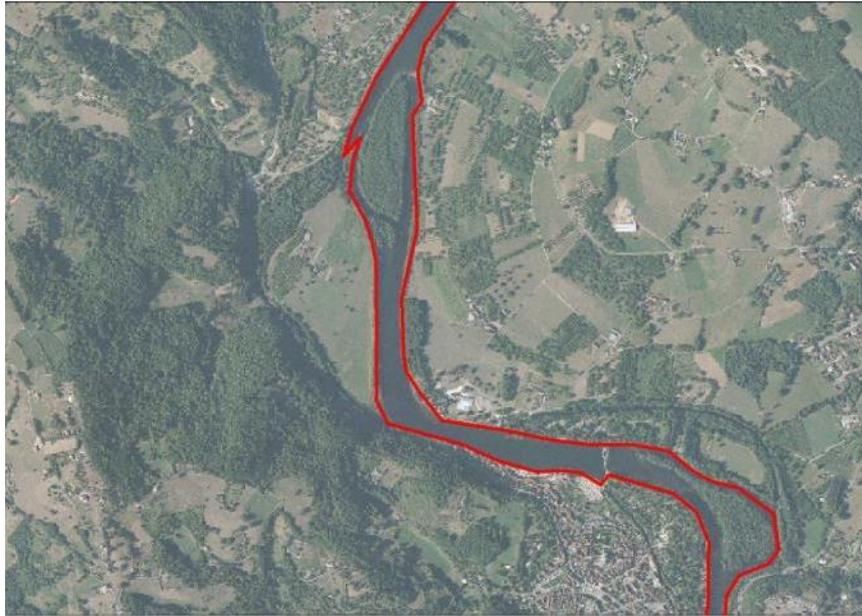


Figure 4-4 : Fond d'image de la campagne de photos aériennes de 2012

Le résultat de la superposition des trois bandes actives est représenté ci-dessous :

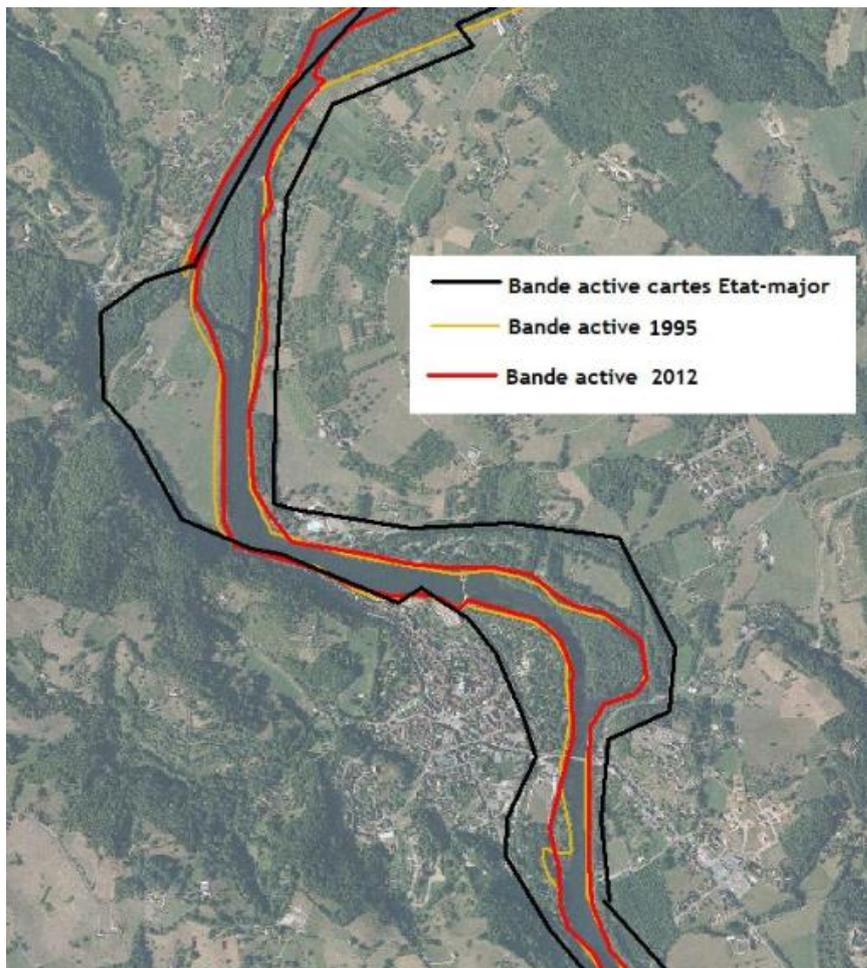


Figure 4-5 : Fond d'image de la superposition des 3 bandes actives

La carte suivante présente les 3 tracés du lit moyen aux différentes périodes étudiées. On peut, dans un premier temps, constater que le tracé à l'échelle de la zone d'étude (170 km de linéaire) ne montre pas une grande mobilité latérale du lit entre la moitié du XIX^{ème} et 2012 sauf ponctuellement, sur quelques secteurs bien marqués, analysés à plus grande échelle dans les images qui suivent. Le lit moyen en 1995 et en 2012 est quasiment similaire, les changements morphologiques seront plutôt identifiés à travers l'évolution des bancs de sédiments.

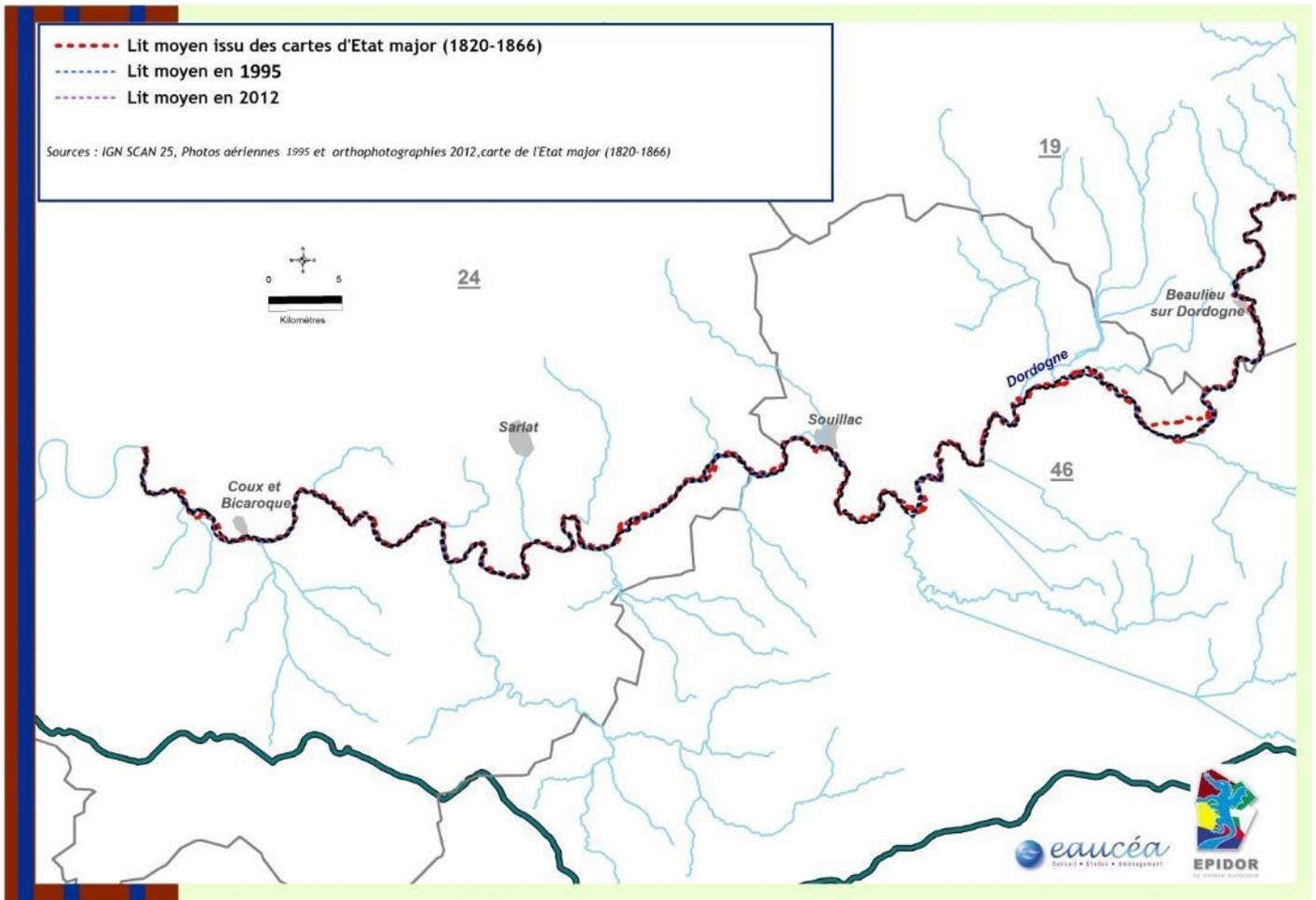


Figure 4-6 : Superposition du lit moyen de la Dordogne sur le secteur d'étude (1820-1866, 1995, 2012)

Deux zones de forte mobilité sont identifiées grâce à cette analyse :

- le secteur d'Aillac/Veyrignac : la mobilité latérale du lit est illustrée par un déplacement de méandre d'environ 700 m vers l'amont en 160 ans.

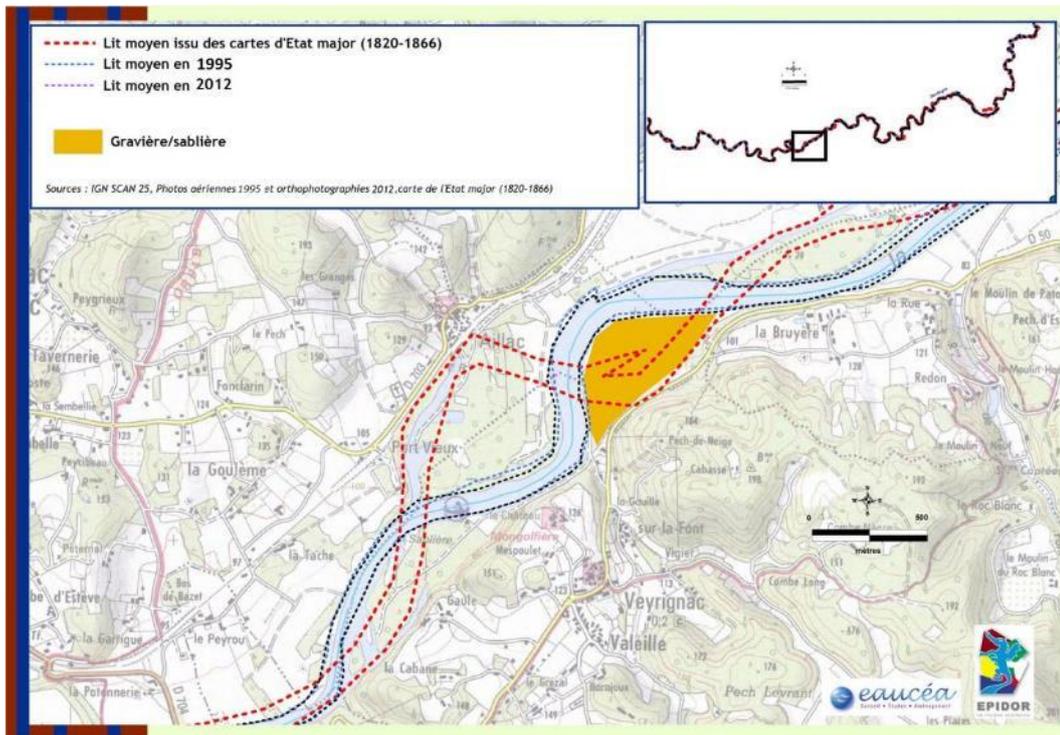


Figure 4-7 : Evolution du lit de la Dordogne - Secteur d'Aillac/Veyrignac

- le secteur de Lacave : la mobilité latérale du lit est illustrée par un déplacement de méandre d'environ 400 m vers l'aval en 160 ans.

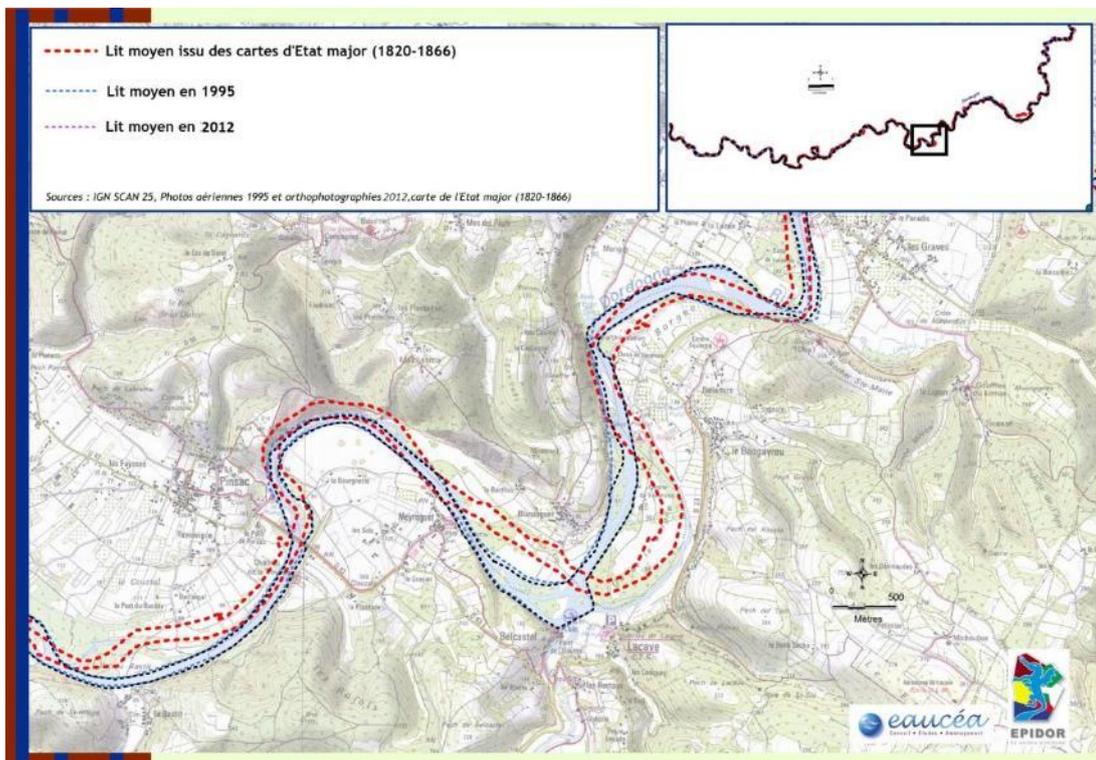


Figure 4-8 : Evolution du lit de la Dordogne - Secteur de Lacave

Les cartes ci-dessous représentent l'évolution du lit de la Dordogne sur des tronçons de 10 km environ, repérés sur la carte de la Figure 4-1, correspondant à ceux analysés par le modèle hydraulique dans cette étude.

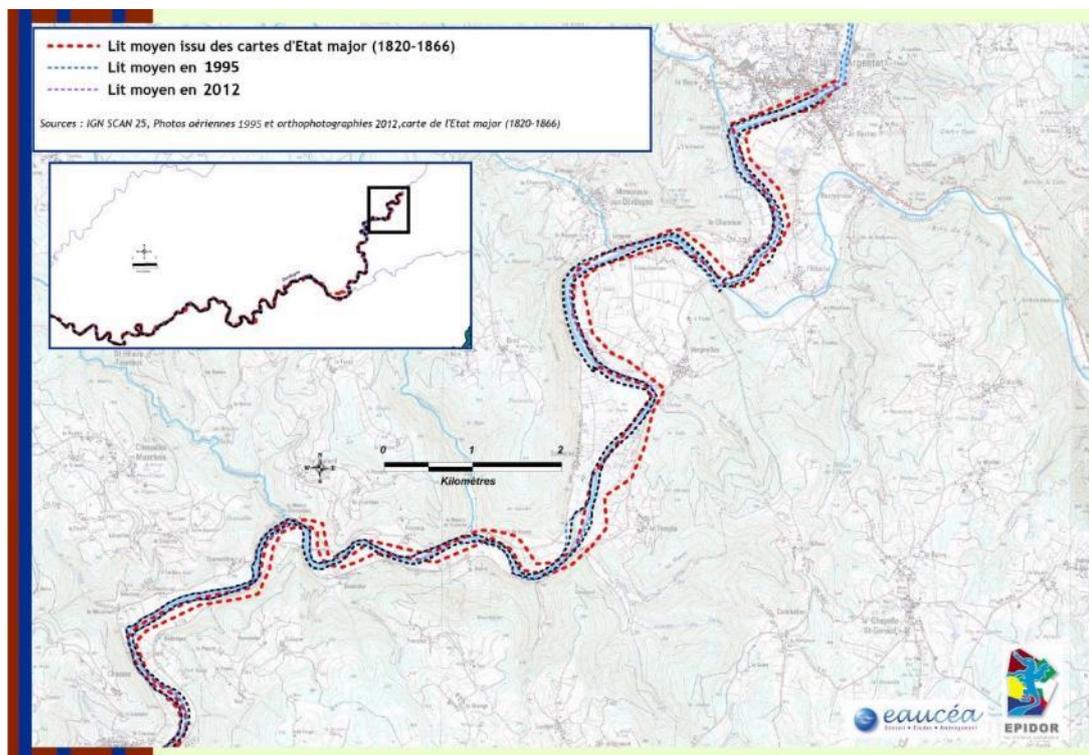


Figure 4-9 : Evolution du lit - Tronçon 17

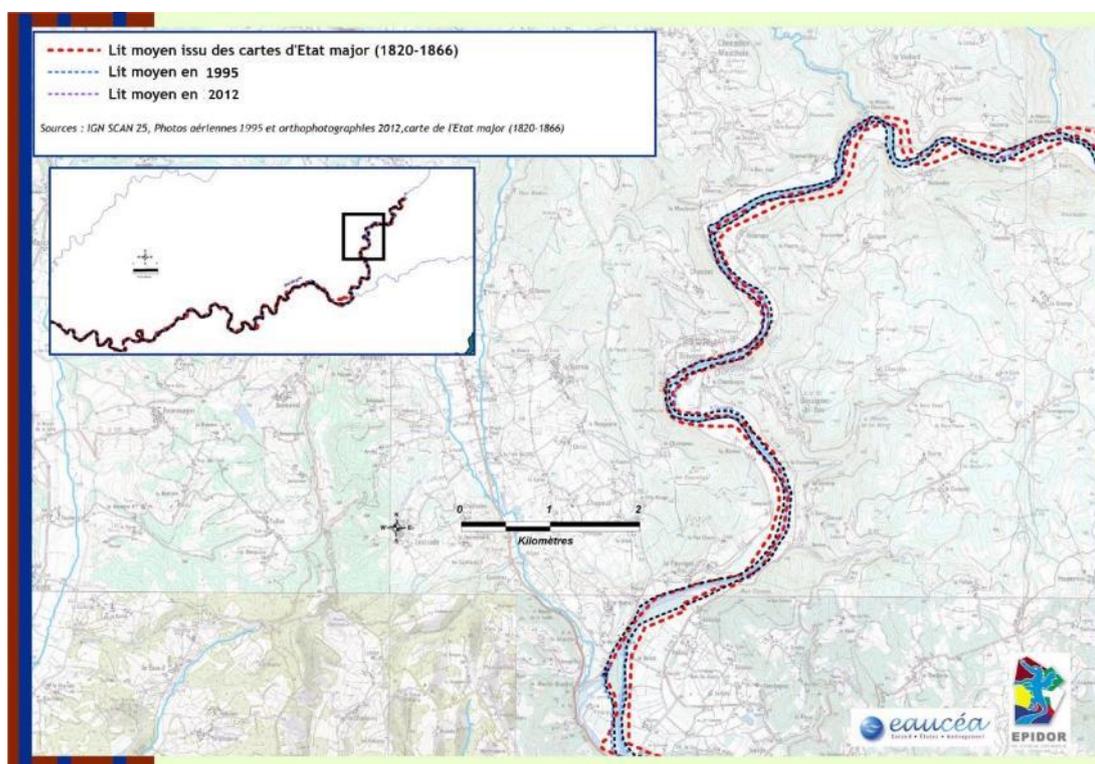


Figure 4-10 : Evolution du lit - Tronçon 16

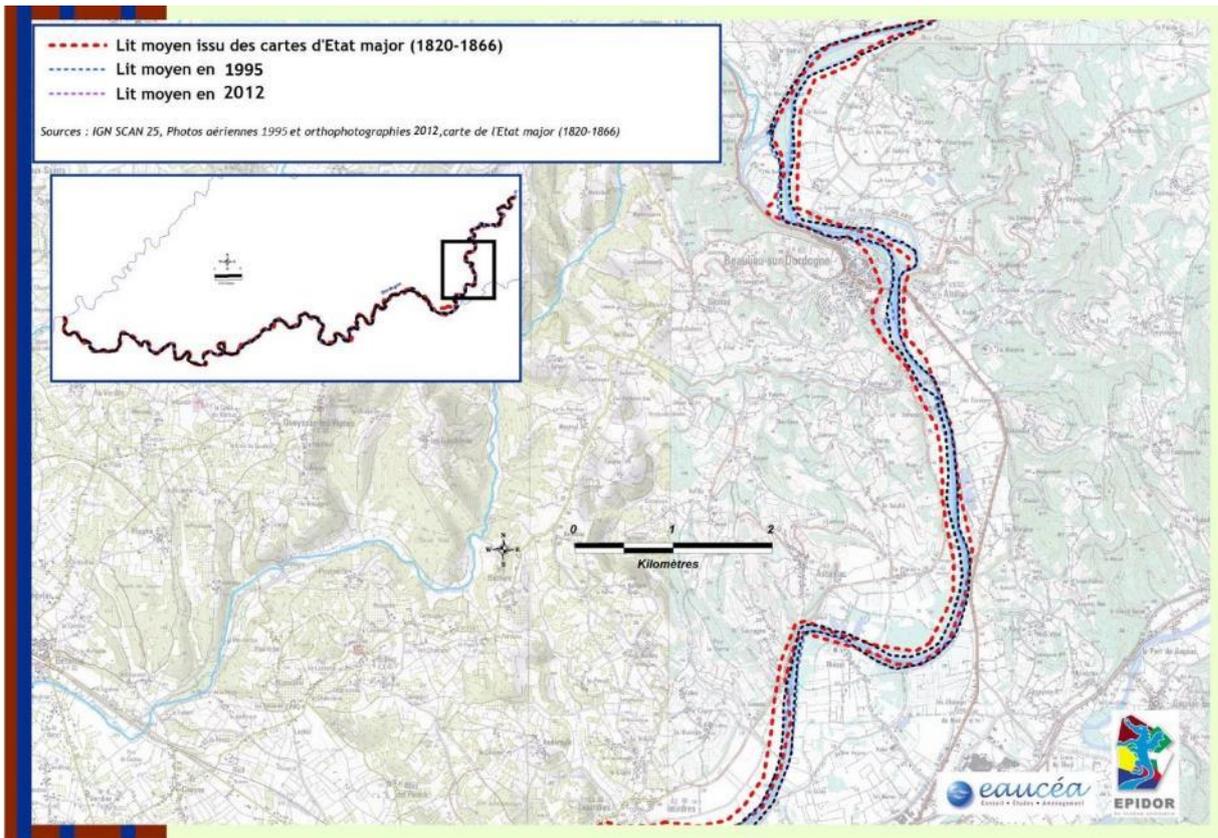


Figure 4-11 : Evolution du lit - Tronçon 15

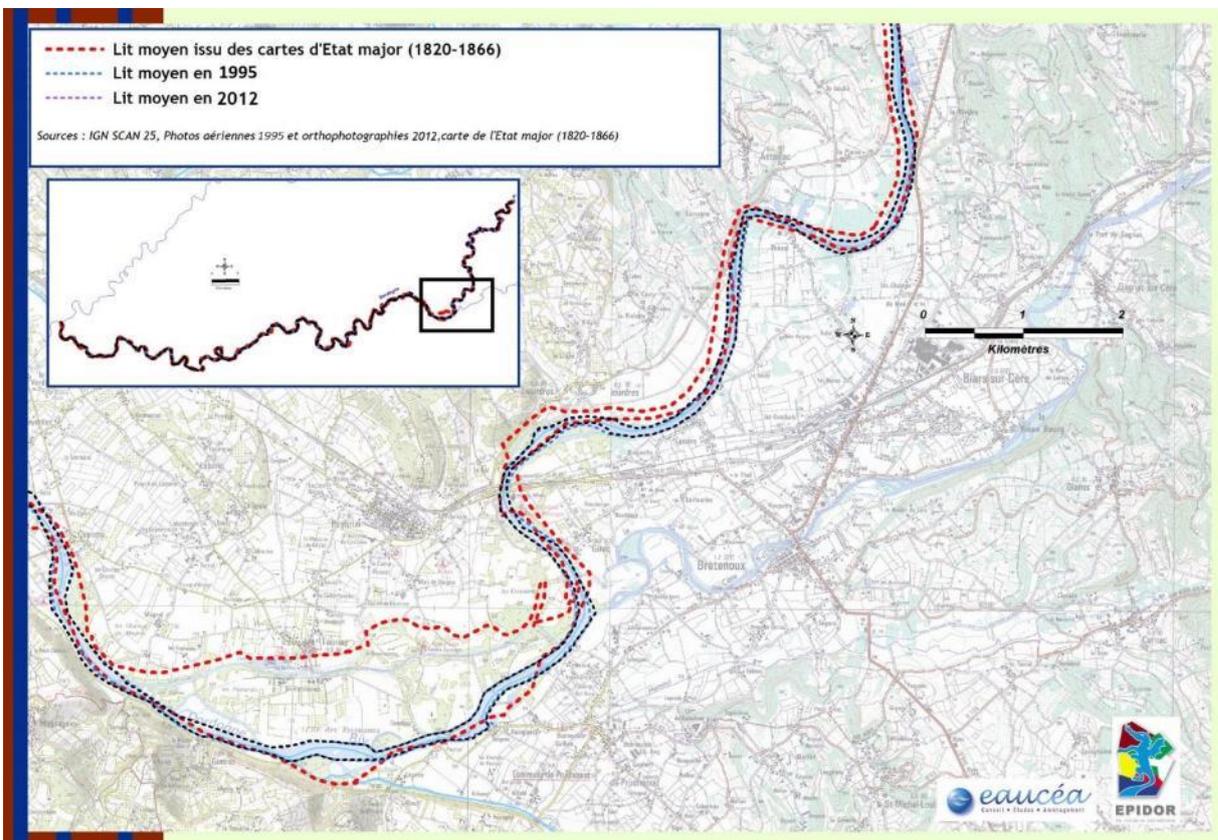


Figure 4-12 : Evolution du lit - Tronçon 14

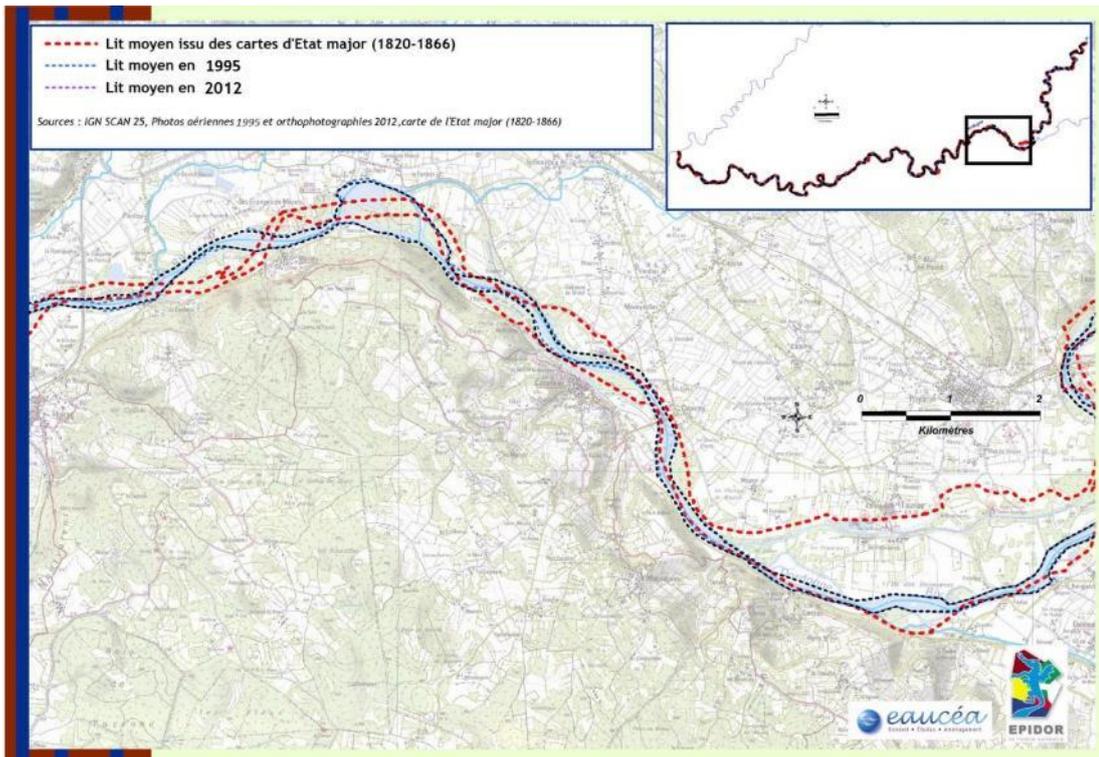


Figure 4-13 : Evolution du lit - Tronçon 13

Les tronçons 13 à 17 présentés précédemment montrent une évolution du lit de la Dordogne vers un rétrécissement de la bande active depuis la carte d'état-major, avec un écoulement préférentiel dans un chenal unique et stable entre 1995 et 2012. Les annexes hydrauliques sont déconnectées.

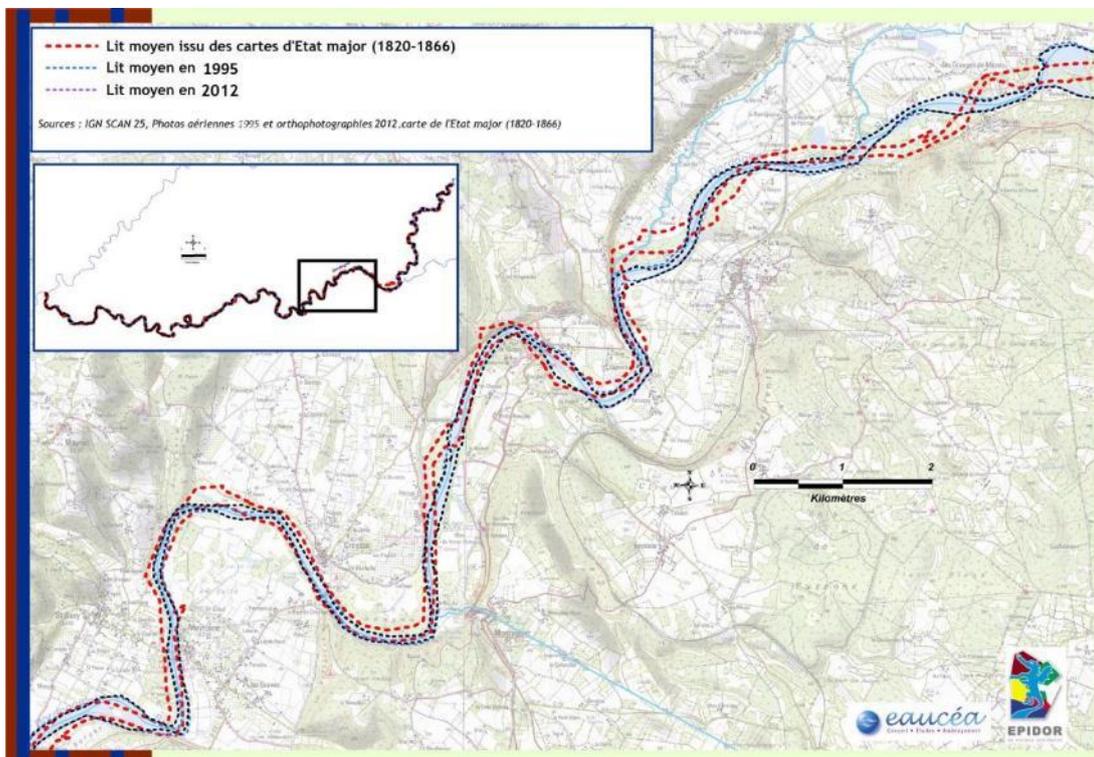


Figure 4-14 : Evolution du lit - Tronçon 12

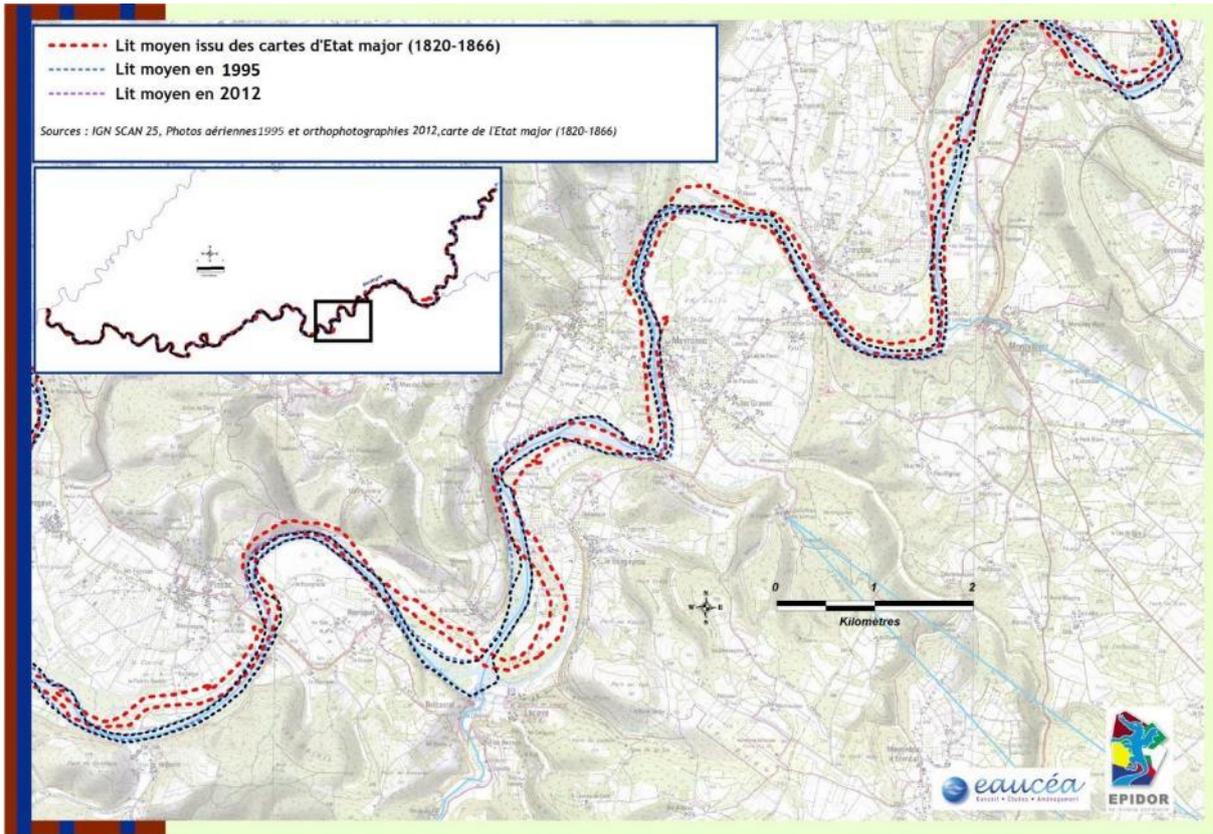


Figure 4-15 : Evolution du lit - Tronçon 11

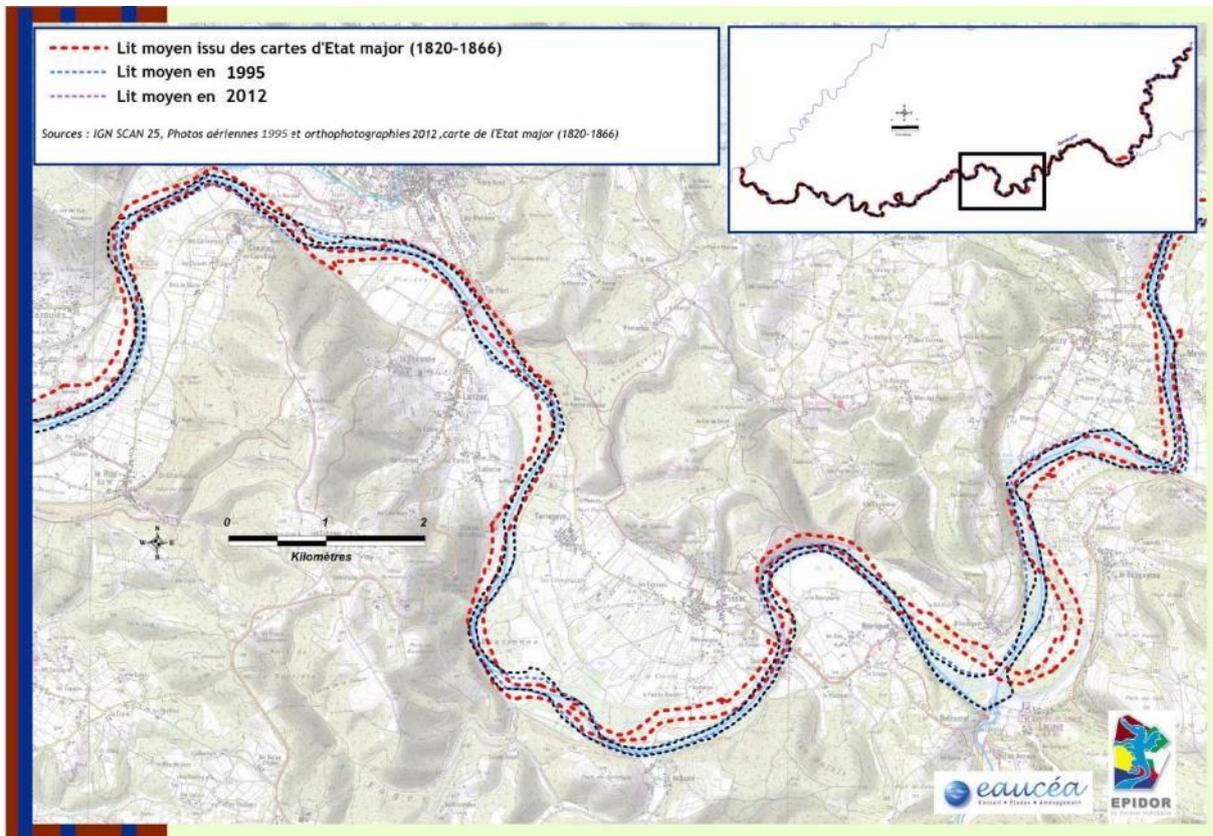


Figure 4-16 : Evolution du lit - Tronçon 10

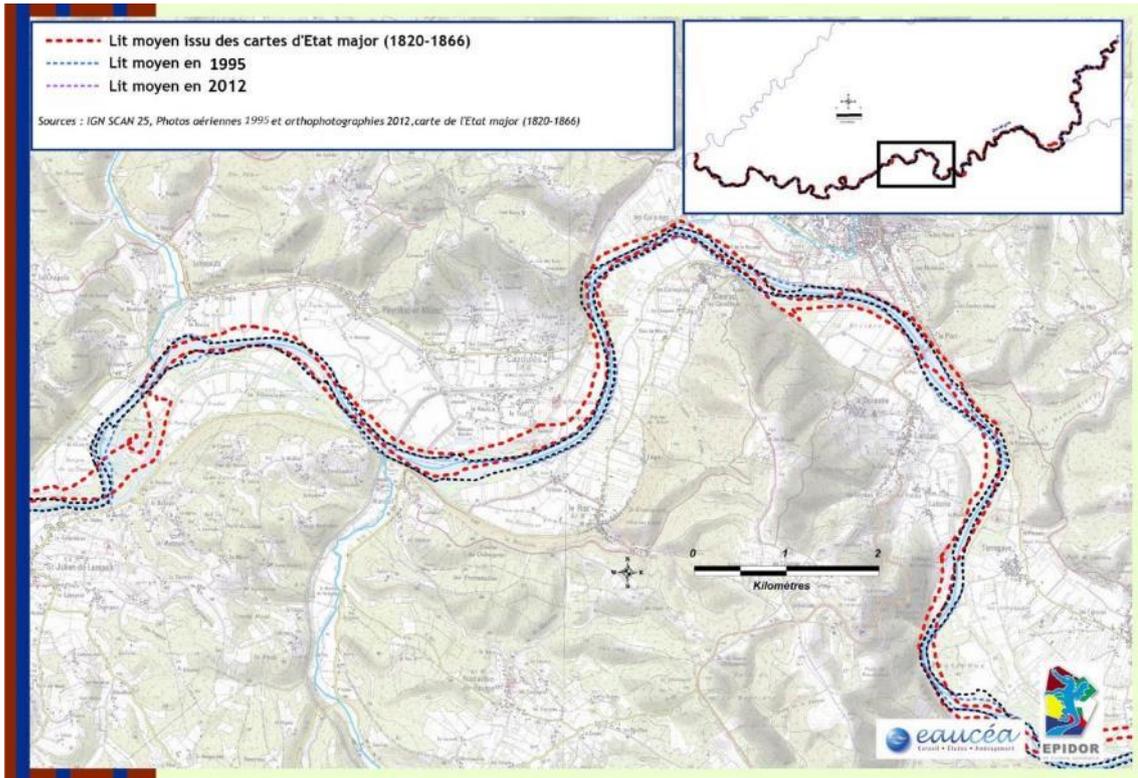


Figure 4-17 : Evolution du lit - Tronçon 9

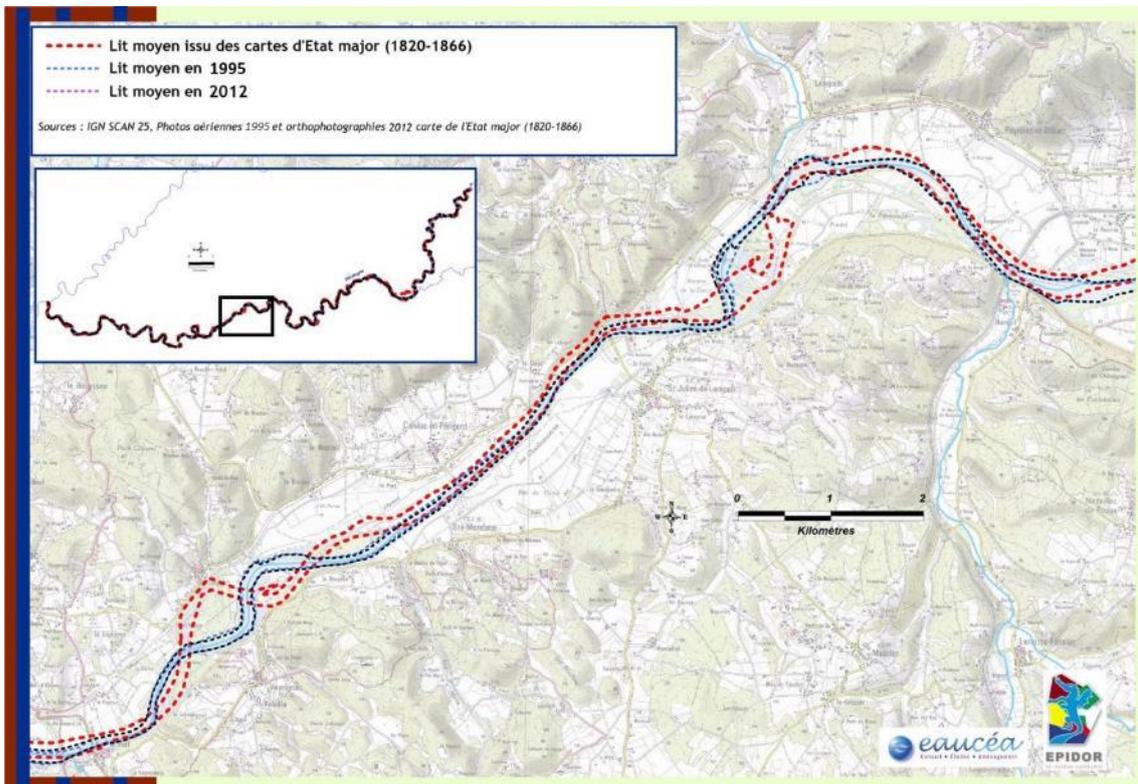


Figure 4-18 : Evolution du lit - Tronçon 8

Les tronçons 12 à 8 font apparaître un déplacement de quelques méandres entre la carte du 19^{ème} siècle et le lit actuel de la Dordogne. Ces déplacements sont de quelques centaines de mètres.

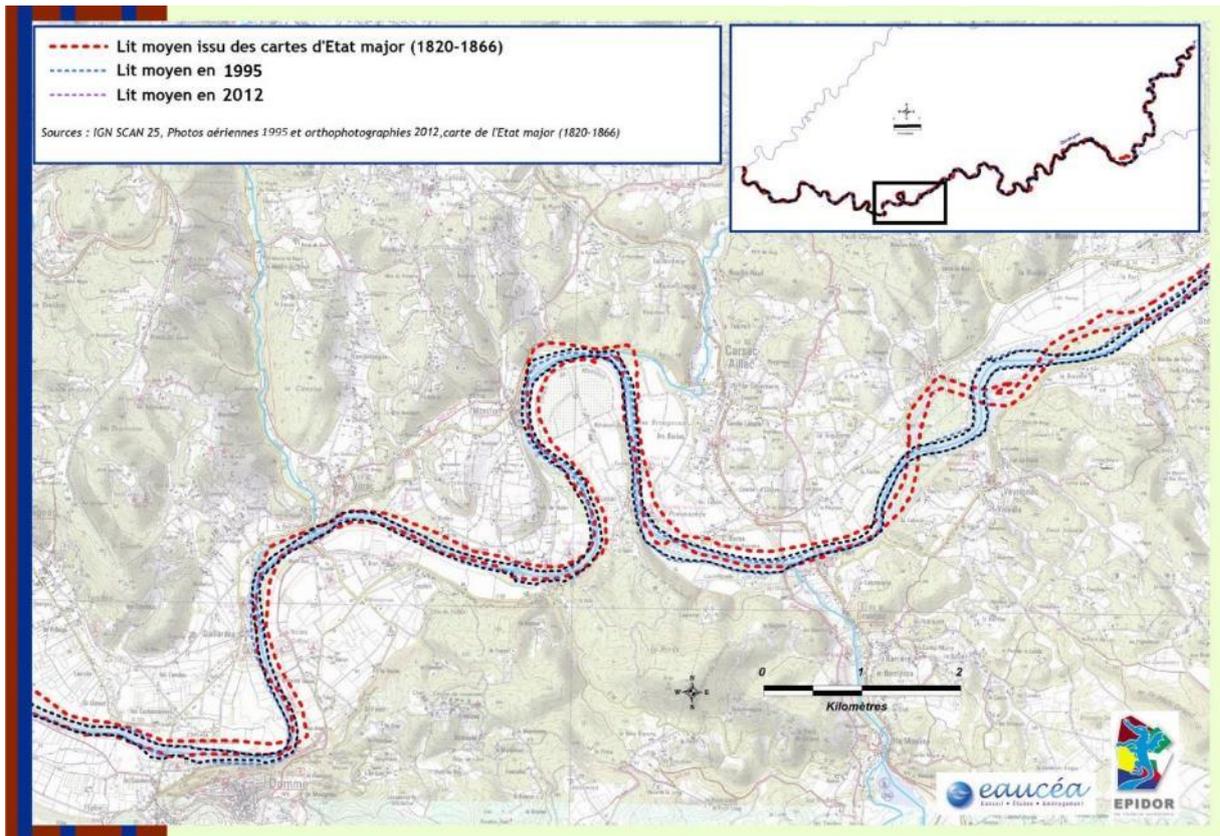


Figure 4-19 : Evolution du lit - Tronçon 7

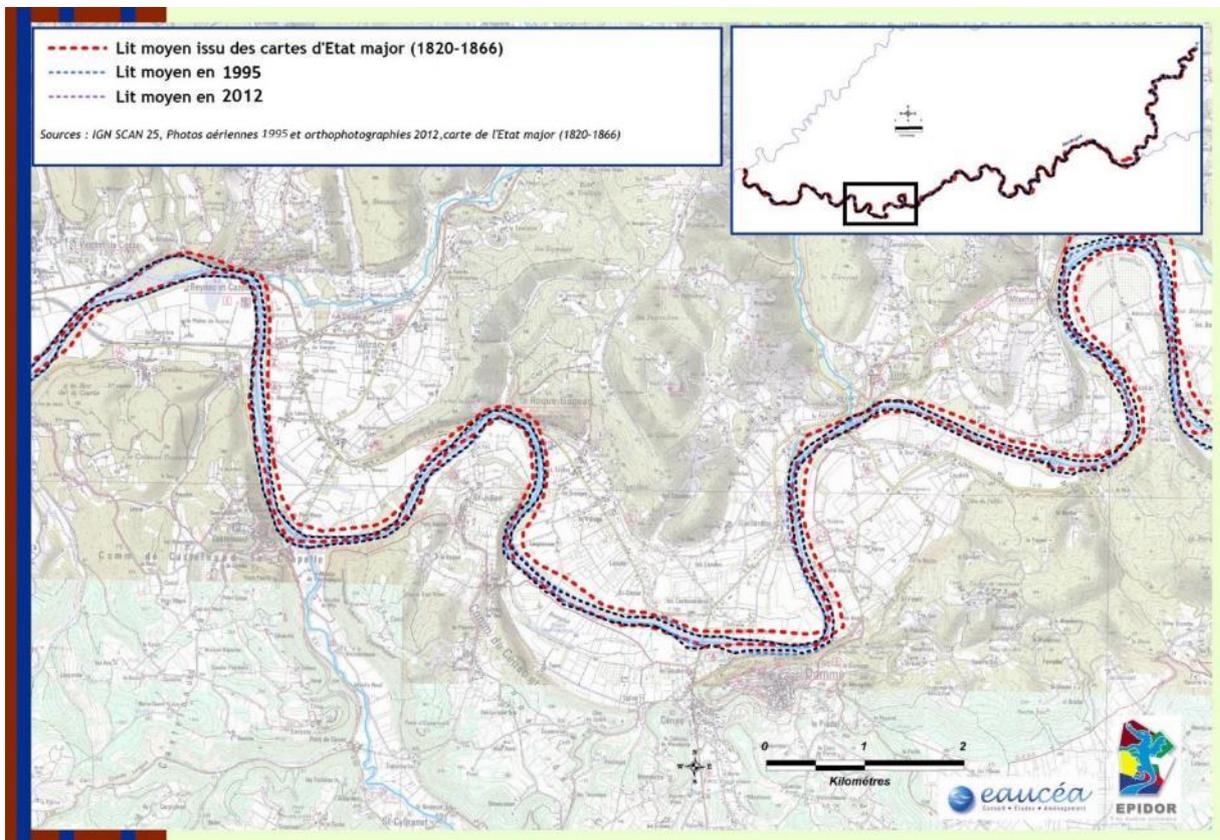


Figure 4-20 : Evolution du lit - Tronçon 6

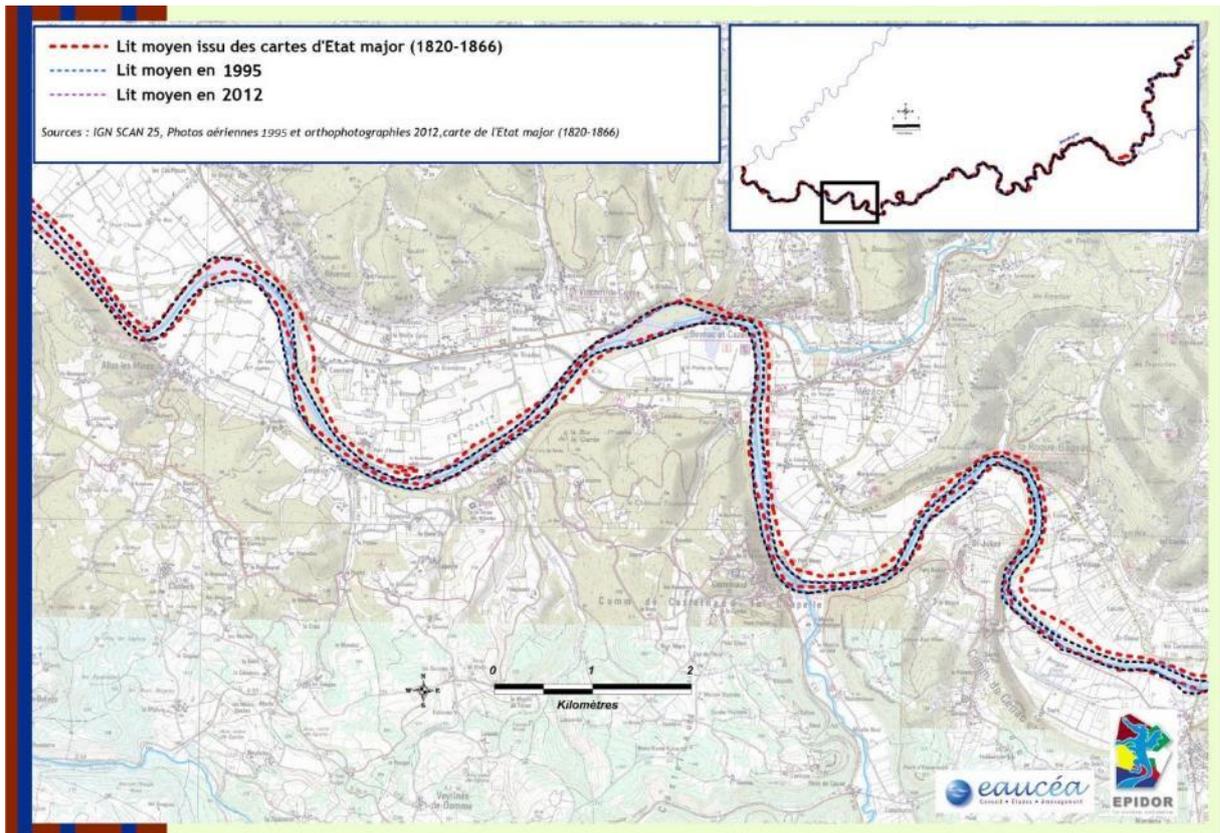


Figure 4-21 : Evolution du lit - Tronçon 5

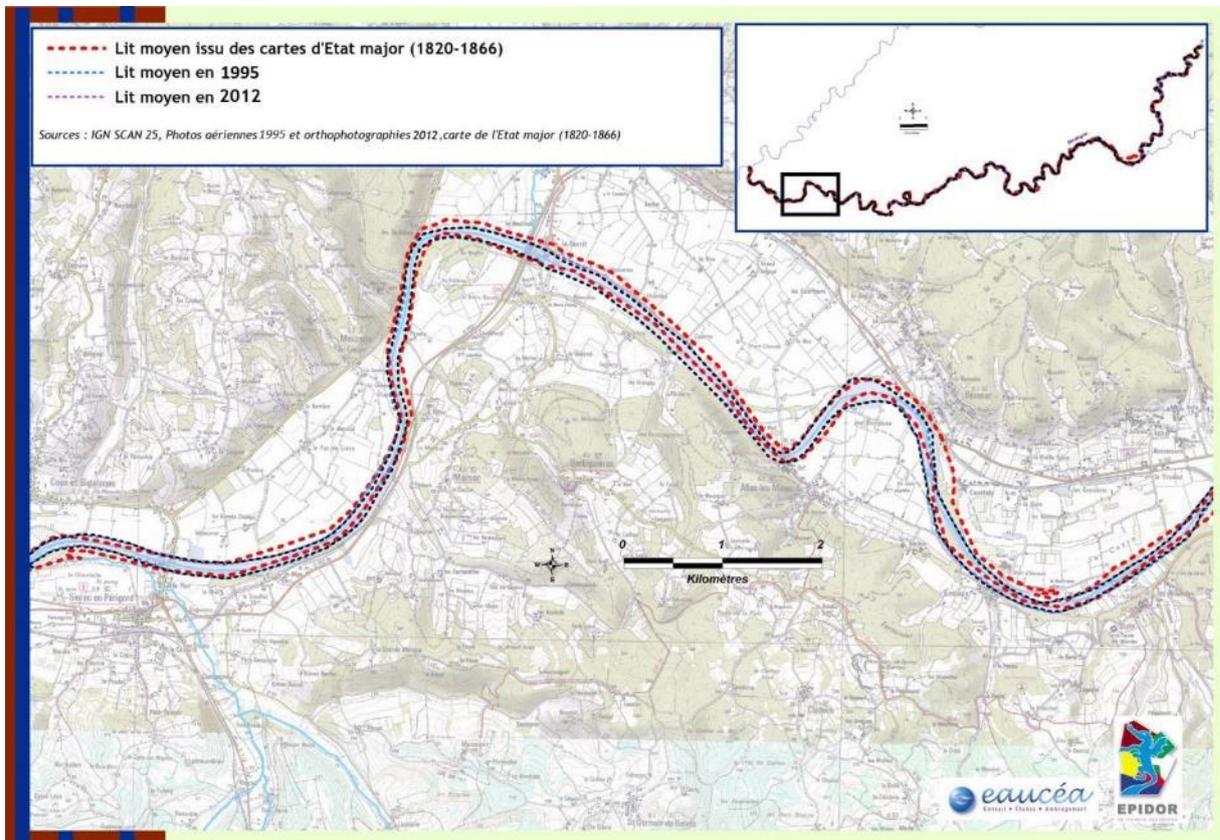


Figure 4-22 : Evolution du lit - Tronçon 4

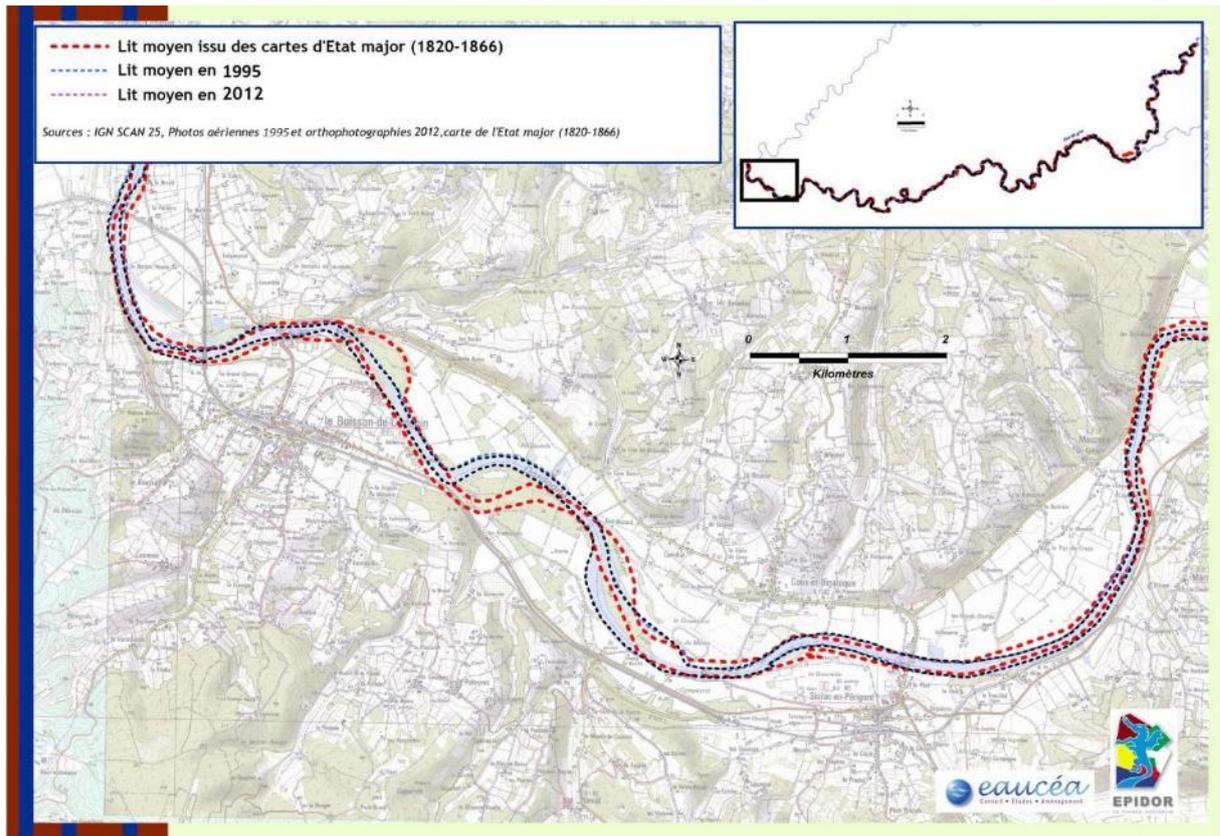


Figure 4-23 : Evolution du lit - Tronçon 1 à 3

Les tronçons 4 à 6 ne montrent pas de grandes modifications de la bande active de la Dordogne depuis le 19^{ème} siècle. La dernière partie juste en amont de la confluence avec la Vézère (ci-dessus tronçons 1 à 3) fait apparaître le rétrécissement de la bande active et le déplacement d'un méandre entre la carte d'état-major et les photos de 1995/2012.

Ces observations rejoignent les conclusions du schéma berges Girac-Mauzac réalisé pour EPIDOR en 2011 (Biotec, 2011).

4.2 Analyse du profil en long

L'étude engagée par S Macé pour Epidor (Macé, 2002) a produit des éléments de référence partiels qui s'appuient sur l'analyse comparative du **profil en long de la ligne d'eau d'étiage** et montre quelques indices d'incision du lit:

- profil en long du Service des Forces Hydraulique levé entre 1934 et 1937
- profil en long de la SOGREAH de 1978

Les profils traités représentent l'altitude de la ligne d'eau pour un débit d'étiage correspondant à la hauteur de 0,5 m à l'échelle limnigraphique de Cénac, soit 55 m³/s. Elles ne montrent pas l'altitude du fond.

Les principales conclusions étaient les suivantes :

« La comparaison des profils de 1937 et 1978 montre une tendance quasi-générale à l'enfoncement du lit avec une moyenne d'abaissement de 0,34 mètres. Trois secteurs ont connu un abaissement supérieur ou égal à 1 mètre : Calviac – Aillac, Gaillardou entre les ponts de Vitrac et de Cénac et l'amont de l'île de Cabans au Buisson.

Les incisions les plus importantes sont situées en amont des zones d'extraction en lit mineur et sont la conséquence de phénomènes d'érosion régressive : l'abaissement des fonds au niveau de la fosse d'extraction engendre une augmentation locale de la pente en amont, où la mobilisation des matériaux du lit est alors facilitée ; l'incision se propage vers l'amont jusqu'à ce que la rivière retrouve un profil d'équilibre.

Depuis l'arrêt des extractions en lit mineur, on observe le comblement progressif de certaines fosses d'extraction : le lit de la Dordogne sur le site d'extraction de Maisons Basses à Cazoulès est occupé par un banc central qui migre vers l'aval et qui traduit l'apport de matériaux depuis l'amont par érosion régressive. Le même phénomène se produit sur le site de Veyrignac au droit de la couasne de Calviac : la profondeur à l'étiage est passée de 7-8 mètres en 1980 (Pustelnik, 1984) à 3-4 mètres actuellement. Un banc de galets en amont se déplace vers l'ancienne fosse.

La fréquence des affleurements rocheux met en évidence la faible épaisseur du manteau de galets dans de nombreux secteurs de cette partie de la moyenne Dordogne. Ces secteurs rocheux constituent désormais des points durs qui fixent le profil en long et qui s'opposent à une poursuite de l'incision. »

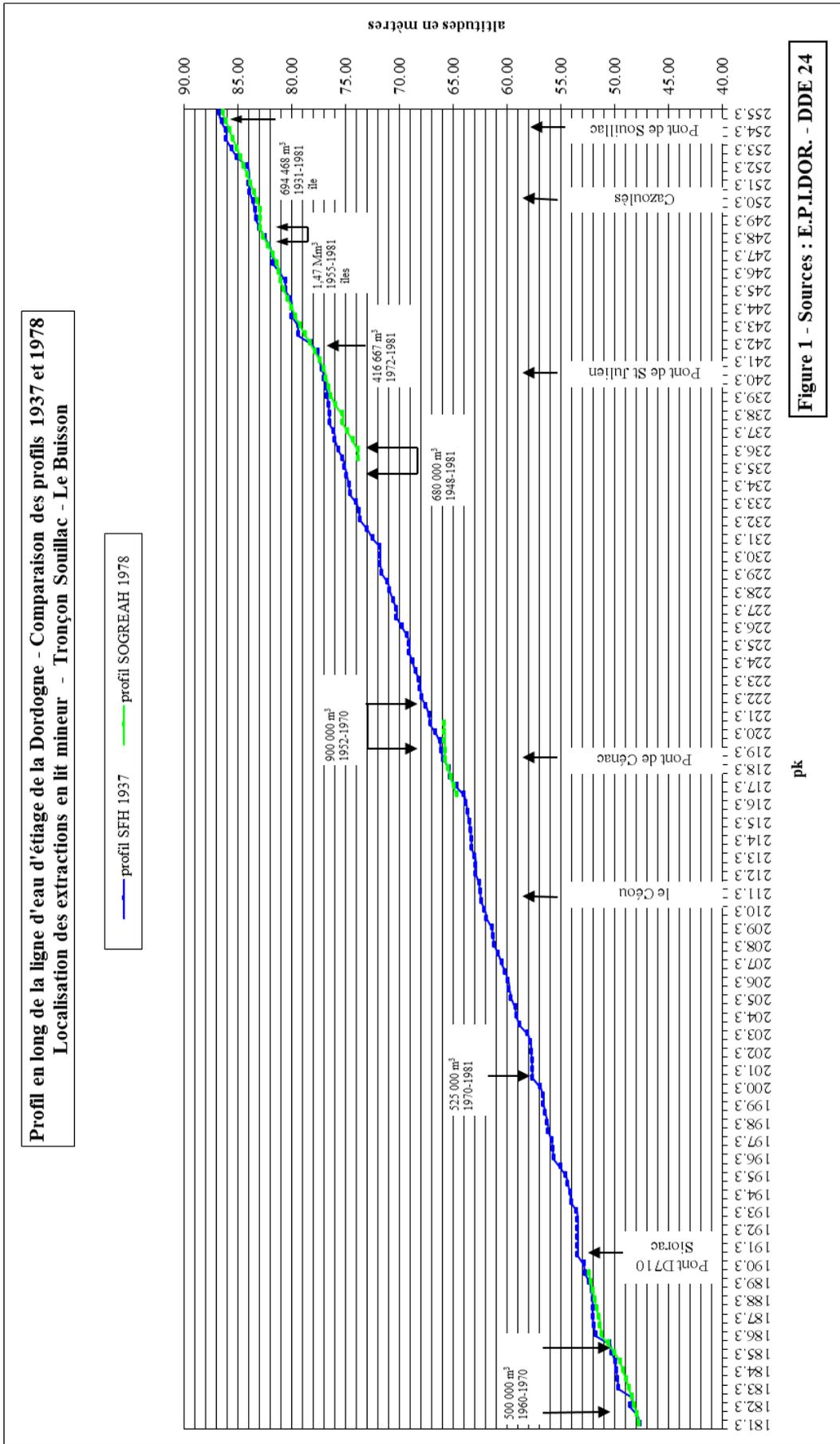


Figure 4-24 : Profil en long de la ligne d'eau d'étiage de la Dordogne (Macé, 2002)

4.3 Analyse diachronique des macro-formes (bancs de sédiments)

Les îlots de sédiments présents dans le lit moyen ont également été identifiés sur les photos aériennes de 1995 et de 2012.

Le recensement des îlots comporte plusieurs limites :

- le repérage manuel de chaque îlot comporte des incertitudes liées à l'appréciation visuelle et à la qualité des photos ;
- les conditions hydrologiques ne sont pas identiques dans le temps, ni homogènes dans l'espace entre différentes photos et donc certains îlots peuvent ne pas être visibles selon ces conditions.

Les dates des clichés et les débits correspondant sont précisés dans les tableaux ci-dessous :

- pour l'année 1995, les photos aériennes ont été prises les 7 et 8 octobre (campagne SPHAIR pour EPIDOR) :

Département	Date photos aériennes	Débit à Argentat (m ³ /s)	Débit à Cénac (m ³ /s)
19	7-8/10	17.2	55.0
24	7-8/10	17.2	55.0
46	7-8/10	17.2	55.0

Tableau 4-1 : Caractéristiques des clichés de la campagne de photos aériennes 1995

- pour l'année 2012, les photos aériennes sont issues du portail IGN, Geoportail :

Département	Date photos aériennes	Débit à Argentat (m ³ /s)	Débit à Cénac (m ³ /s)
19	18/7	30.5	46.3
24	16/7	30.5	48.4
46	18/7	30.5	46.3

Tableau 4-2 : Caractéristiques des clichés de la campagne de photos aériennes 2012

Chaque îlot recensé en 1995 (état de référence) a été par la suite analysé et qualifié en fonction de son évolution identifiée ou non sur les photos de 2012, en prenant toutes les précautions possibles liées aux limites de la méthode de recensement exposées précédemment.

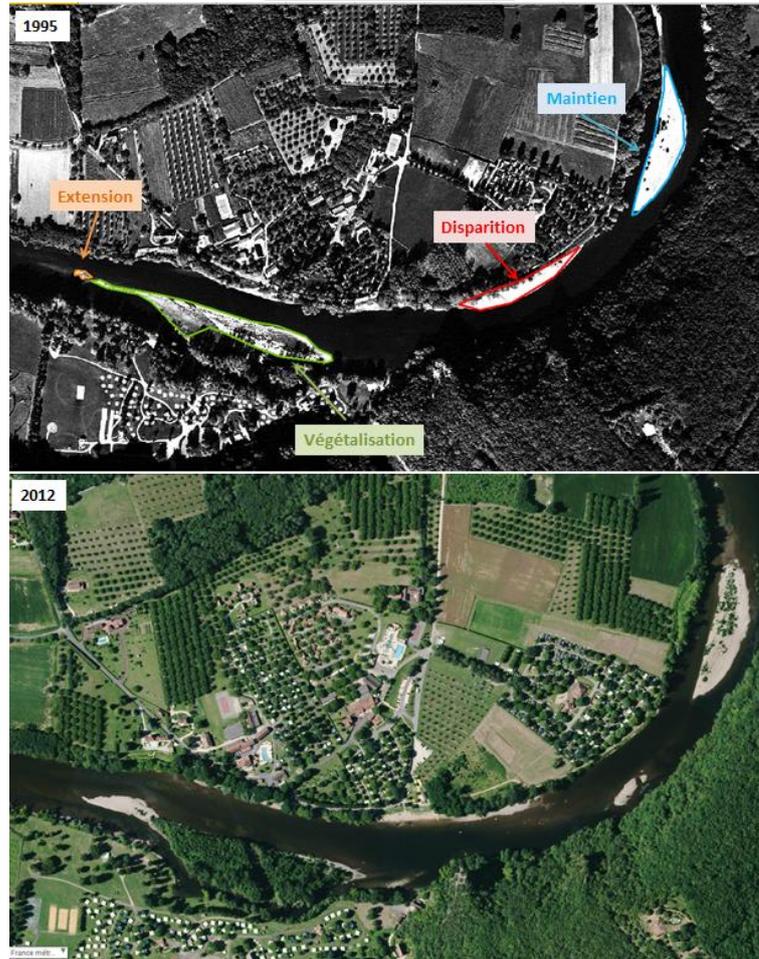
Compte tenu des variations de débit entre les clichés, aucune analyse **d'apparition de nouveaux îlots** n'a été menée.

Une typologie qualifiant l'évolution des bancs a été réalisée à partir des différents cas de figure rencontrés :

- **Disparition** : le banc de sédiment est identifié en 1995 mais n'apparaît plus sur les images de 2012
- **Extension** : la forme du banc cartographié sur les photos de 1995 est identifiée en 2012 avec une évolution liée à une forme d'accrétion
- **Maintien** : le banc identifié en 1995 est maintenu en l'état en 2012
- **Modification hydromorphologique** : les formes identifiées en 1995 ne se retrouvent pas en 2012 et laissent place à d'autres formes de bancs de sédiments.
- **Réduction** : Les formes d'accumulation repérées en 1995 se retrouvent en 2012 mais avec des surfaces réduites.
- **Végétalisation** : les bancs identifiés en 1995 se retrouvent dans leur forme en 2012 mais sont fixés par la végétation

Exemple des évolutions possibles entre 1995 et 2012

Secteur de Montfort



Secteur amont Souillac

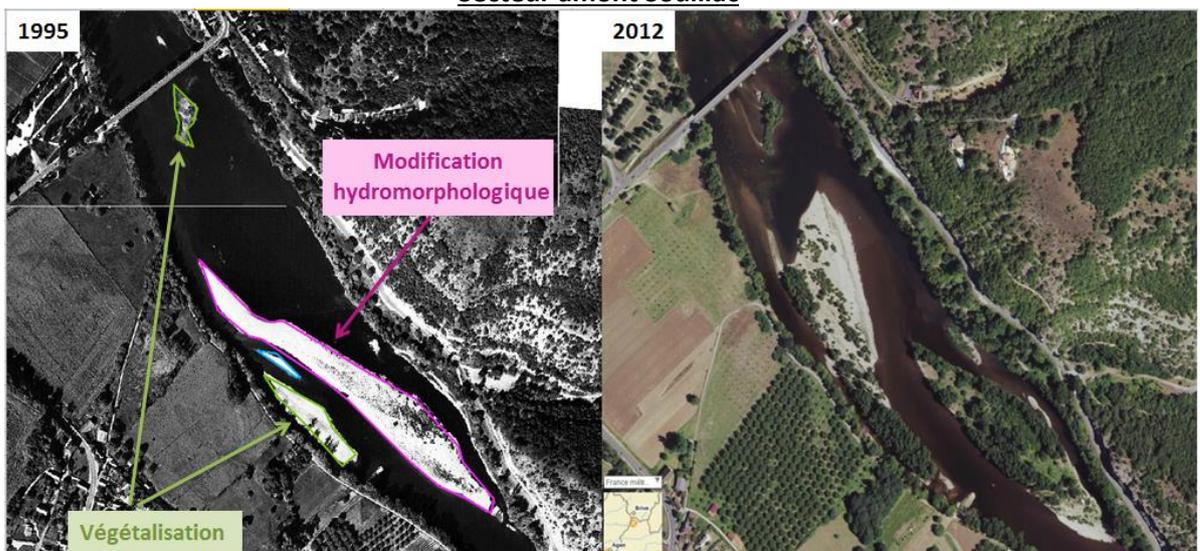


Figure 4-25 : Méthodologie d'analyse de l'évolution des bancs sédimentaires

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau et le graphique qui suivent :

Etat	surface en ha ²	%
Disparu	2	2%
Extension	8	6%
Maintien	24	18%
Modification hydromorphologique	21	16%
Réduction	4	3%
Végétalisé	71	55%
Total	131	100%

Tableau 4-3 : Résultat d'analyse de l'évolution des bancs sédimentaires

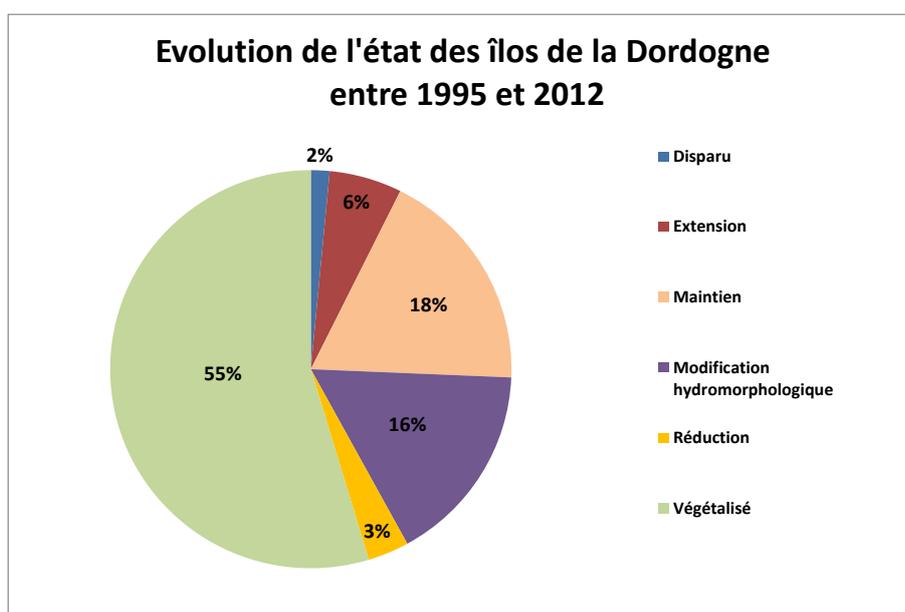


Figure 4-26 : Répartition des typologies d'évolution des bancs sédimentaires

Environ ¼ des îlots recensés en 1995 sont toujours présents en 2012, en incluant les bancs végétalisés. La réduction et la disparition de formes d'accumulation ne représentent qu'une faible part (5%) des évolutions observées.

Exemple de secteur d'apparition de nouveaux bancs en 2012 entre le Buisson-de-Cadouin et Siorac-en-Périgord



Figure 4-27 : Apparition de nouveaux bancs entre 1995 et 2012 entre le Buisson-de-Cadouin et Siorac-en-Périgord

Evolution des bancs de sédiments au niveau de Lacave entre 1995 et 2012

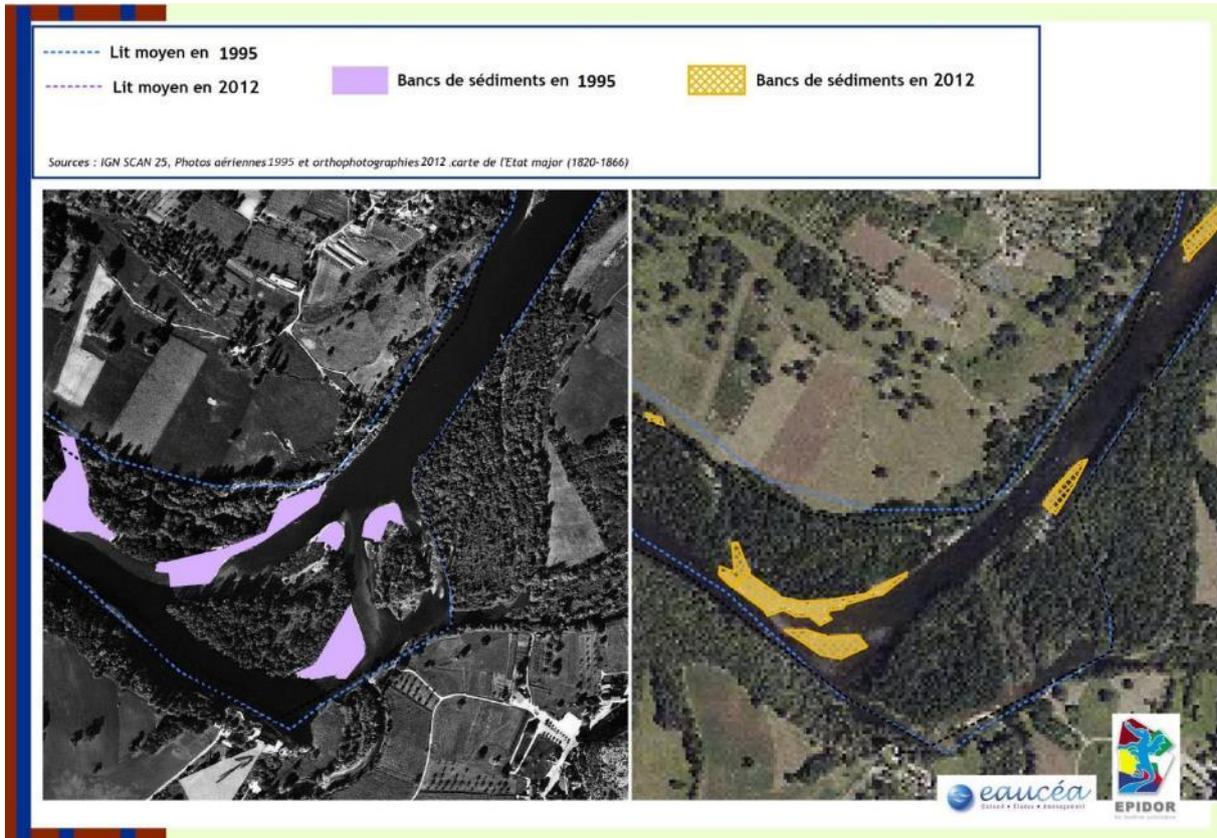


Figure 4-28 : Evolution des bancs de sédiments au niveau de Lacave entre 1995 et 2012

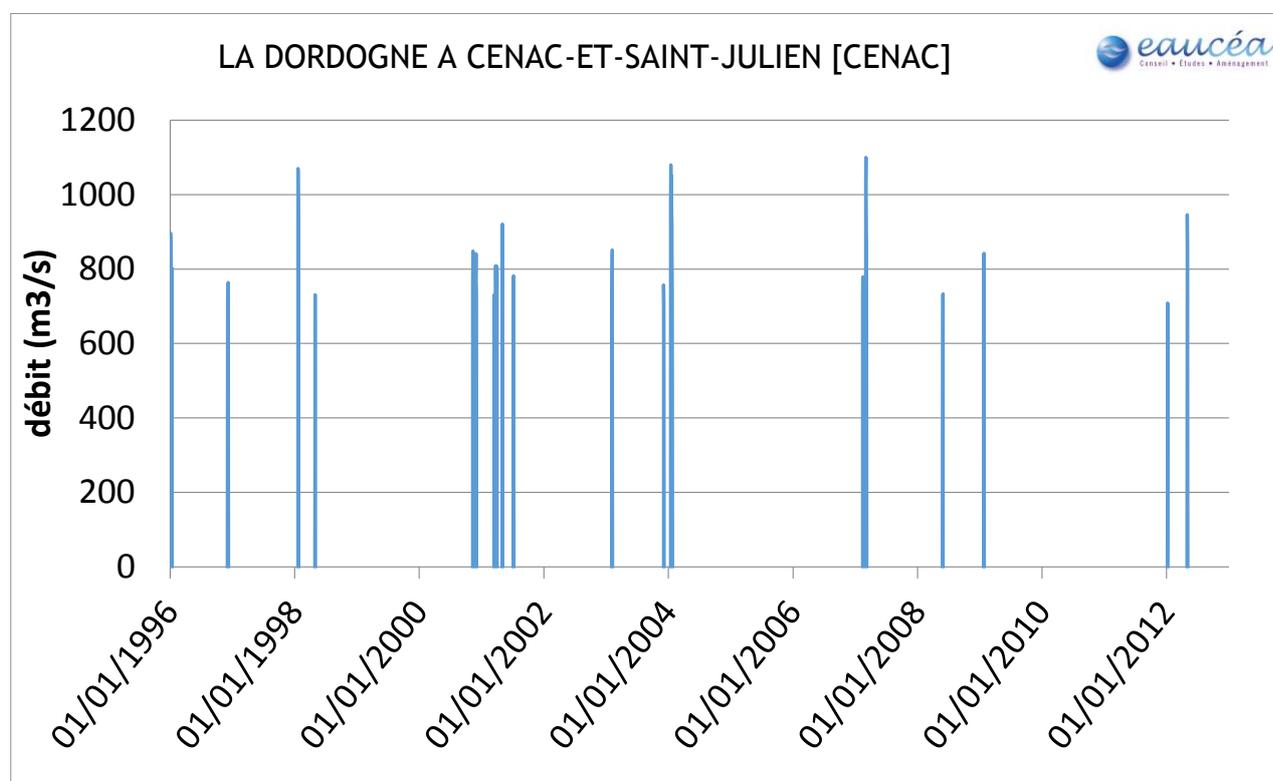
4.3.1 Hydrologie de la Dordogne entre 1995 et 2012

Le débit de plein bord à Argentat est connu pour être de 550 m³/s (source Epidor), ce qui est cohérent avec les résultats de la modélisation hydraulique présentés au § 5. La période de retour de ce débit moyen journalier de plein bord est d'environ 4 ans sur la période 1952-2013 (elle est de 1.4 ans sur la période 1900-1951).

Plus en aval, à Cénac, le débit de plein bord est d'environ 700 à 750 m³/s (source Epidor), pour une valeur moyenne journalière de période de retour de 1 an ½ environ.

Sur la période 1995-2012, le débit moyen journalier a atteint ou dépassé 550 m³/s à Argentat seulement 2 fois : le 15/01/2004 et le 04/03/2007 (source Banque Hydro).

Sur la même période, à Cénac, le débit moyen journalier a atteint ou dépassé 700 m³/s 67 jours (source Banque Hydro) correspondant à 17 épisodes de crues (cf. figure ci-dessous).



Source Banque Hydro

Figure 4-29 : Episodes de crues supérieures au débit de plein bord entre 1996 et 2012 à Cénac

Le nombre d'épisodes de débits supérieurs au débit de plein bord est très faible à Argentat comparé à Cénac. La situation d'Argentat située immédiatement en aval des installations hydroélectriques en est la cause.

La végétalisation des bancs de sédiments et de leur stabilisation (situation de maintien observée) est très majoritaire sur la période 1995-2012 sur tout le secteur d'étude. D'autre part l'activité de prélèvement de sédiments en lit mineur est interdite depuis 1981.

Le tronçon présentant une végétalisation plus étendue en proportion spatiale des bancs se situe entre Carennac (tronçon T13 sur les cartes ci-après) et Floirac (tronçon T12 sur les cartes ci-après).

La stabilisation des bancs de sédiments est observée sur tout le secteur d'étude. Les crues observées à Cénac tous les ans entre 1996 et 2012 ne sembleraient pas entraîner une différenciation importante dans son ensemble de la mobilité des bancs entre aval et amont du secteur étudié.

4.3.2 Cartographie de l'évolution des bancs par tronçons de 10 km sur le secteur d'étude

Les cartes ci-dessous représentent l'évolution des bancs de la Dordogne entre 1995 et 2012 sur des tronçons de 10 km environ, correspondant à ceux analysés par le modèle hydraulique dans cette étude.

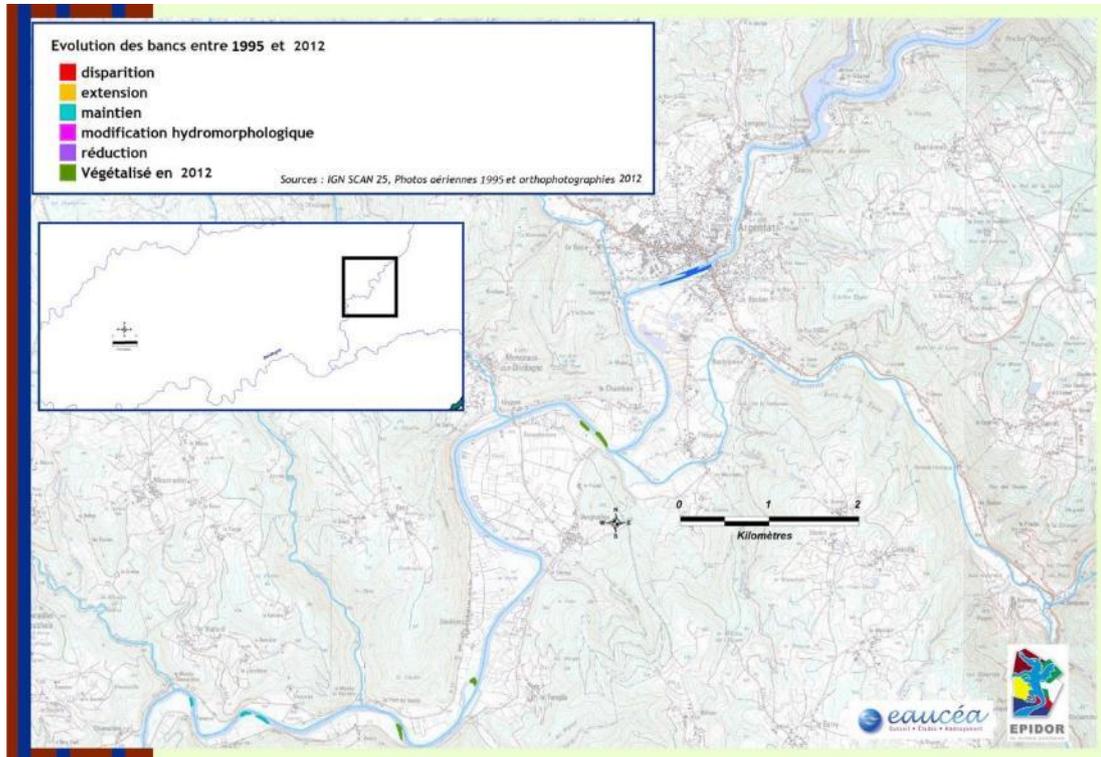


Figure 4-30 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 17

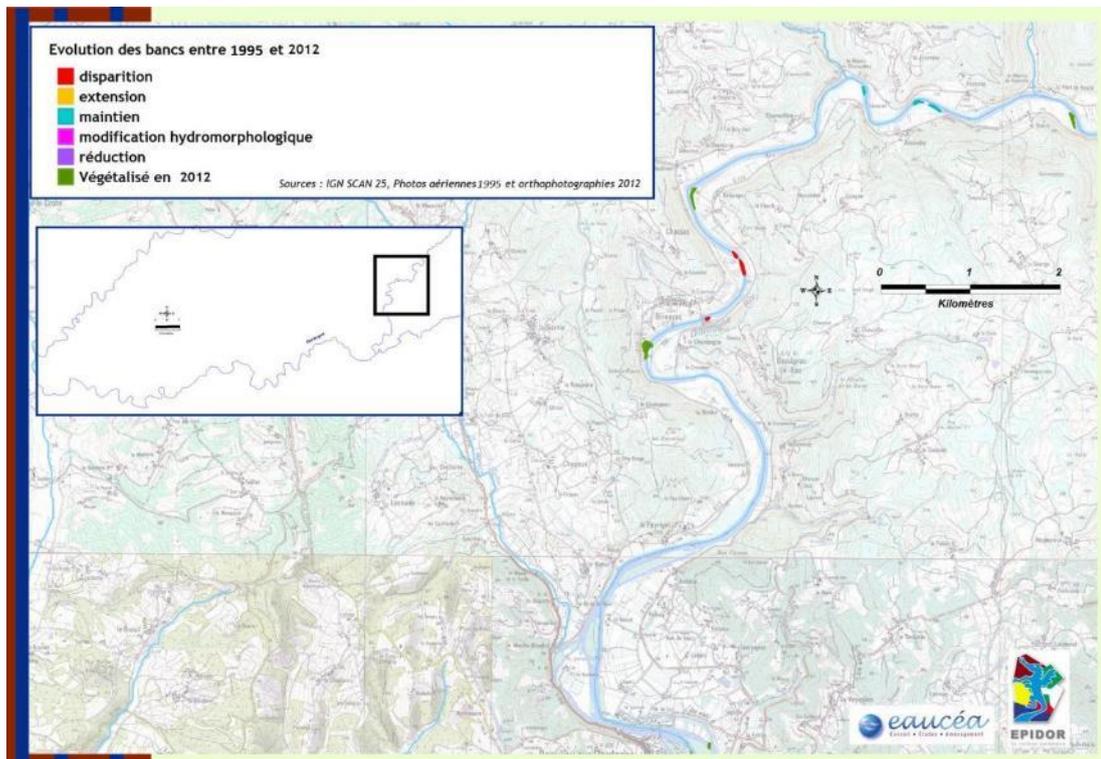


Figure 4-31 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 16

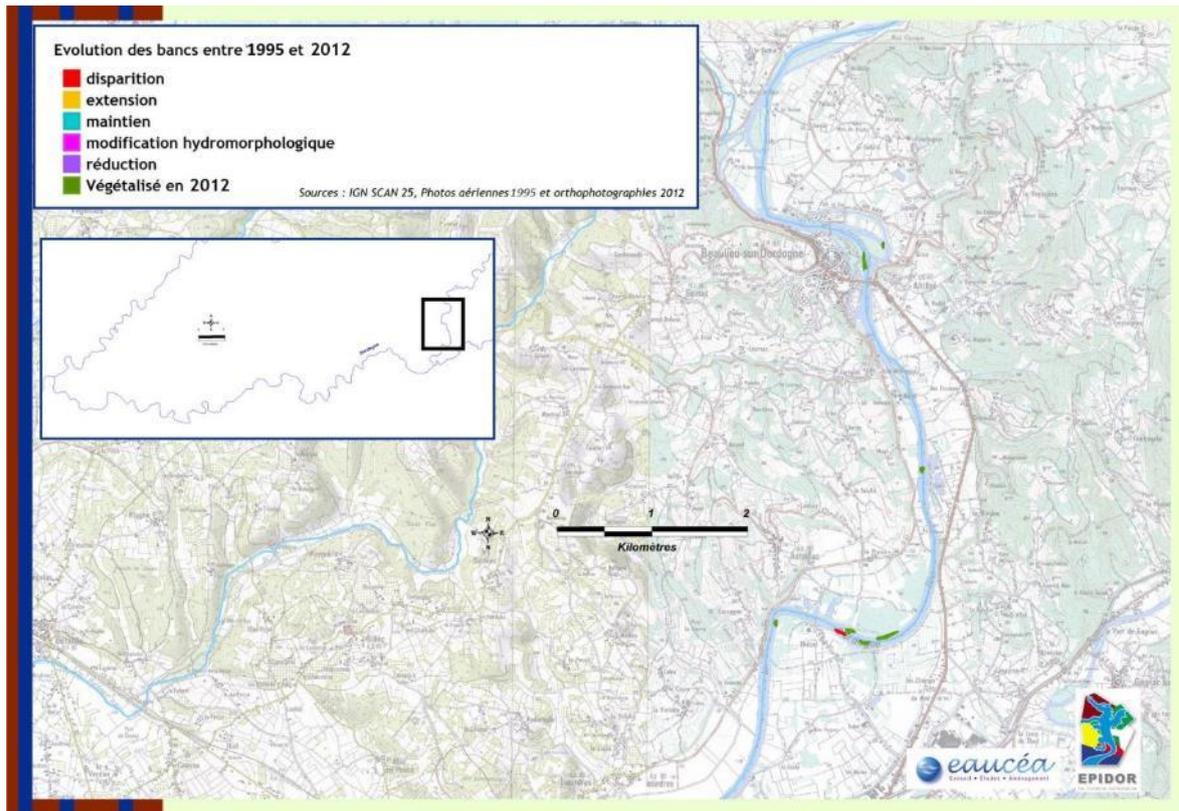


Figure 4-32 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 15

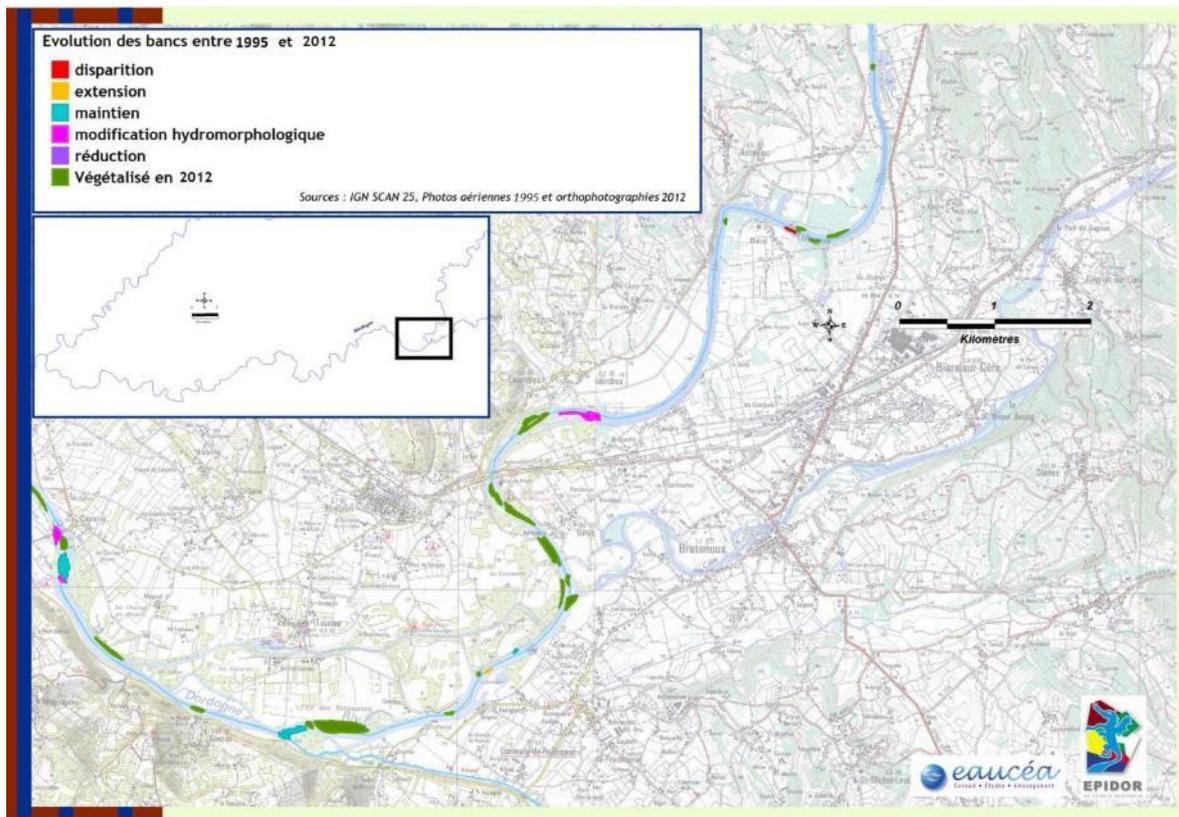


Figure 4-33 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 14

Les tronçons 14 à 17 en amont de la confluence Cère – Dordogne montrent un lit très figé ne semblant pas avoir eu de modifications entre 1995 et 2012 (exceptés quelques bancs végétalisés ou modifiés).

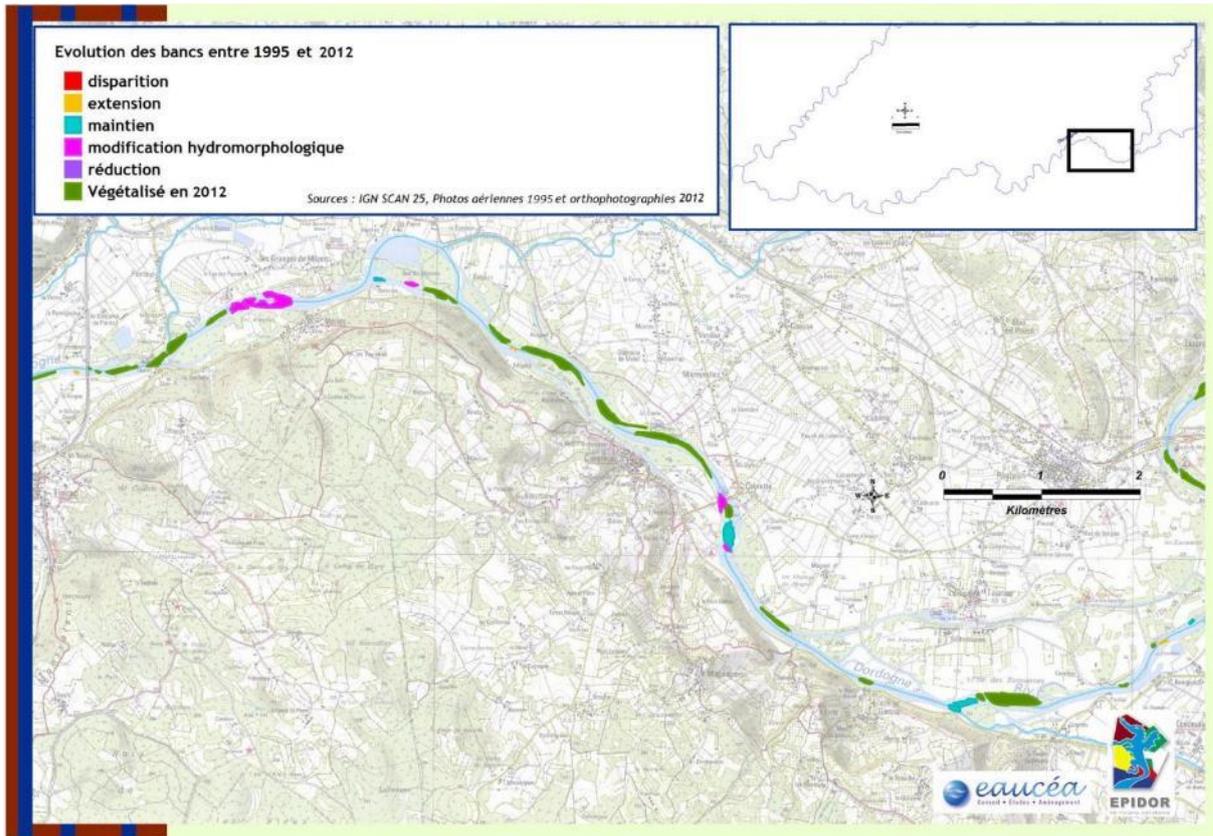


Figure 4-34 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 13

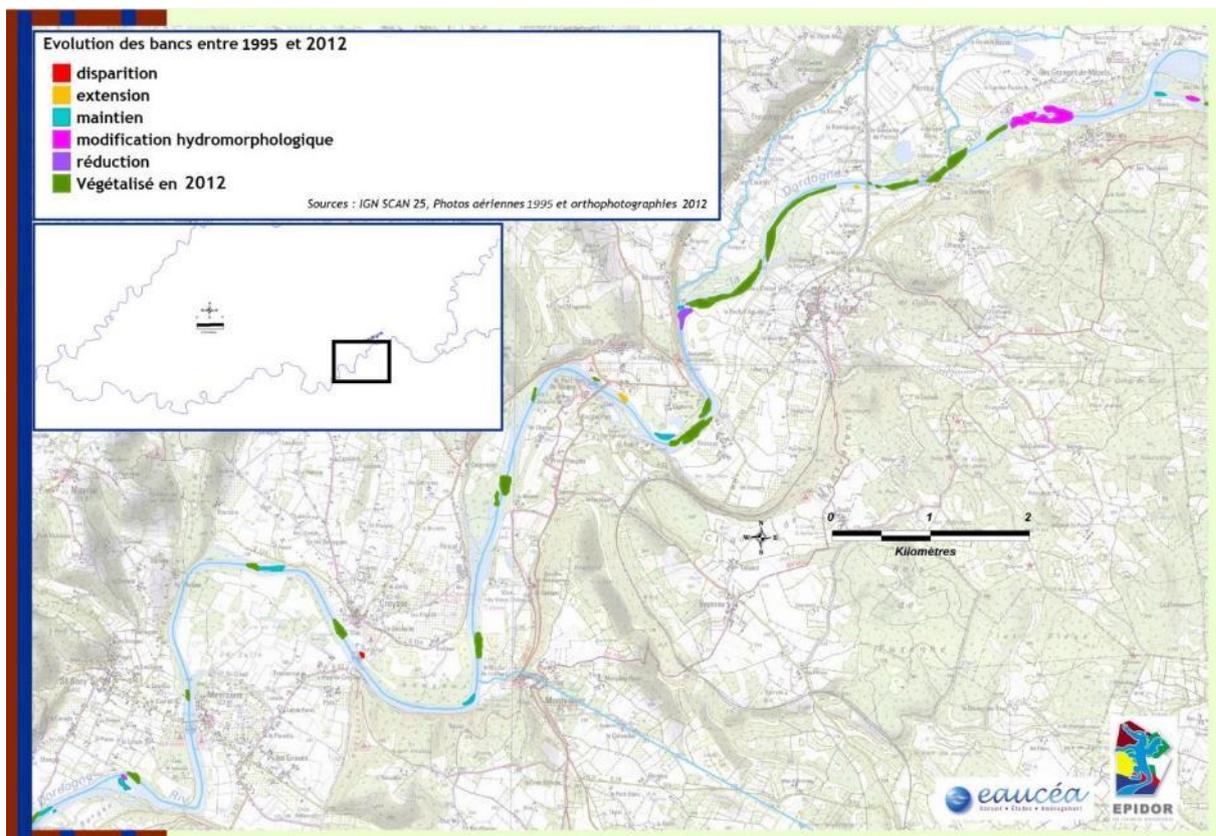


Figure 4-35 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 12

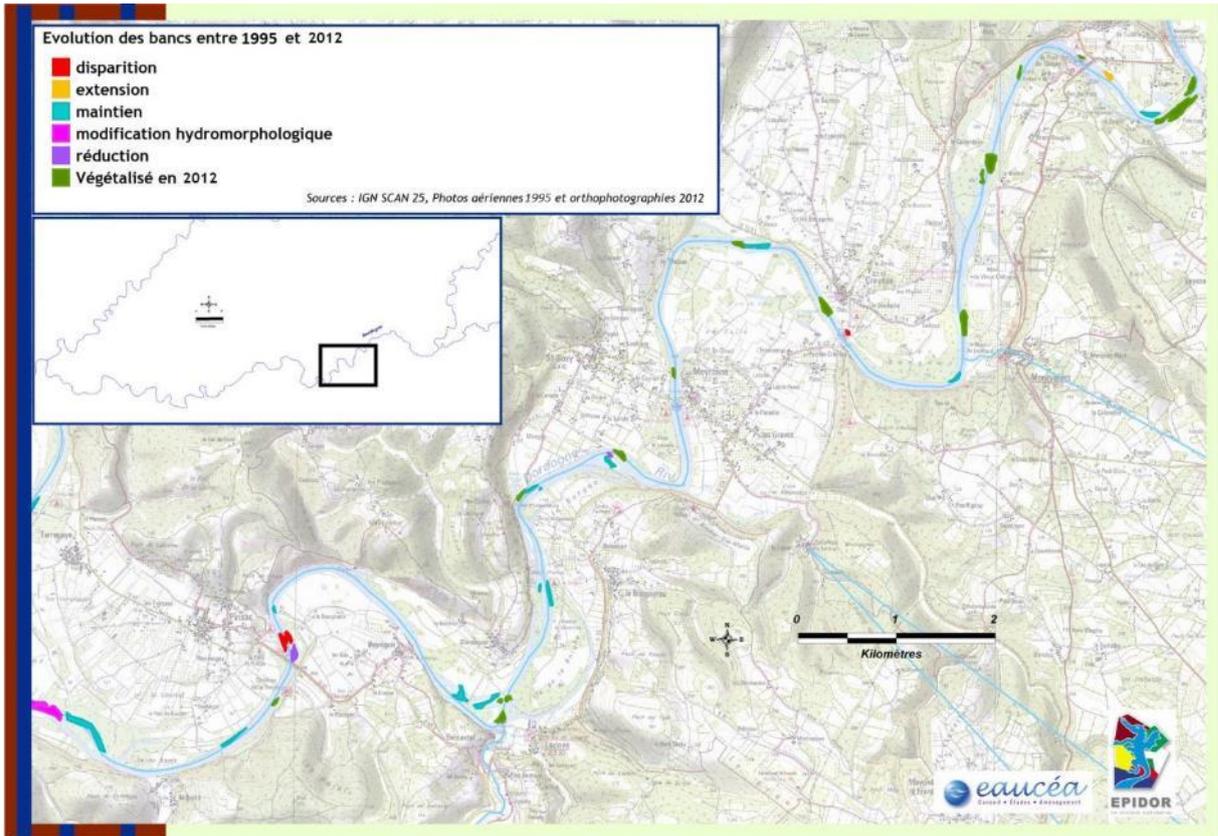


Figure 4-36 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 11

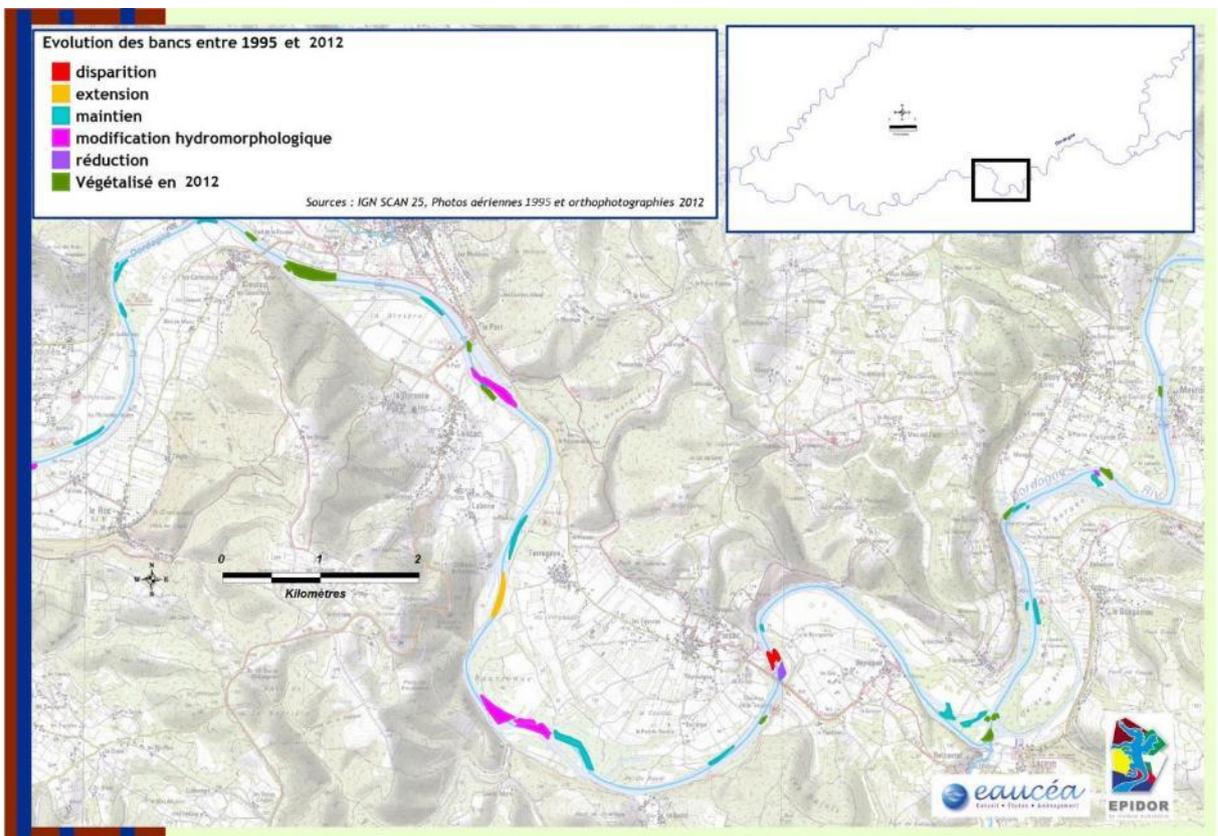


Figure 4-37 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 10

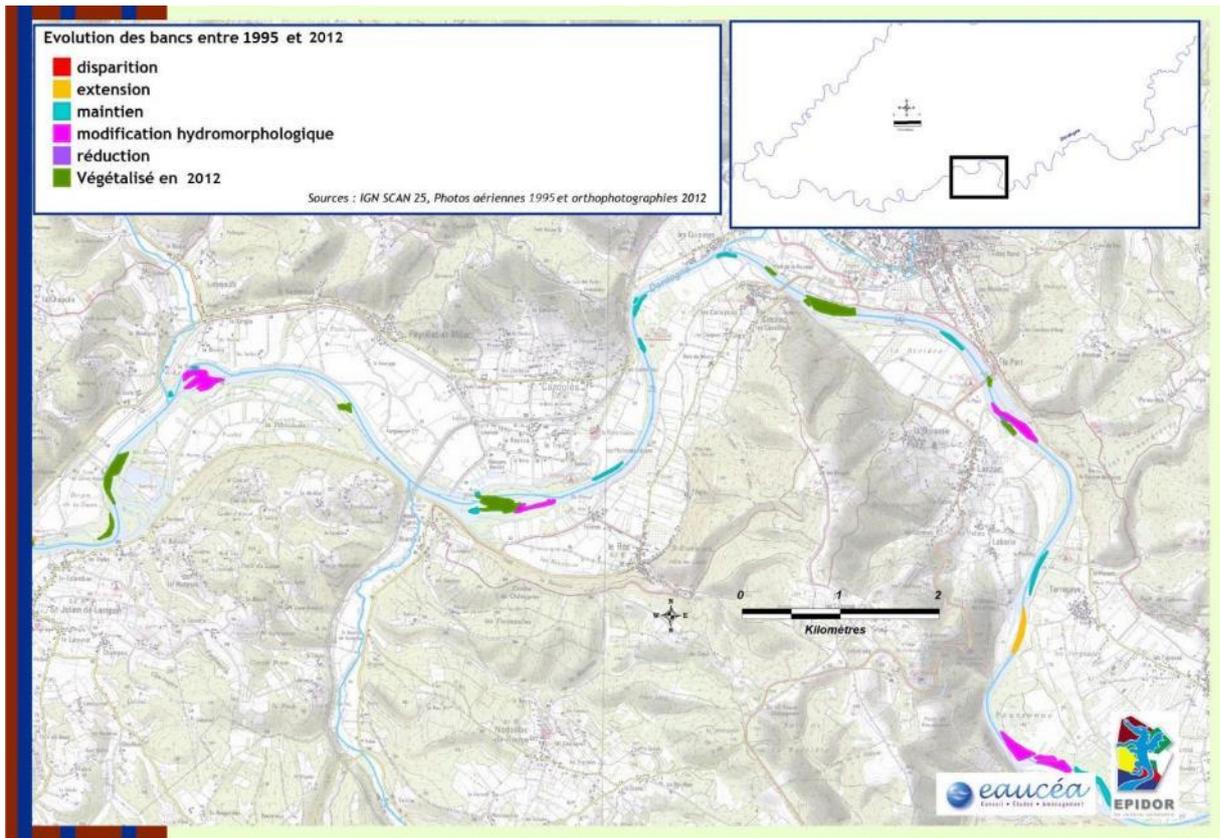


Figure 4-38 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 9

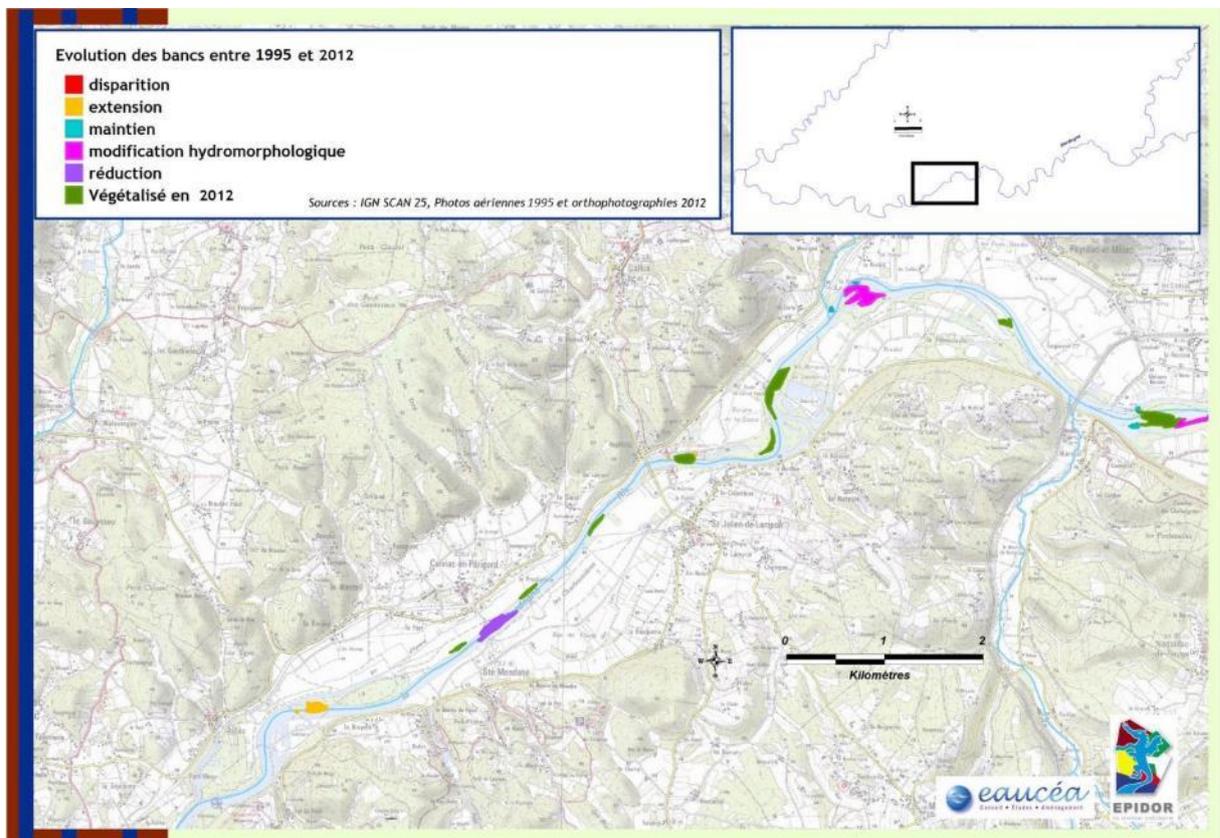


Figure 4-39 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 8

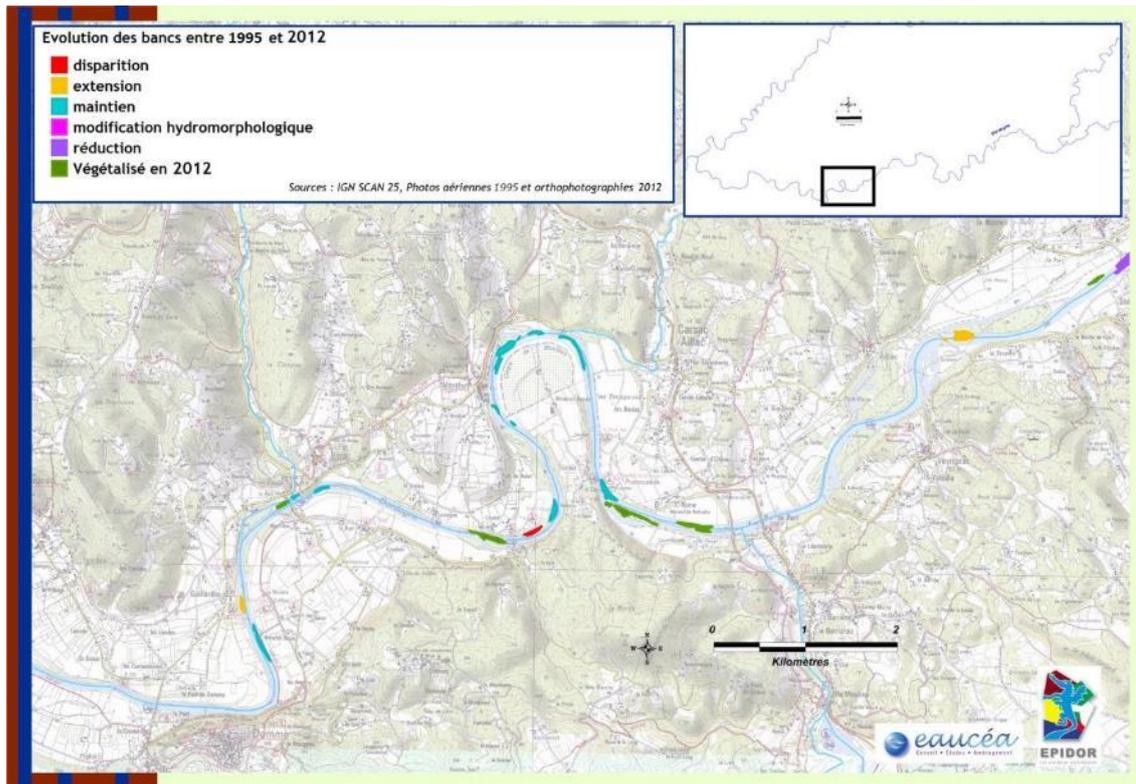


Figure 4-40 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 7

Les tronçons 14 à 7, de l’aval de la confluence avec la Cère jusqu’à St Julien de Lampon, font apparaître de nombreux bancs de convexité qui se sont végétalisés entre 1995 et 2012. Les zones de modification hydromorphologique sont aussi présentes sur ces secteurs, ponctuellement, indiquant les tronçons ayant une dynamique fluviale plus active comme l’analyse du § 4.1 l’a montré.

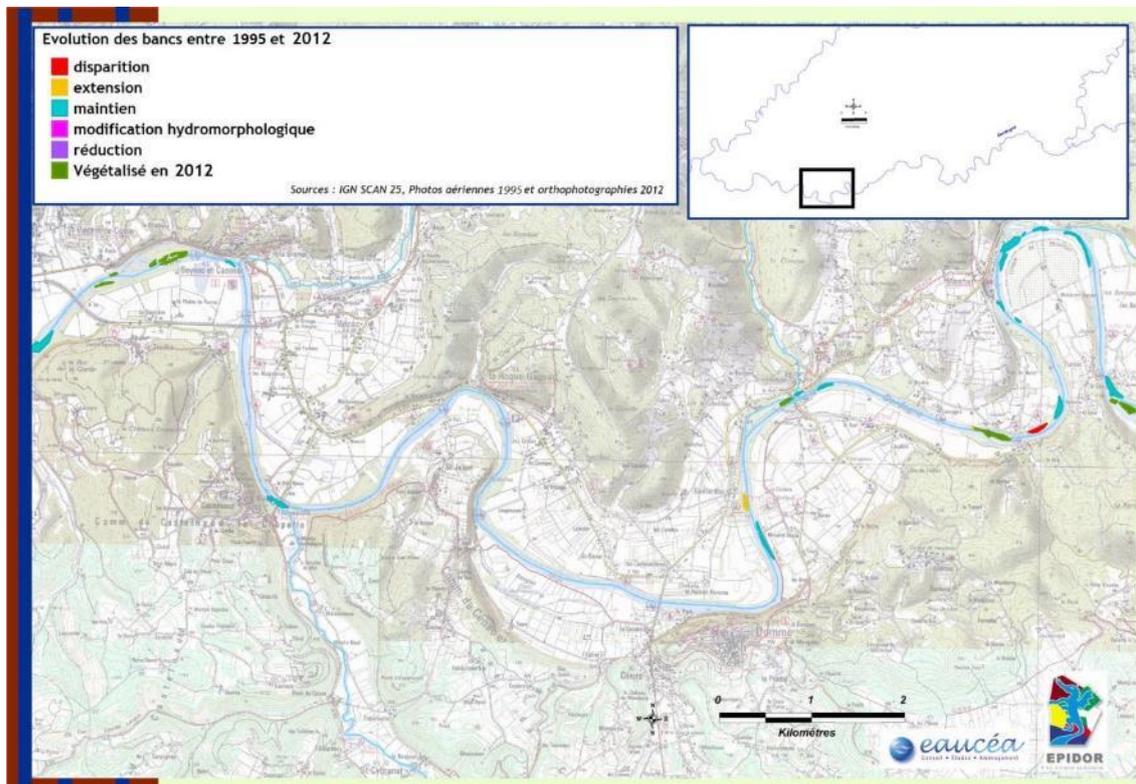


Figure 4-41 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 6

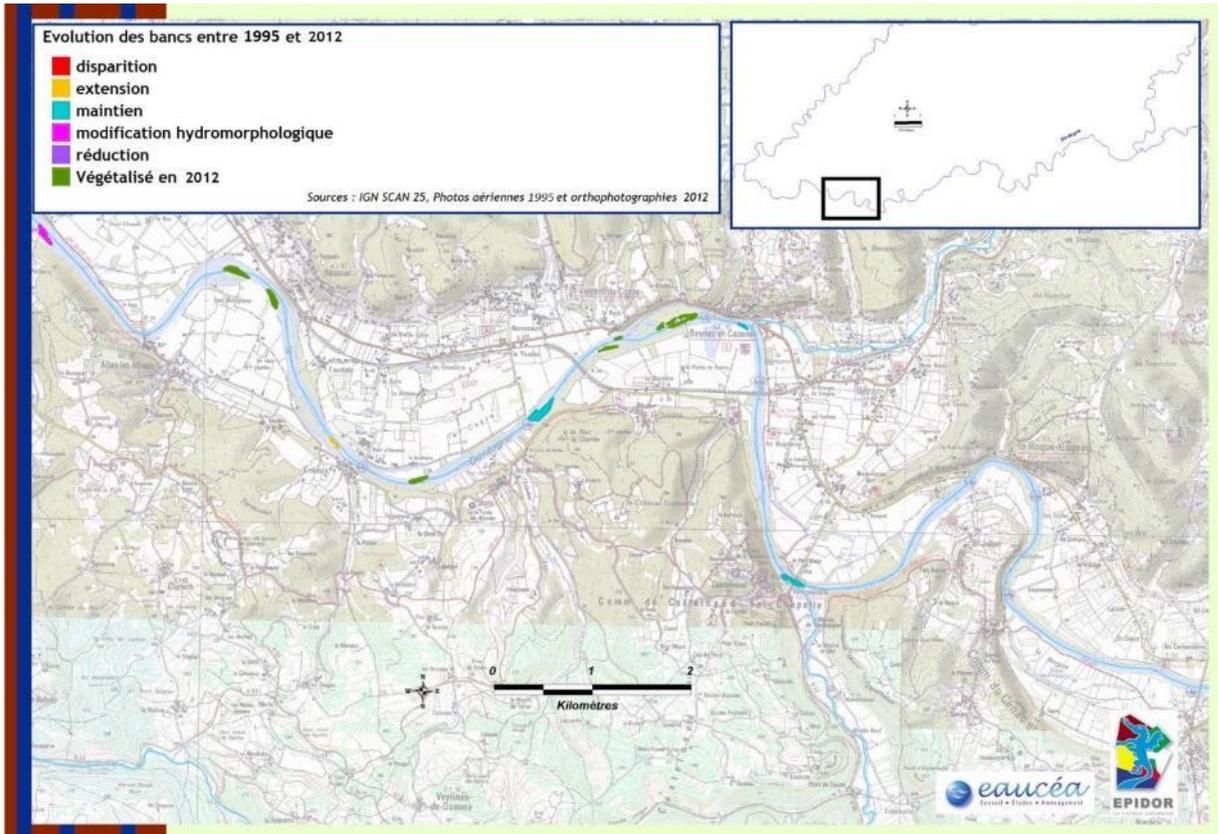


Figure 4-42 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 5

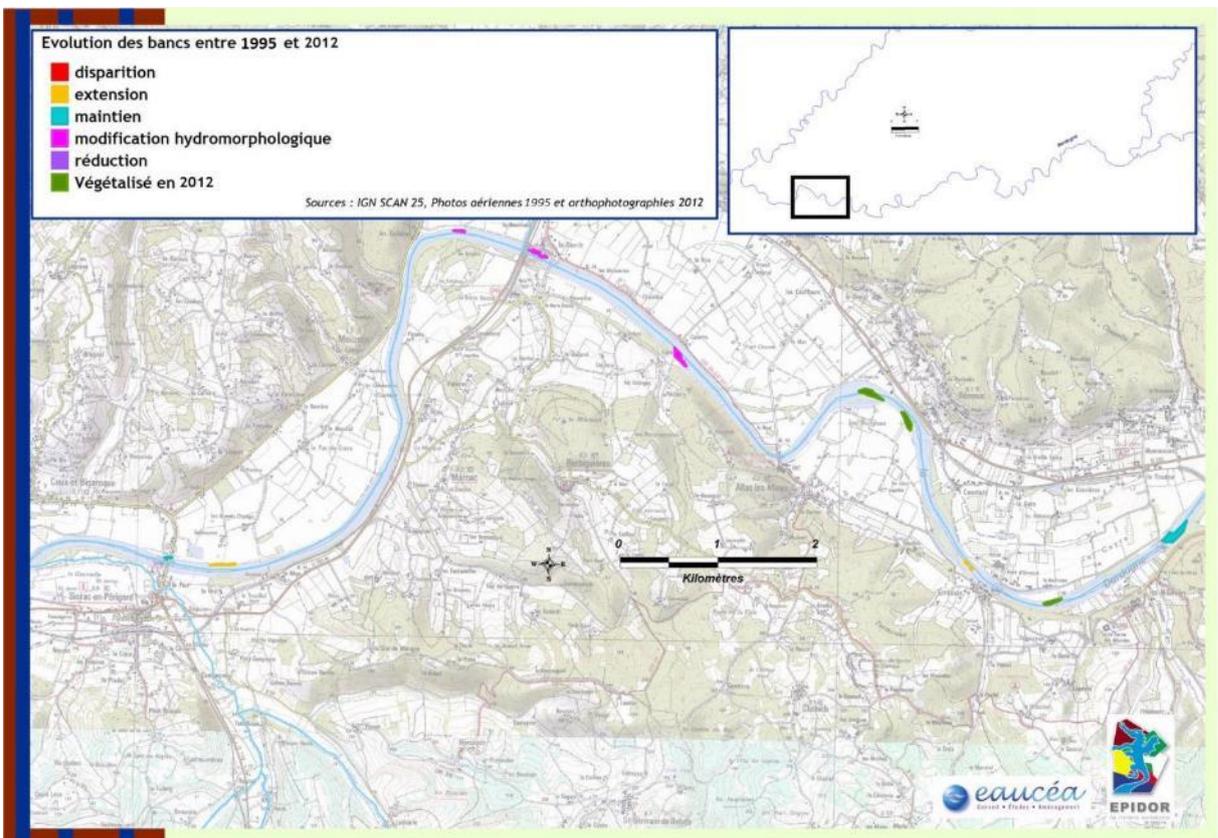


Figure 4-43 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçon 4

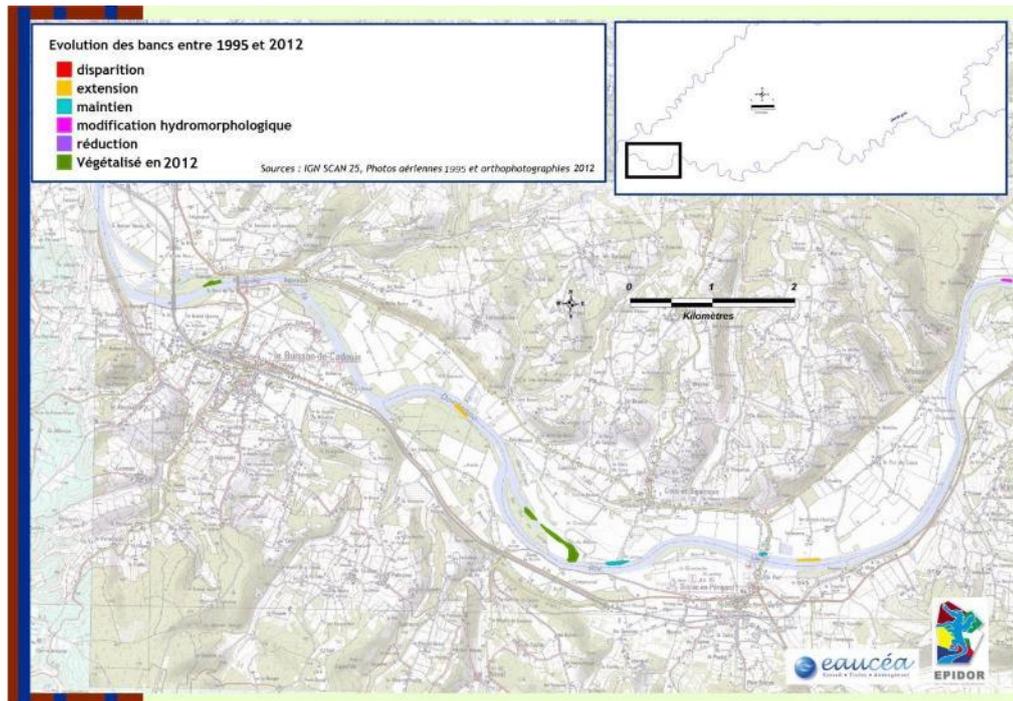


Figure 4-44 : Evolution des bancs entre 1995 et 2012 - Tronçons 1 à 3

4.4 Conclusion

A l'échelle de temps de mobilité des méandres (cf. Figure 2-2), i.e. en comparant la bande active de la Dordogne entre la carte du XIX^{ème} siècle et les photos aériennes de 2012, les déplacements repérés identifiables sont :

- Le rétrécissement de la bande active avec la constitution d'un chenal souvent unique d'écoulement et la déconnexion des annexes hydrauliques (tronçons amont 17 à 13),
- Des déplacements de méandres vers l'aval sur les tronçons 13 à 8,
- Ces observations rejoignent les conclusions du schéma berges Girac-Mauzac (Biotec, 2011).

A l'échelle plus rapide de la dynamique des bancs sédimentaires, les observations sont les suivantes :

- Les tronçons 14 à 17 en amont de la confluence Cère – Dordogne montrent un lit figé avec peu d'évolution de bancs,
- Les tronçons 14 à 7, de l'aval de la confluence avec la Cère jusqu'à St Julien de Lampon, font apparaître de nombreux bancs de convexité qui se sont végétalisés entre 1995 et 2012, ainsi que des zones de modification hydromorphologique,
- La stabilisation des bancs de sédiments est observée sur tout le secteur d'étude. La diminution de la durée des crues observées à Cénac tous les ans entre 1995 et 2012 pourraient contribuer à cette stabilisation du lit.

Le contexte du suivi de ces évolutions est le suivant :

- L'analyse du profil en long de la Dordogne montre une incision du lit due aux extractions de granulats en lit mineur jusqu'en 1981,
- L'analyse des débits de plein bord à Argentat et Cénac entre 1995 et 2012 montre que le nombre d'épisodes de débits supérieurs au débit de plein bord est très faible à Argentat comparé à Cénac. La situation d'Argentat située immédiatement en aval des installations hydroélectriques en est la cause.

La dynamique fluviale est analysée plus précisément à l'aide du modèle hydraulique au chapitre suivant, celui-ci sert de base à l'analyse de la capacité morphogène de la Dordogne :

- Pour établir un diagnostic sur l'état d'équilibre de la dynamique fluviale (lien entre débit de plein bord, hauteur et largeur au miroir pour un substrat médian),
- Pour évaluer les diamètres de substrat potentiellement mobilisables sur le secteur d'étude.

5 ANALYSE DE LA CAPACITE MORPHOGENE DE LA DORDOGNE

La modélisation du secteur d'étude Beaulieu-Limeuil est faite avec le logiciel HEC-RAS (US army corps of engineers) qui permet de réaliser une modélisation hydraulique des cours d'eau à partir de relevés topographiques de profils en travers de leur lit.

Le modèle résout les équations de St-Venant à partir des données bathymétriques de chaque profil en travers pour un débit donné. Il est possible de calculer des lignes d'eau pour des écoulements permanents ou transitoires.

La géométrie du modèle HEC-RAS pour le secteur de Dordogne étudié a été réalisée à l'aide de profils en travers issus de l'étude bathymétrique de la Dordogne (EPIDOR, 2004) et dont les données proviennent d'une campagne de relevés effectués en 1998. Ces profils en travers ont été complétés par le LIDAR 2010 (RDE ALTI de l'IGN) pour décrire le lit mineur jusqu'au niveau de plein bord de la Dordogne. Le domaine de calcul ainsi construit est limité en amont à la confluence avec la Bave car au-delà les données de 1998 et 2010 n'étaient pas cohérentes en cote.

Le détail de la mise en place du modèle et de son calage est exposé en annexe (§10 Annexe 1).

Le modèle hydraulique réalisé avec HEC-RAS donne des résultats cohérents à partir de la bathymétrie réalisée en 1998 combinée avec le LIDAR 2010. Les résultats présentés ci-après sont issus de simulations en régime stationnaire : les simulations du modèle hydraulique permettent d'évaluer les contraintes de frottement pour des gammes de débits allant jusqu'aux débits de plein bord.

5.1 Dynamique fluviale à débit de plein bord du secteur d'étude

La dynamique fluviale de la Dordogne sur le secteur d'étude est analysée ici selon le procédé présenté au chapitre 0 et proposant une loi empirique pour évaluer la largeur au miroir et la hauteur d'eau d'équilibre pour un débit de plein bord.

L'objectif est de comprendre si l'équilibre dynamique de l'écoulement de la Dordogne à débit de plein bord correspond à celui observé en moyenne sur d'autres rivières.

La procédure de calcul est la suivante, pour tout le secteur d'étude couvert par le modèle hydraulique HEC-RAS :

- Pour chaque profil en travers (bathymétrie 1998), le débit de plein bord, la hauteur d'eau et la largeur au miroir sont évalués à l'aide du modèle hydraulique HEC-RAS.
- Pour chaque profil en travers, le diamètre moyen du substrat dominant est évalué en chaque point à l'aide de la donnée de 2011.

Hypothèses de calcul :

- Les données bathymétriques datant de 1998 et le substrat datant de 2011 sont combinés en faisant l'hypothèse qu'ils reflètent la situation actuelle.
- La partie de bathymétrie identifiée à l'aide du LIDAR 2010 (représentant les berges du lit mineur) n'a pratiquement jamais de substrat identifié sur la couche SIG aux points correspondants. Ces données sont ignorées. Le substrat de chaque profil en travers est donc caractérisé par celui identifié à l'aide de la bathymétrie de 1998.
- Les diamètres moyens du substrat en chaque point de bathymétrie sont évalués à partir de la valeur moyenne de référence de la classe représentée dans la couche SIG de 2011.

5.1.1 Détermination du débit de plein bord

Le secteur d'étude s'étendant sur plus de 130 km de linéaire de cours d'eau, le débit de plein bord évolue de l'amont vers l'aval entre 500 m³/s et 800 m³/s environ. Pour préciser ces valeurs, une simulation est réalisée en régime stationnaire à l'aide d'HEC-RAS pour des débits compris entre 500 et 850 m³/s avec un incrément de 50 m³/s, soit 8 valeurs de débit.

La figure ci-dessous représente un exemple de profil en travers et les côtes de hauteur d'eau pour chacun des débits simulés (notés PF1 pour 500 m³/s à PF8 pour 850 m³/s). Le débit de plein bord est identifié pour la côte symbolisée en rouge (ici, 600 m³/s) :

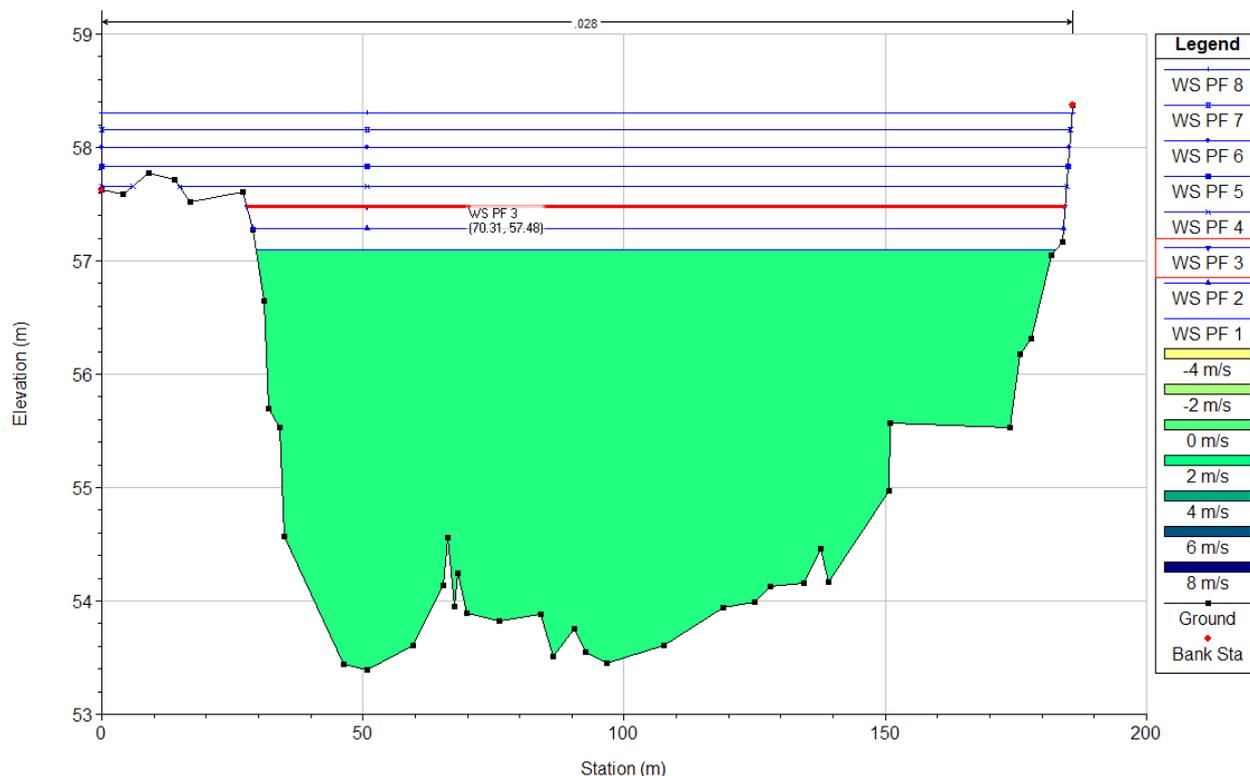


Figure 5-1 : Profil en travers et côte d'eau pour 8 valeurs de débit allant de 500 m³/s à 850 m³/s

A partir des résultats de la simulation, un débit de plein bord est affecté à chaque profil en travers de la bathymétrie de 1998. Les résultats sont représentés synthétiquement sur la carte ci-dessous sous forme de classes de débit avec un intervalle de 50 m³/s. L'écart-type des débits de plein bord présentés ci-dessous est compris entre 10 et 60 m³/s pour chaque tronçon.

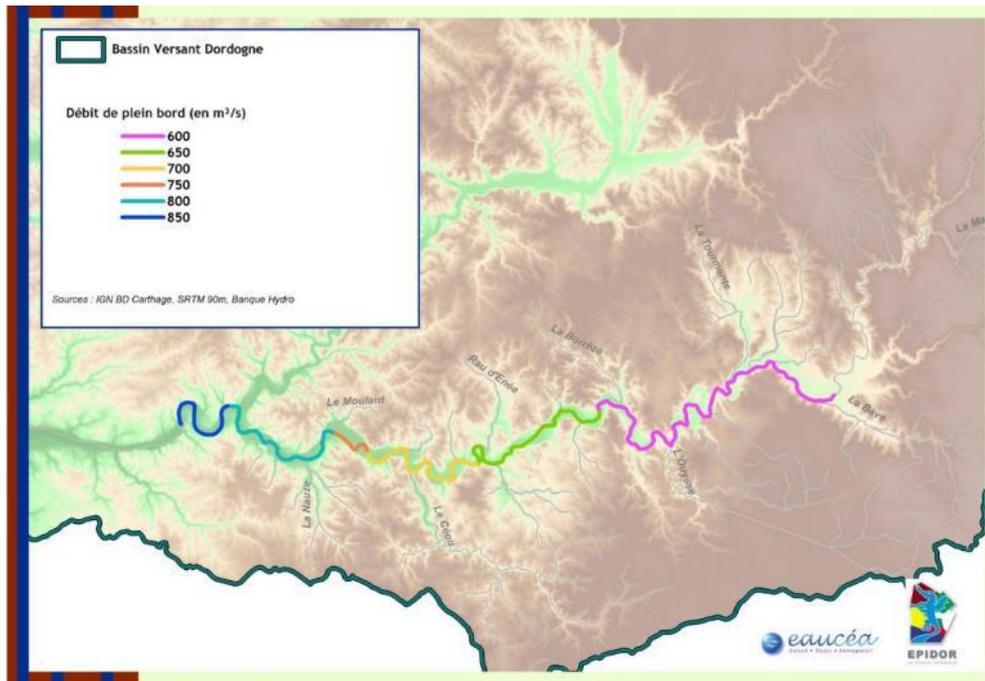


Figure 5-2 : Cartographie des valeurs de débit de plein bord par tronçon de 10 km

Nota :

- La carte ci-dessus ne correspond pas à une réalité hydraulique et hydrologique issue de l'évolution d'une ligne d'eau amont-aval : un débit de 550 m³/s à Argentat ne correspondant pas à un débit de 850 m³/s à Limeuil.
- Les simulations HEC-RAS peuvent, sur quelques profils en travers, fournir un résultat de côte de la ligne d'eau au-dessus de la limite du lit mineur ; dans ce cas la valeur de débit de plein bord retenue est localement diminuée. Cette procédure ne change pas les résultats obtenus sur des tronçons de 10 km de long pour la suite.

Le secteur d'étude est ensuite subdivisé en tronçons d'environ 10 km de long afin d'agréger les données calculées sous forme d'une valeur moyenne par tronçon. La carte ci-dessous représente les tronçons de 10km sur le secteur d'étude



Figure 5-3 : Numérotation des tronçons d'analyse du secteur d'étude

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

distance à l'aval (km)	nb de profils en travers	débit moyen (m ³ /s)	largeur moyenne (m)	hauteur moyenne (m)
10	32	850	177	4.2
20	20	798	158	3.1
30	32	794	138	3.6
40	33	739	135	3.5
50	31	677	121	3.9
60	30	690	109	3.8
70	27	648	118	3.6
80	30	648	125	3.4
90	28	621	128	3.4
100	31	598	115	3.1
110	29	591	120	3.1
120	31	597	121	3.2
132.973	39	600	130	2.7

Tableau 5-1 : Débit, largeur au miroir et hauteur d'eau sur chaque tronçon – Régime de plein bord

Les débits de plein bord identifiés correspondent, en termes de débit moyen journalier, aux périodes de retour suivantes sur le secteur d'étude :

- Pour la partie amont, 600 à 650 m³/s, les données de la station hydrométrique d'Argentat sont mobilisées, avec un débit de plein bord estimé à 550 m³/s (donnée Epidor) ;
- Pour la partie aval, 700 à 850 m³/s, ce sont celles de la station de Cénac qui sont mobilisées, avec un débit de plein bord estimé à 700-750 m³/s (donnée Epidor).

Les périodes de retour des débits de plein bord sur la période 1952-2013 sont respectivement d'environ 4 ans pour Argentat et environ 1,5 ans pour Cénac.

L'influence des installations hydroélectriques en amont d'Argentat vis-à-vis de la période de retour du débit de plein bord est très importante sur la partie amont du secteur d'étude, beaucoup moins sur la partie aval qui bénéficie d'apports du bassin versant intermédiaire.

La figure ci-après représente les puissances spécifiques, calculées à débit de plein bord en moyenne, pour chaque tronçon d'analyse :

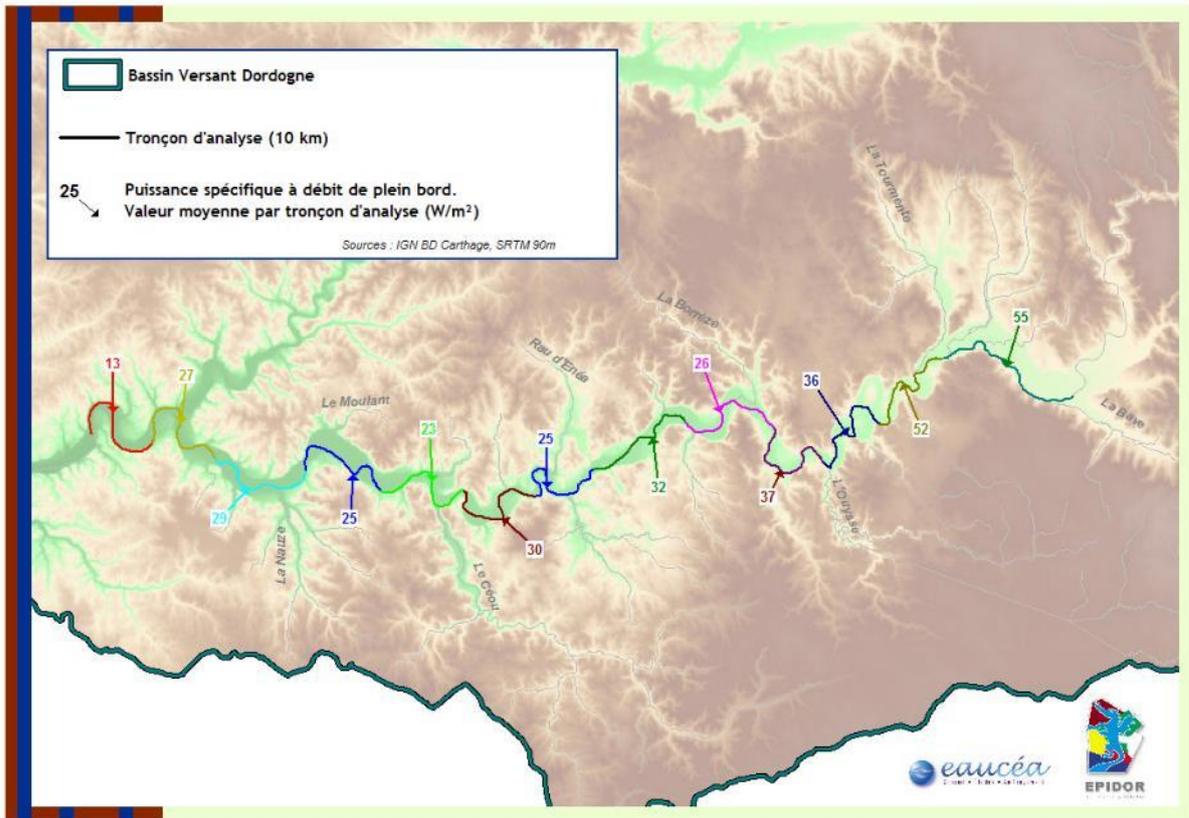


Figure 5-4 : Puissance spécifique moyenne par tronçon – Débits de plein bord

Le seuil de 35 W/m^2 identifié par JR Malavoi et JP Bravard (Malavoi & Bravard, Elements d'hydromorphologie fluviale, 2010) est franchi sur les quatre premiers tronçons. Ce seuil est identifié dans une classification géodynamique des cours d'eau vis-à-vis de leur capacité potentielle d'érosion des berges et d'apport potentiel de sédiments provenant de l'amont.

5.1.2 Détermination des valeurs du diamètre médian D_{50} du substrat

Dans ce paragraphe, les valeurs médianes et moyennes de diamètre de substrat sont supposées identiques en chaque point de profil en travers. Cette hypothèse signifie qu'en chaque point le substrat est réparti selon une distribution normale de diamètres autour de la valeur identifiée.

Rappelons que la granulométrie sur une section se distribue selon des profils caractéristiques de chaque section de cours d'eau. Les éléments d'analyse très précis mais très localisés effectués en 1979 (Etude sédimentologique de la vallée de la Dordogne; Rebouillat) donne un aperçu de la diversité de la granulométrie. Ce paramètre est donc assez difficile à approcher de façon globale sans des analyses spécifiques et nombreuses, hors de portée du présent travail.

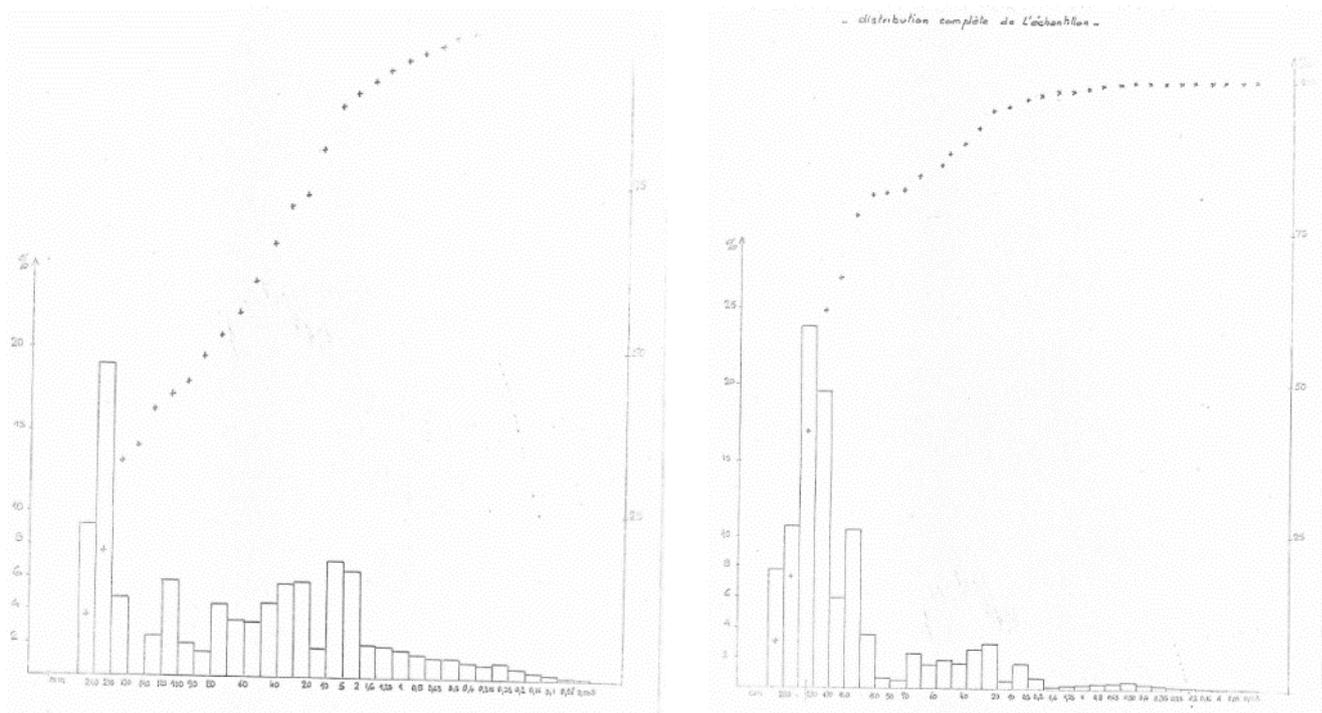


Figure 5-5 : Profil granulométrique à Carennac et à Brivezac (1979)
(en abscisse les classes de taille des galets, graviers jusqu'aux sables)

Néanmoins, à l'aide de la cartographie du substrat de 2011 (Epidor) et de la bathymétrie de 1998 (Epidor), une classe de substrat dominant est identifiée. La valeur moyenne du diamètre de chaque classe est retenue. La figure ci-dessous représente un exemple de points des profils en travers et la couche des classes de substrat dominant.

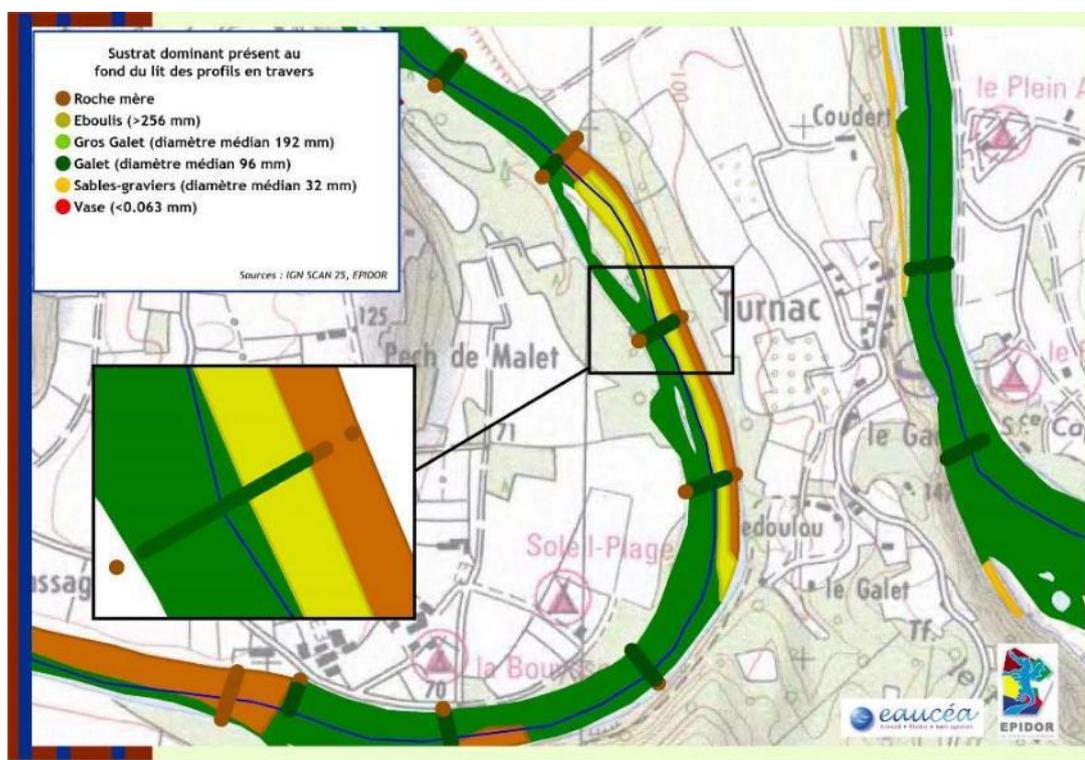


Figure 5-6 : Profils en travers et substrat dominant du lit de la Dordogne

Nota : la classe sable-gravier est répartie en deux diamètres représentés en présence identique
Le tableau ci-dessous contient les valeurs moyennes calculées sur les tronçons de 10 km du secteur d'étude :

distance à l'aval (km)	D ₅₀ moyen (mm)
10	0.063
20	109
30	96
40	96
50	101
60	103
70	96
80	96
90	96
100	96
110	96
120	93
132.973	96

Tableau 5-2 : Diamètre médian moyen du substrat sur les tronçons du secteur d'étude

Dans l'ensemble, le diamètre médian moyen évalué sur chaque tronçon est assez important : 96 à 100 mm. Seul le premier tronçon est majoritairement composé soit de sables soit d'enrochements (diamètre non disponible).

Les données du premier tronçon aval n'étant pas complètes, et celui-ci étant situé en aval du secteur d'étude (aval de la confluence avec la Vézère), il est exclu de l'analyse dans la suite.

5.1.3 Analyse de la dynamique fluviale

Pour chacun des tronçons d'analyse, la largeur de plein bord, la hauteur de plein bord et le débit de plein bord adimensionnés par le diamètre du substrat médian sont calculés selon les expressions présentées précédemment au § 0.

Les figures ci-dessous représentent, en échelle logarithmique, la largeur de plein bord puis la hauteur de plein bord en fonction du débit, adimensionnés, ainsi que les courbes de référence présentées §2.2.

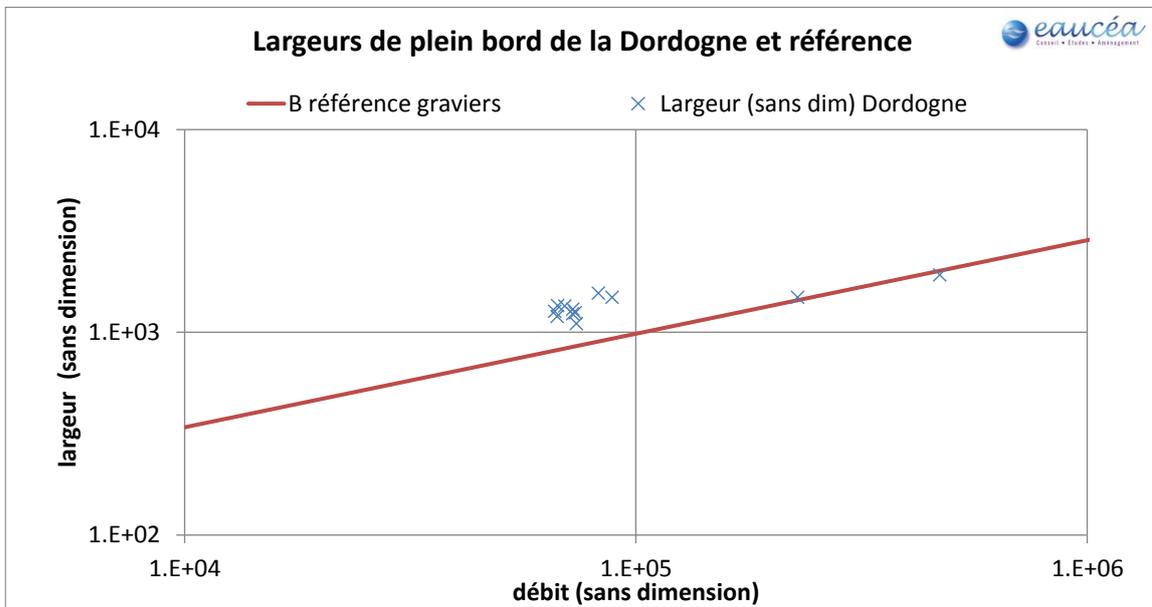
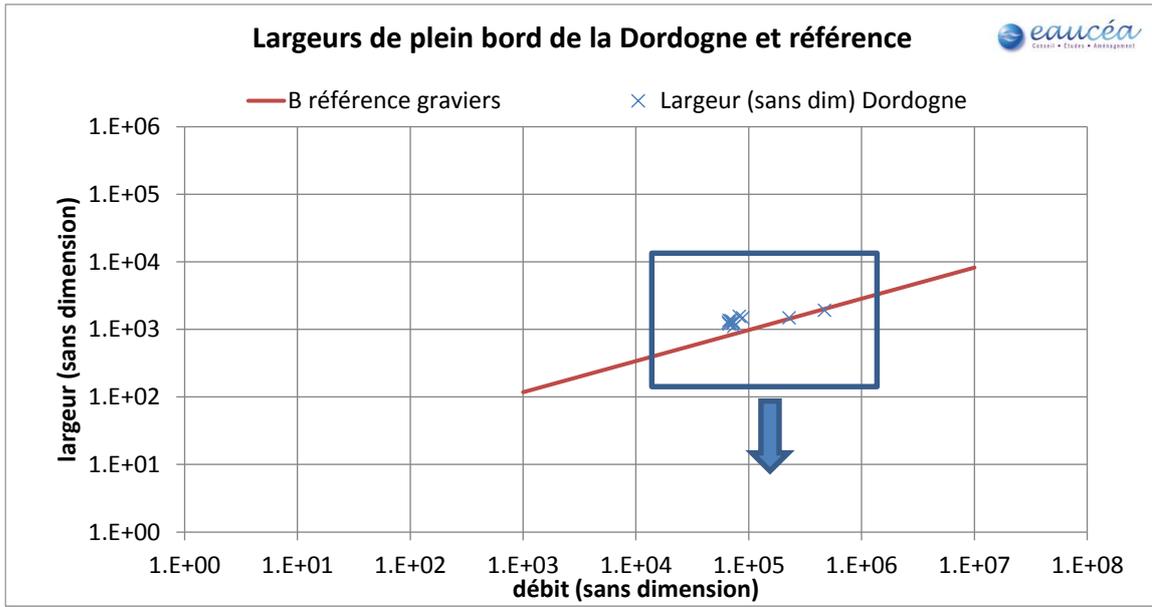


Figure 5-7 : Largeurs de plein bord en fonction du débit sur le secteur d'étude (Echelles log-log)

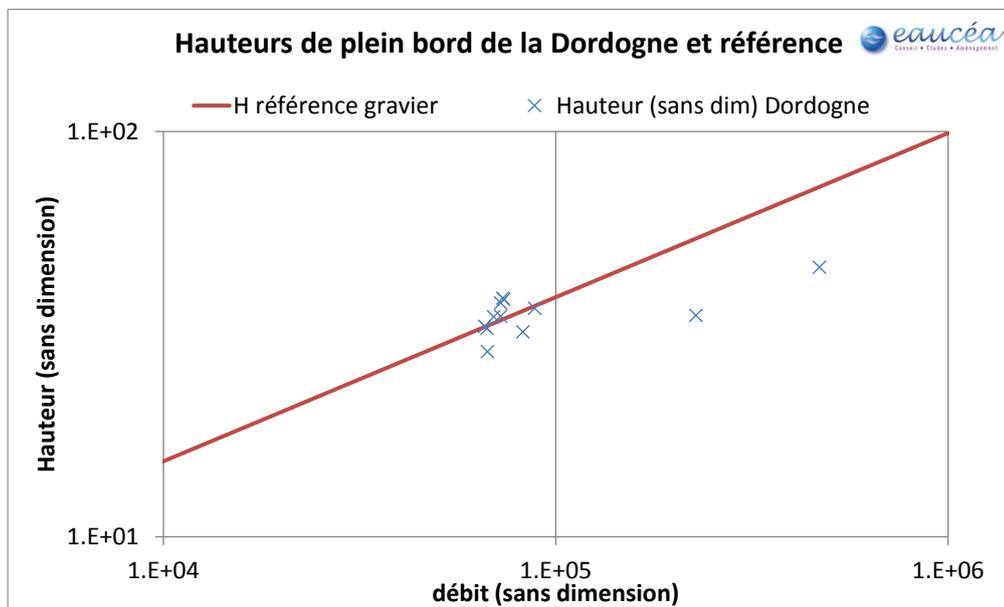
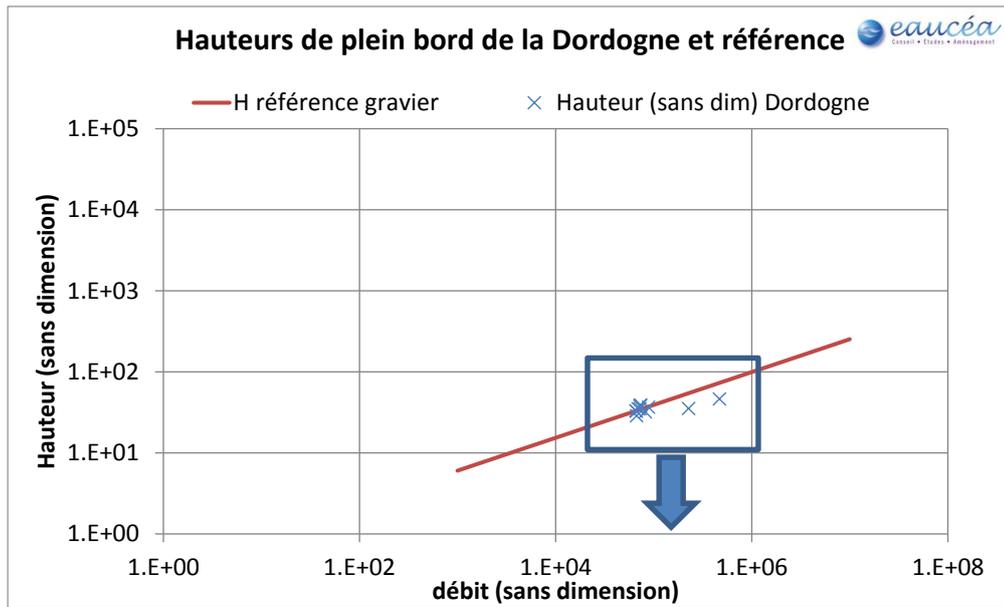


Figure 5-8 : Hauteurs de plein bord en fonction du débit sur le secteur d'étude (Echelles log-log)

Pour la Dordogne sur le secteur d'étude, les résultats sont les suivants :

- Les largeurs adimensionnées calculées sont dans l'ensemble **supérieures** à la valeur moyenne de référence.
- Les hauteurs adimensionnées calculées sont dans l'ensemble **égales ou inférieures** à la valeur moyenne de référence.

La sensibilité de ce résultat à une variation de la valeur de D_{50} est directement identifiable par les définitions des largeurs, hauteurs et débits adimensionnés (§ 2.1) :

- La largeur et la hauteur sont inversement proportionnelles à D_{50} , donc en première approximation une variation de 20% de D_{50} correspond à une variation de 20% de largeur ou hauteur.
- Le débit est proportionnel à la puissance 3/2 de D_{50} , donc en première approximation une variation de 20% de D_{50} correspond à une variation de 30% de débit.

Ce résultat est un premier élément d'information indiquant une tendance du comportement de la dynamique fluviale de la Dordogne par rapport à un comportement moyen observé sur d'autres cours d'eau.

La répartition spatiale de tous les points de calcul du secteur d'étude (394 profils en travers) représentée ci-dessous confirme la tendance observée plus haut, surtout pour la largeur qui est nettement supérieure à la valeur de référence sur tout le secteur d'étude alors que la hauteur semble rester autour de la valeur de référence correspondante.

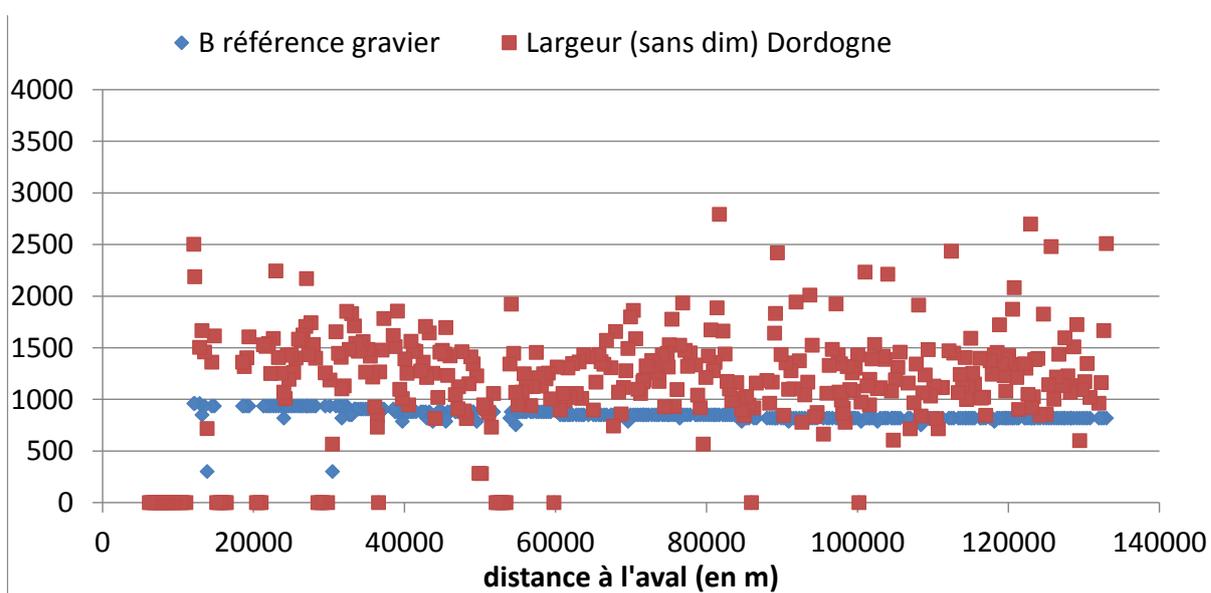


Figure 5-9 : Répartition spatiale des largeurs de plein bord adimensionnées de la Dordogne

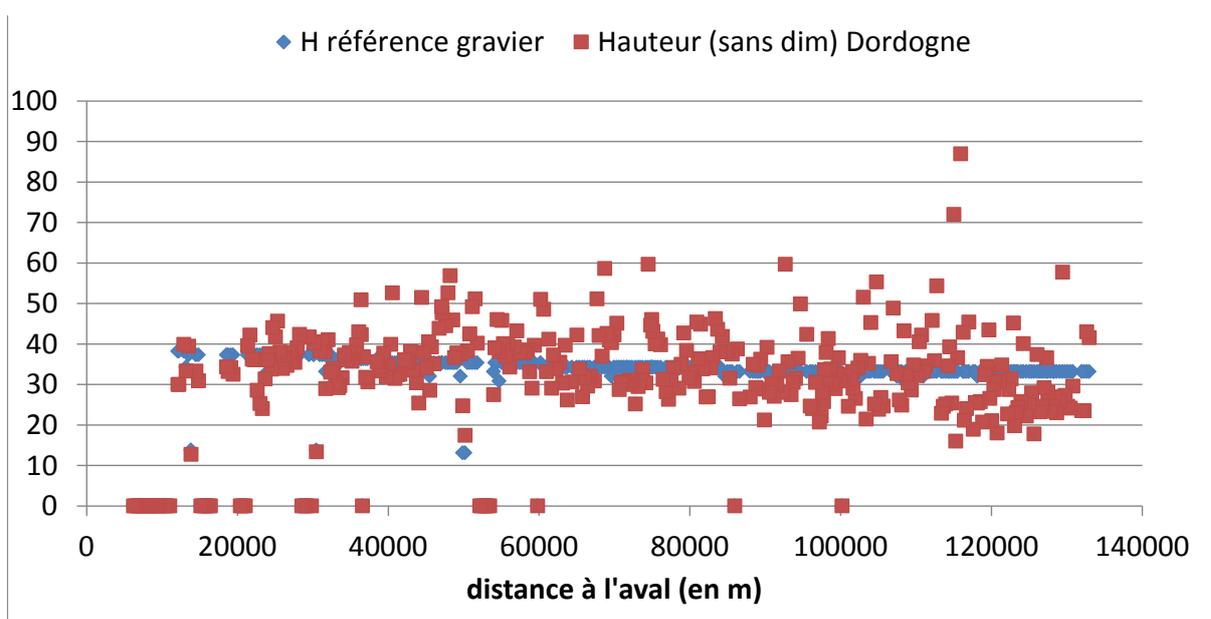


Figure 5-10 : Répartition spatiale des hauteurs de plein bord adimensionnées de la Dordogne

En reprenant l'échantillon de référence de rivières naturelles présenté par Parker au §2.2, la Dordogne se positionne approximativement comme indiqué sur les deux figures ci-dessous

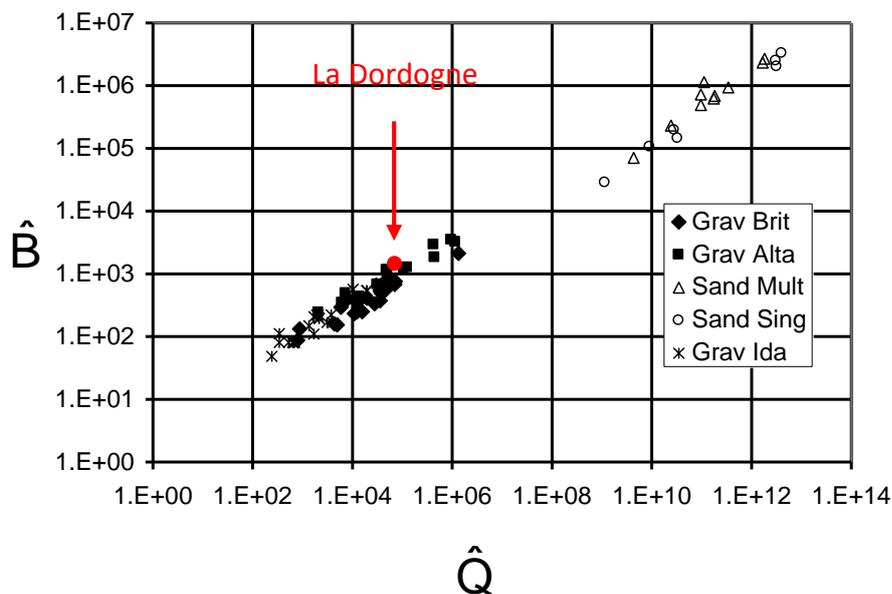


Figure 5-11 : Largeur adimensionnelle de plein bord de la Dordogne et rivières de référence

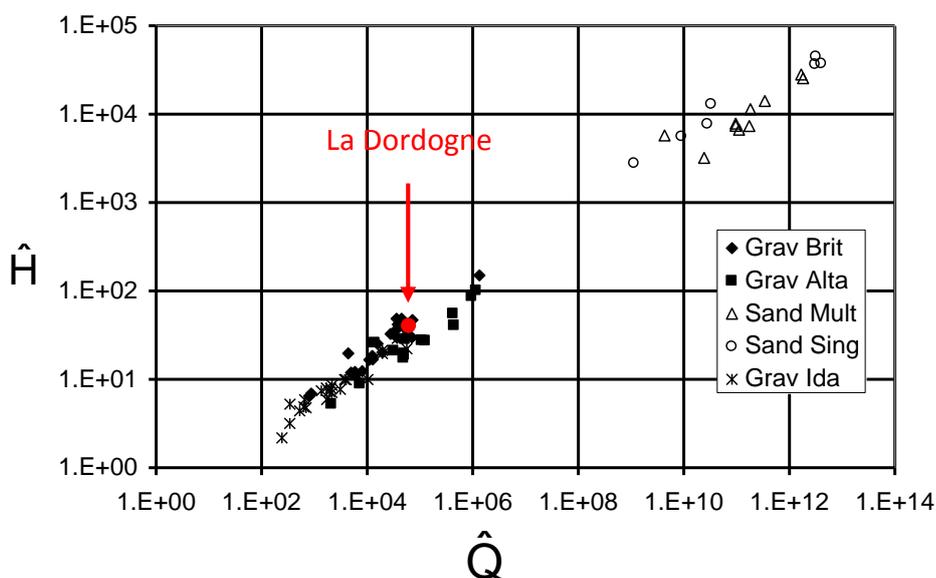


Figure 5-12 : Hauteur adimensionnelle de plein bord de la Dordogne et rivières de référence

A l'échelle globale du secteur d'étude, pour les valeurs moyennes du débit de plein bord, de largeur de plein bord et de diamètre de sédiment médian, l'équilibre de la dynamique fluviale de la Dordogne à son débit de plein bord est proche de celle de cours d'eau naturels. Les perturbations subies par la Dordogne, passées et actuelles (extraction de granulats, activité hydroélectrique), ne sont pas visibles à cette échelle d'analyse concernant la morphologie de son lit.

5.2 Analyse de débits morphogènes sur le secteur d'étude

L'analyse de la couche de substrat dominant au niveau des profils en travers du secteur d'étude a montré (paragraphes précédents) que le diamètre moyen de ce substrat est important. La classe de substrat dominant le plus présent est celle des galets dont le diamètre moyen est de 96 mm.

La recherche de diamètres maximums de particules mobilisables est présentée dans cette partie, en utilisant la théorie exposée au § 0.

Dans le cas du secteur étudié sur la Dordogne, les valeurs moyennes du paramètre de Shields sont représentées sur la figure suivante en fonction du débit pour les mêmes tronçons d'analyse que ceux définis au §5.1.1.

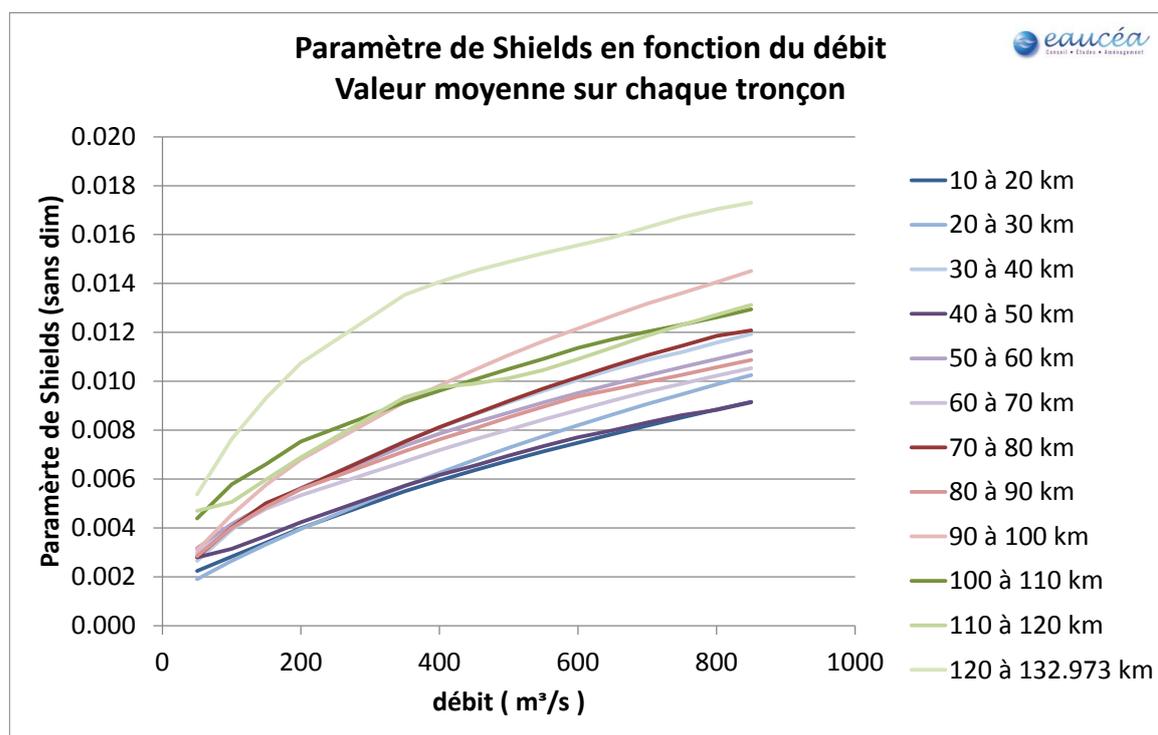


Figure 5-13 : Paramètre de Shields en fonction du débit par tronçon d'analyse

Cette estimation est basée sur les contraintes de frottement calculées à l'aide du modèle hydraulique HEC-RAS, une valeur $\rho_s = 2,6 \rho$ (dans la littérature le facteur de proportion est compris entre 2,6 et 2,75), et le diamètre moyen provenant de la couche de substrat de 2011 calculé selon la méthode exposée au paragraphe précédent.

Le tableau ci-dessous contient les valeurs du nombre de Reynolds particulaire Re_p en fonction du diamètre de particules :

Diamètre (mm)	5	10	15	20	25	30	35
Re_p	1401	3962	7278	11206	15660	20586	25942
Diamètre (mm)	40	50	60	70	80	90	100
Re_p	31695	44294	58227	73374	89646	106969	125284

Tableau 5-3: Valeurs du Reynolds particulaire en fonction de la taille de substrat

Pour la Dordogne sur le secteur d'étude (hors la zone du plan d'eau de Mauzac), le calcul du nombre Re_p et le seuil de charriage proposé sur la figure ci-dessus (Parker, 2004) montrent que la valeur retenue pour τ_c^* est de 0,025 à 0,03 selon les diamètres de particules présents.

La comparaison des seuils d'entraînement et des résultats de simulation du paramètre de Shields ci-dessus (Figure 5-13) montre que pour le substrat dominant présent sur le secteur d'étude, le seuil d'entraînement du charriage n'est pas atteint même à un débit de 850 m³/s.

La sensibilité du paramètre de Shields au diamètre du substrat est importante (inversement proportionnel au diamètre), la gamme de substrat mobilisable potentiellement peut être connue en fonction des conditions hydrauliques.

L'analyse précédente basée sur une seule estimation de diamètre médian de substrat est donc complétée par la recherche de la valeur maximale du diamètre des particules potentiellement mobilisables sur les tronçons du secteur d'étude pour des débits de plein bord (cf. figure ci-dessous).

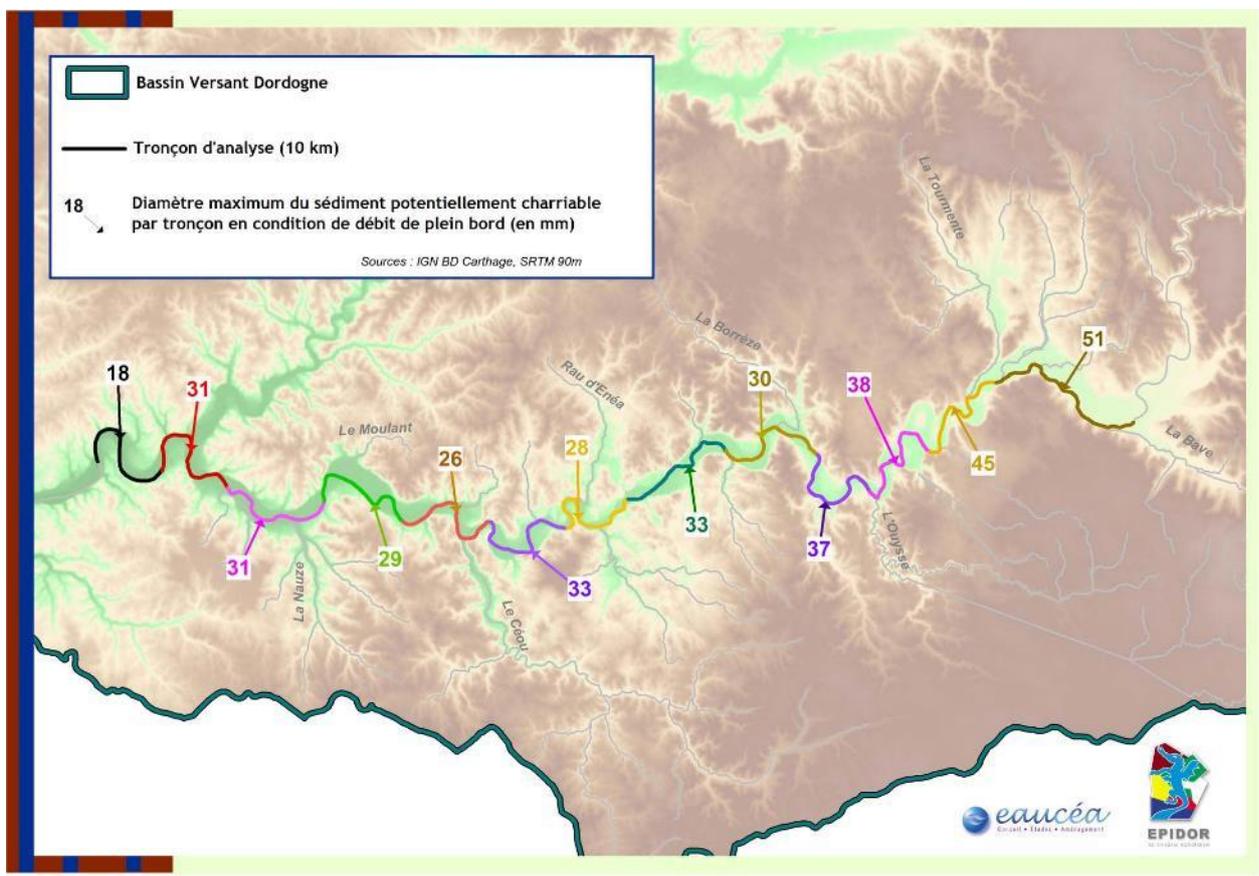


Figure 5-14 : Diamètre maximum potentiellement mobilisable par tronçon – Débits de plein bord

En allant de l'amont vers l'aval, le diamètre mobilisable diminue sauf pour le tronçon précédant immédiatement la confluence avec la Vézère. Le diamètre mobilisable calculé sur le premier tronçon correspond à la zone du plan d'eau du barrage de Mauzac. L'ordre de grandeur des particules mobilisables, entre 50 mm et 30 mm, correspond à un type de substrat biogène et important pour l'écosystème de la Dordogne.

Afin de comparer la situation de plein bord avec un événement hydrologique réel sur le secteur d'étude, le diamètre maximum potentiellement mobilisable sur chaque tronçon a été calculé pour la crue du 14 février 2014. Le débit moyen journalier était de 340 m³/s à Argentat, 550 m³/s à Souillac et 600 m³/s à Cénac. Les résultats sont présentés sur la carte ci-après pour chacun des tronçons d'analyse.

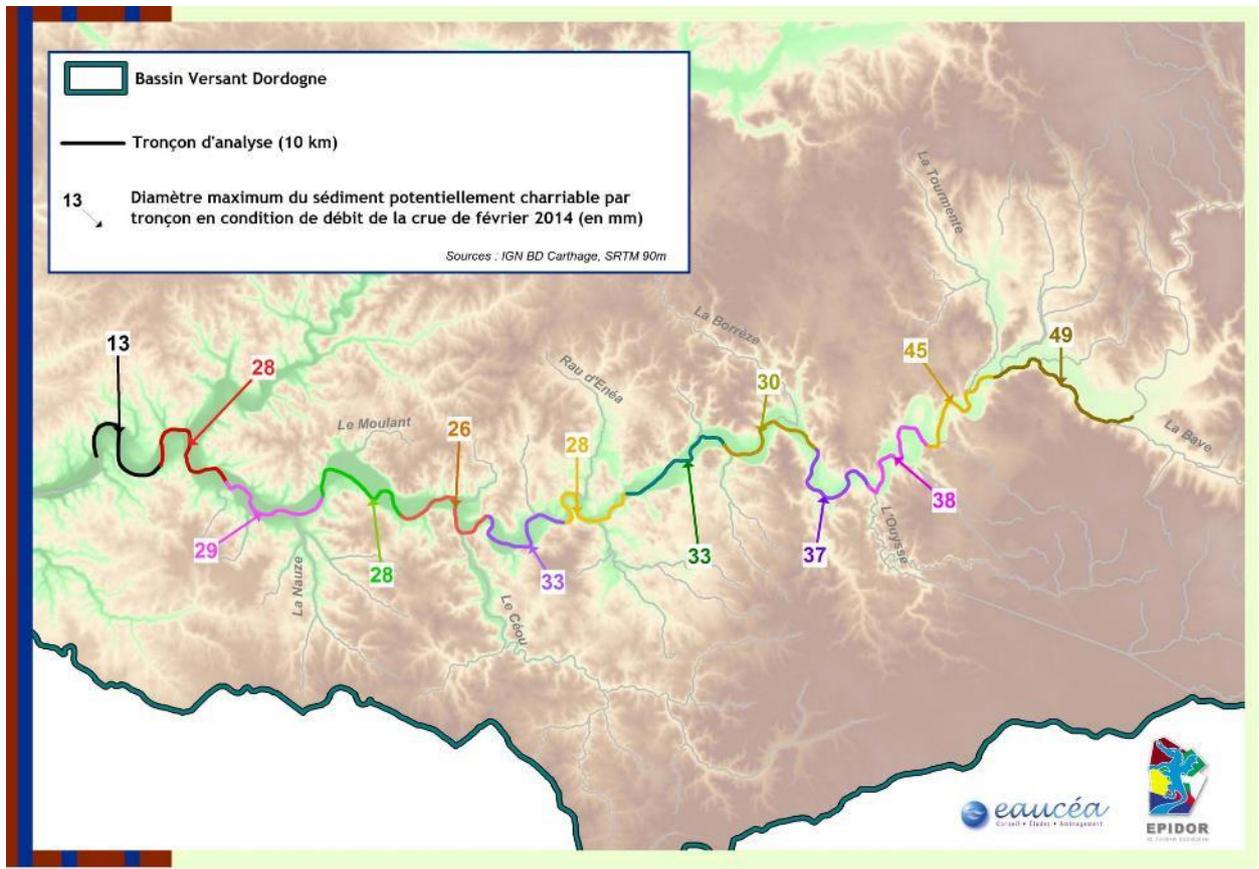


Figure 5-15 : Diamètre maximum potentiellement mobilisable par tronçon – Crue du 14/02/2014

Les diamètres calculés avec les conditions hydrauliques de la crue du 14 février 2014 sont identiques aux valeurs calculées en cas de débit de plein bord dans 8 tronçons d'analyse et les différences sont très faibles sur les autres tronçons par rapport aux incertitudes de la méthode de calcul (hypothèses sur la densité du substrat, valeur du seuil d'entraînement pour le paramètre de Shields, incertitudes du modèle hydraulique).

La différence entre l'exemple de la crue de 2014 ci-dessus et la situation de plein bord montre les limites de l'approche hydraulique réalisée avec un modèle 1D et des résultats moyennés sur des tronçons de 10 km de long.

L'étude de la capacité morphogène des débits de plein bord doit être précisée :

- La capacité érosive de la rivière au niveau des berges est plus complexe à analyser et ne dépend pas seulement de la contrainte au fond du lit
- Des analyses locales montrent des écoulements beaucoup plus diversifiés et donc une capacité érosive de la rivière précisée selon les secteurs (cf. § 6).
- La durée de l'événement est importante (1 journée pour la crue du 04/02/2014) pour qualifier le volume de sédiments transportés.

5.3 Synthèse des résultats

Les relations entre débits morphogènes, leurs périodes de retour, les contraintes dues au substrat issues des analyses précédentes sont les suivantes :

- L'hypothèse de l'étude est que le débit de plein bord est celui qui façonne la géométrie en plan, en long et en travers d'équilibre du cours d'eau. Pour autant, ce n'est pas le seul débit « morphogène » et des débits plus faibles ou plus forts ont aussi une action morphogénique importante.
- Le débit de plein bord de la Dordogne est de l'ordre de 600 m³/s en amont vers Beaulieu jusqu'à 850 m³/s en aval vers Limeuil.
- La période de retour des débits de plein bord est supérieure à 4 ans pour l'amont vers Argentat jusqu'à un peu plus d'une année en aval de Cénac. L'impact de la chaîne hydroélectrique sur la fréquence d'atteinte des débits de plein bord est important en amont, mais s'atténue à Cénac et en aval. Cette période de retour n'est pas le seul paramètre impacté. Il a été montré dans le chapitre sur l'hydrologie que la dynamique des crues a été fortement modifiée, en particulier la vitesse de décrue est devenue deux fois plus rapide avec les aménagements hydroélectriques.
- L'analyse de la dynamique fluviale de la Dordogne à débit de plein bord met en évidence une largeur du cours d'eau au miroir supérieure à la moyenne observée sur d'autres cours d'eau en dynamique fluviale à l'équilibre. La dynamique fluviale peut s'exercer de plusieurs manières :
 - Il y a potentiellement un lien entre le déficit sédimentaire et le taux d'érosion latérale mais il est généralement inverse. Plus il y a de bancs alluviaux plus l'érosion est forte sur la rive opposée (effet de macro épi) ;
 - La forme du lit pourrait répondre à une dynamique fluviale d'un régime hydrologique avec un débit de plein bord plus important et pourrait être en cours de fermeture. L'extraction de granulats en lit mineur jusqu'en 1980 a incisé le lit ; une dynamique de comblement du lit après l'arrêt de ces extractions se poursuit encore.
- La capacité morphogène de la Dordogne montre qu'à débit de plein bord, le charriage du substrat s'exerce potentiellement pour des diamètres de 30 à 50 mm. Les substrats de cette taille sont biogènes et ont une valeur importante pour l'écosystème.

Afin de compléter l'étude théorique et les résultats de la simulation, des mesures de terrain ont été menées sur deux sites afin d'analyser les dynamiques d'écoulements. Ces données nous permettent d'évaluer la diversité des écoulements rencontrés à plus petite échelle, d'évaluer leur capacité de transport de substrat et le lien avec certaines zones de berges soumises à érosion, annexes hydrauliques mises en eau.

6 MESURES SUR DEUX SITES A ENJEUX

Deux sites de mesures ont été retenus comme prévu dans au lancement de l'étude. Les analyses menées permettent de décrire la diversité des écoulements rencontrés, en particulier au niveau d'annexes hydrauliques et d'estimer leurs débits au jour de la mesure. Le potentiel de la rivière à mobiliser des sédiments sous les conditions de mesures est aussi évalué.

Contexte hydrologique

Le débit de la Dordogne est resté stable à 260 m³/s au niveau Souillac toute la journée du 6 mai 2015. Plus en aval vers le cingle de Montfort, le débit a été mesuré à 270 m³/s, ce qui est cohérent avec les apports intermédiaires du bassin versant de la Dordogne.

Le premier site de mesures situé à Pinsac se situe légèrement en amont de la station hydrométrique de Souillac, le deuxième site de mesures situé au niveau du cingle de Montfort est quelques kilomètres en aval de cette même station.

Pour les deux sites le protocole de mesures est le suivant :

- Parcours en bateau des sites et réalisation de profils en travers espacés selon les éléments observés sur le terrain le jour de la mesure. L'écart entre deux profils en travers peut être de quelques mètres sur un endroit présentant des enjeux importants (érosion) ou une caractéristique hydromorphologique intéressante (annexes hydrauliques,...) jusqu'à plusieurs centaines de mètres,
- Pour chaque profil en travers, les mesures effectuées sont la réalisation d'un profil vertical des champs de vitesses et hauteurs d'eau avec un profileur de courant acoustique à effet Doppler (ADCP) et d'une bathymétrie à l'aide d'un échosondeur. Le débit est aussi mesuré par l'ADCP pour chaque profil en travers.

6.1 *Mesure de la capacité de transport sédimentaire*

6.1.1 Diversité des profils dans un même tronçon

La restitution des données de vitesse peut donc s'analyser à plusieurs échelles.

Deux stations de mesures ont été sélectionnées : **Montfort et Pinsac**. Pour les deux sites de mesures, la cartographie de la bathymétrie et des vitesses en 3D sur plusieurs km a été réalisée. Les résultats détaillés sont présentés en annexe (§11 Annexe 2).

Les deux figures ci-dessous représentent les points GPS des profils en travers réalisés sur le site de mesure de Pinsac.

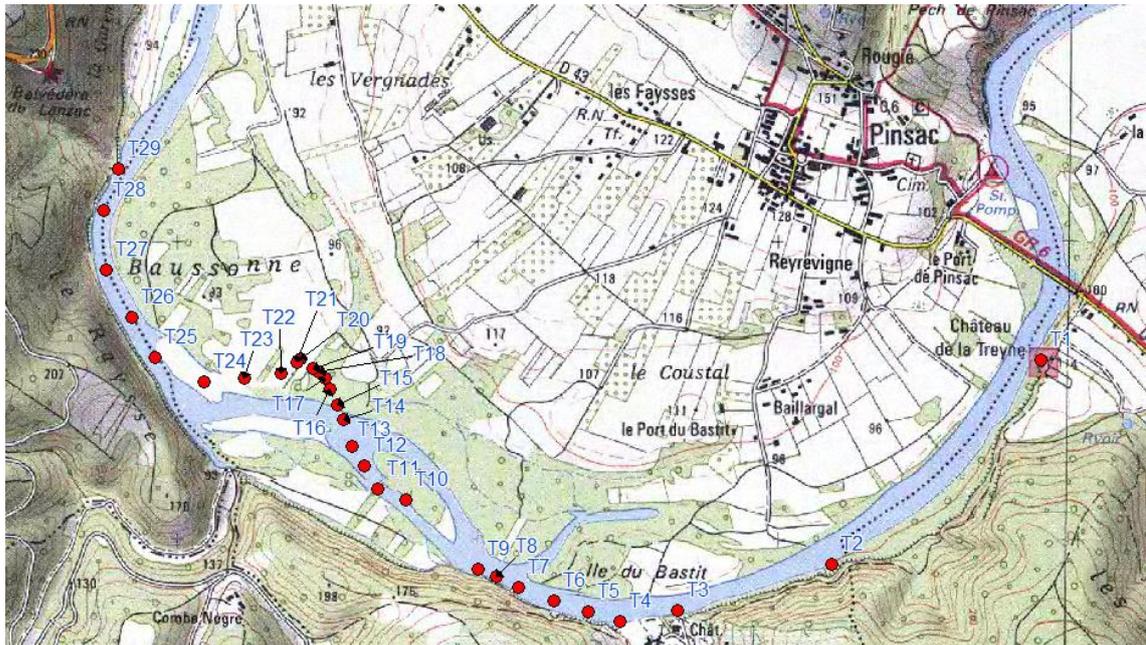


Figure 6-1 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)



Figure 6-2 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (site Geoportail)

Nota : Le fond de carte de la Figure 6-1 est une ancienne carte IGN de type SCAN 25 d'une date antérieure à la construction du viaduc de l'autoroute, ce qui permet de voir l'évolution du lit de la Dordogne, soumis à une importante érosion au niveau des piles du pont. En prenant la photo aérienne du site Géoportail, les points de mesures se retrouvent bien sur le lit de la Dordogne actuel.

La figure ci-dessous représente les points GPS des profils en travers mesurés sur le site de Montfort.

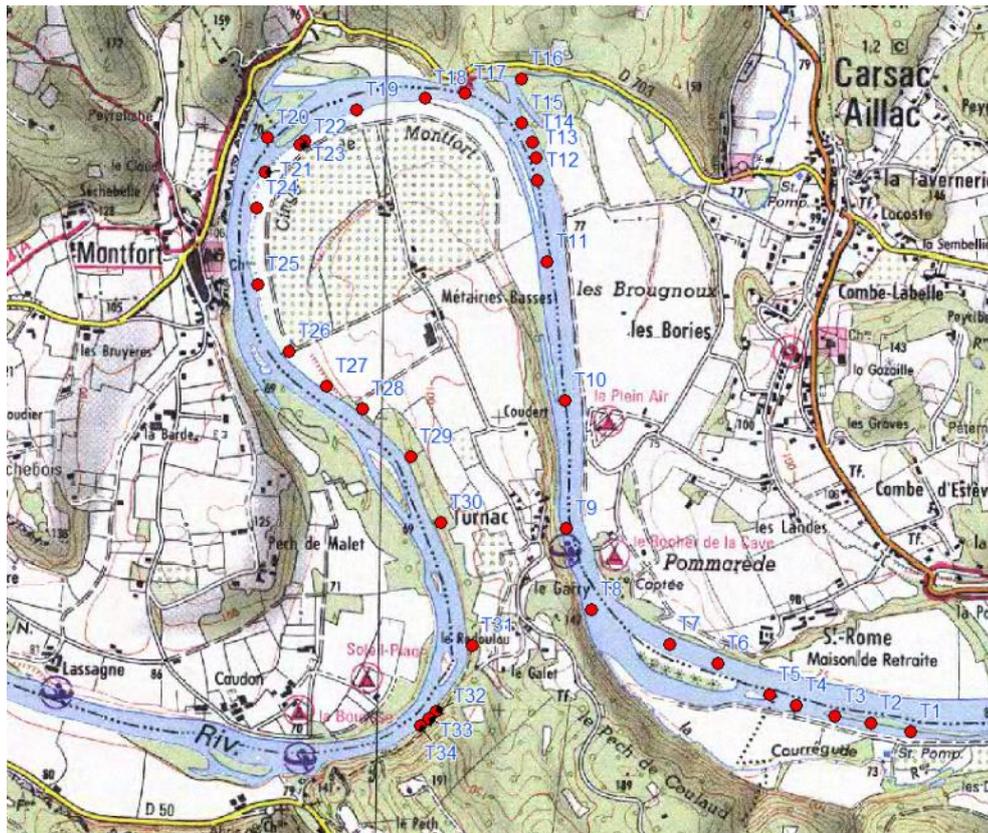


Figure 6-3 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)

Au niveau des premiers profils en travers, la carte IGN SCAN 25 représente une annexe hydraulique qui n'est plus active. Cette zone est maintenant boisée avec un atterrissement en bordure rive gauche. La photo aérienne du site Géoportail ci-dessous est présentée avec les positions des profils en travers par rapport au lit actuel de la Dordogne.

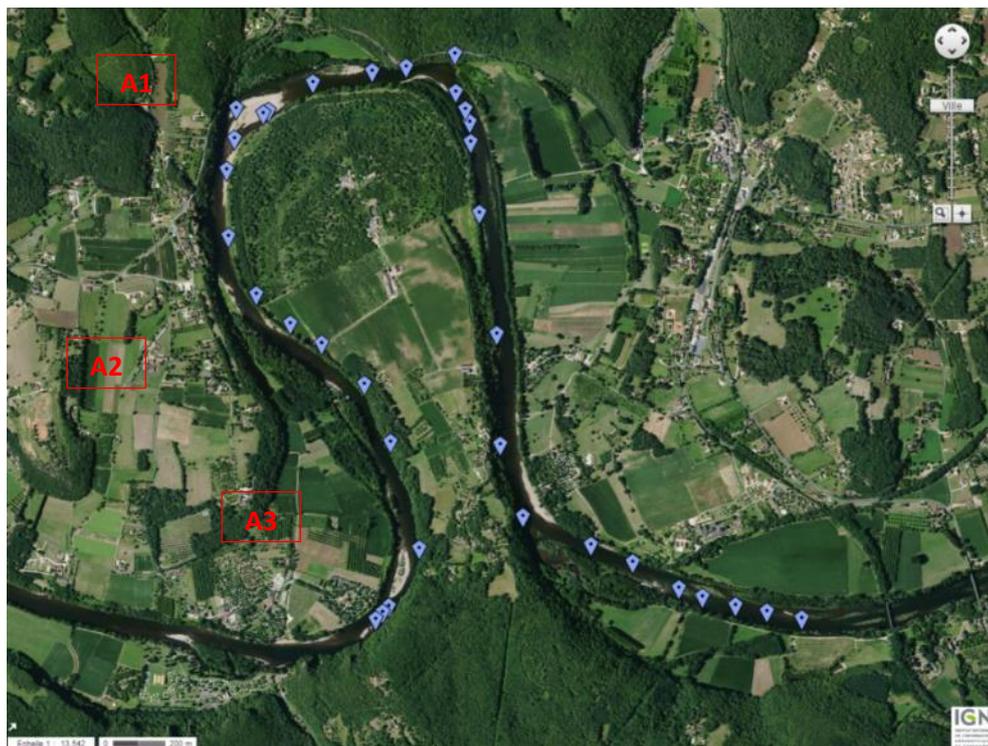


Figure 6-4 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (carte Géoportail)

Selon la méthode et avec les hypothèses présentées en Annexe 2 au § 11.1, les valeurs de diamètres maximum potentiellement mobilisables D_{max} pour chaque profil en travers sont les suivantes :

- de 8 à 40 mm pour le site de Pinsac ;
- de 10 à 36 mm pour le site de Montfort.

Ces valeurs montrent qu'au sein d'un même tronçon, les variations du D_{max} peuvent être fortes et que l'approche par modélisation hydraulique sur tout le secteur d'étude (présentée en §5.2) ne donne qu'une représentation à grande échelle des phénomènes. Elle est donc utile pour décrire une ambiance globale mais ne peut pas avoir de traduction opérationnelle très précise.

Une analyse plus fine et plus proche des différents faciès d'écoulement est donc nécessaire pour identifier les principales singularités dans le profil en long.

La comparaison des résultats modélisés à débits de plein bord (le double de ceux observés) obtenus pour les tronçons correspondant aux sites de mesures n'est pas cohérente car les valeurs obtenues par modélisation sont moyennées sur des tronçons de 10 km de linéaire de cours d'eau.

6.1.2 Diversité des écoulements dans un même profil

A échelle plus fine, une analyse plus précise conduit à nouveau à d'autres constats quant à la diversification des situations susceptibles d'engager une mobilisation de matériaux grossiers.

Hydraulique 1D : exemple du profil T1

L'exemple ci-après restitue les données du profil en travers T1 à Pinsac pour un débit de **260 m³/s**. Le débit de plein bord à cet endroit est estimé entre 600 et 650 m³/s.

A l'échelle du profil et pour ce débit, la **vitesse** moyenne mesurée est de **1,1 m/s**.

Le modèle hydraulique, lui, estime la vitesse moyenne à 1,05 m/s. Le **diamètre mobilisable** selon les hypothèses de calcul serait de **15 mm**.

Au débit de plein bord (600 à 650 m³/s) le modèle évalue la vitesse moyenne entre 1,4 et 1,5 m/s, correspondant à un diamètre mobilisable de 18 mm.

Ces résultats montrent que la situation observée le jour de la mesure à 260 m³/s, en termes de potentiel de transport de sédiments, est déjà très proche du potentiel de transport à débit de plein bord. Donc, ce processus s'observe déjà pour des débits inférieurs.

Granulométrie

Les deux photos ci-dessous sont prises à proximité de l'atterrissement des tronçons T16 à T20 en rive gauche ; elles montrent la diversité des substrats présents.

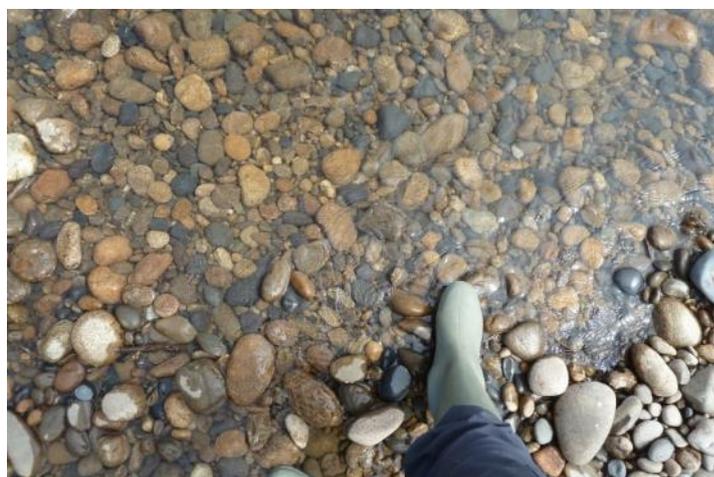


Figure 6-5 : Site de Pinsac - Atterrissement entre les profils T16 et T20

Hydraulique 3D :

Les profils Doppler permettent d'accéder à toute la diversité des écoulements sur le profil en travers. L'exemple ci-dessous montre que, sur cette section, l'écoulement est ralenti en rive gauche et est très homogène sur le reste de la section.

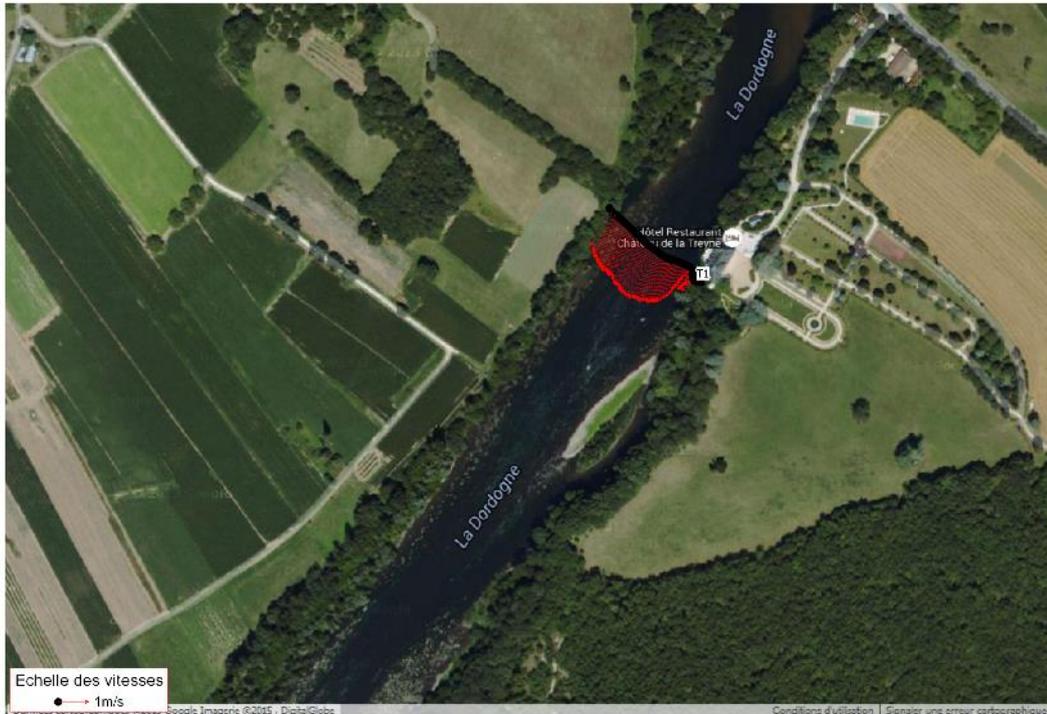


Figure 6-6 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur le profil en travers T1

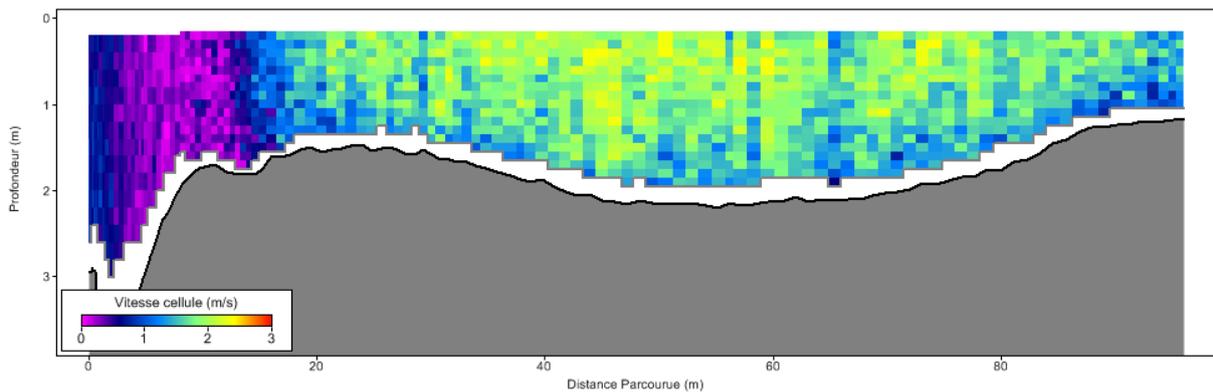


Figure 6-7 : Site de Pinsac - Profil en travers T1, bathymétrie et vitesses

Interprétation hydro-sédimentaire

Sous réserve des précautions méthodologiques précédentes, une interprétation de la diversité des situations ponctuelles (équivalent à la cellule des microhabitats) peut être proposée au travers de deux indicateurs : la vitesse de frottement et le diamètre maximal mobilisable.

Sur le profil T1, nous constatons une assez grande régularité du profil en travers avec un diamètre mobilisable globalement compris entre 0 et 18 mm. Le diamètre médian calculé par le modèle (15 mm) restitue assez bien sur ce type de profil la classe granulométrique caractéristique de la section.

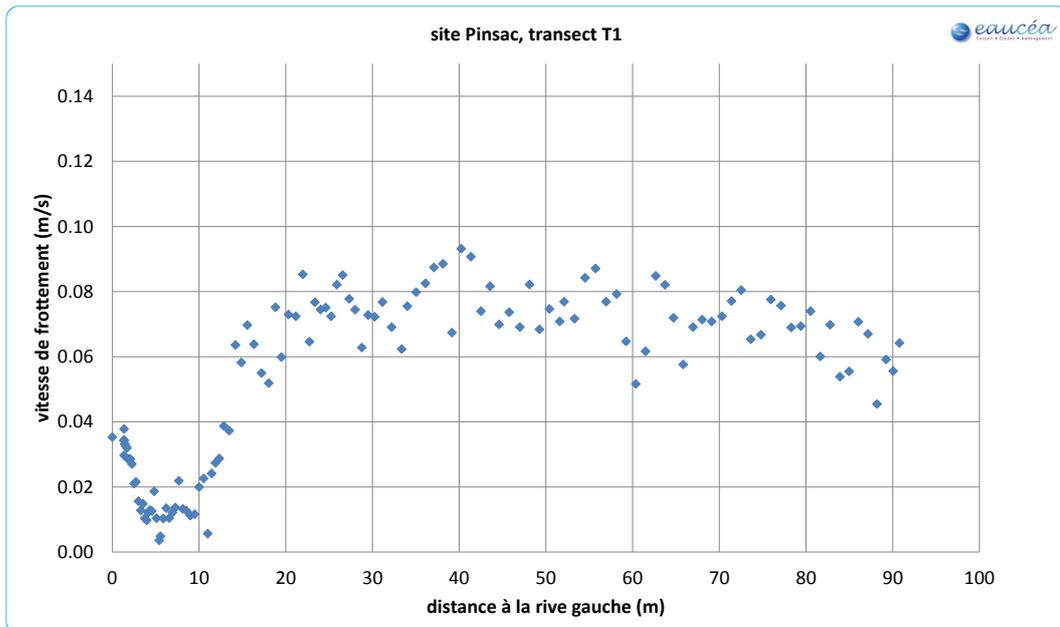


Figure 6-8 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T1

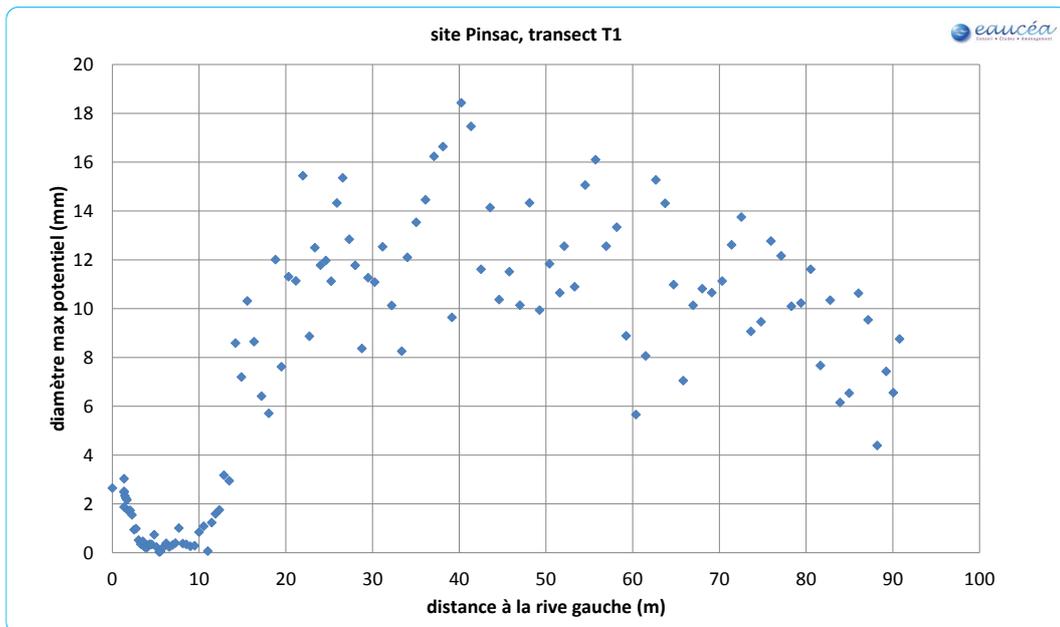


Figure 6-9 : Site de Pinsac - Répartition latérale des diamètres mobilisables sur profil T1

Sur d'autres profils la variabilité latérale est plus forte et peut révéler des zones d'érosion ponctuelles non prises en compte dans un modèle 1D. C'est par exemple le cas du profil situé immédiatement en amont du pont de l'autoroute avec une forte dynamique sédimentaire. La vitesse moyenne est de 1,2 m/s mais la vitesse maximale est de 2,2 m/s, signe d'une forte hétérogénéité :

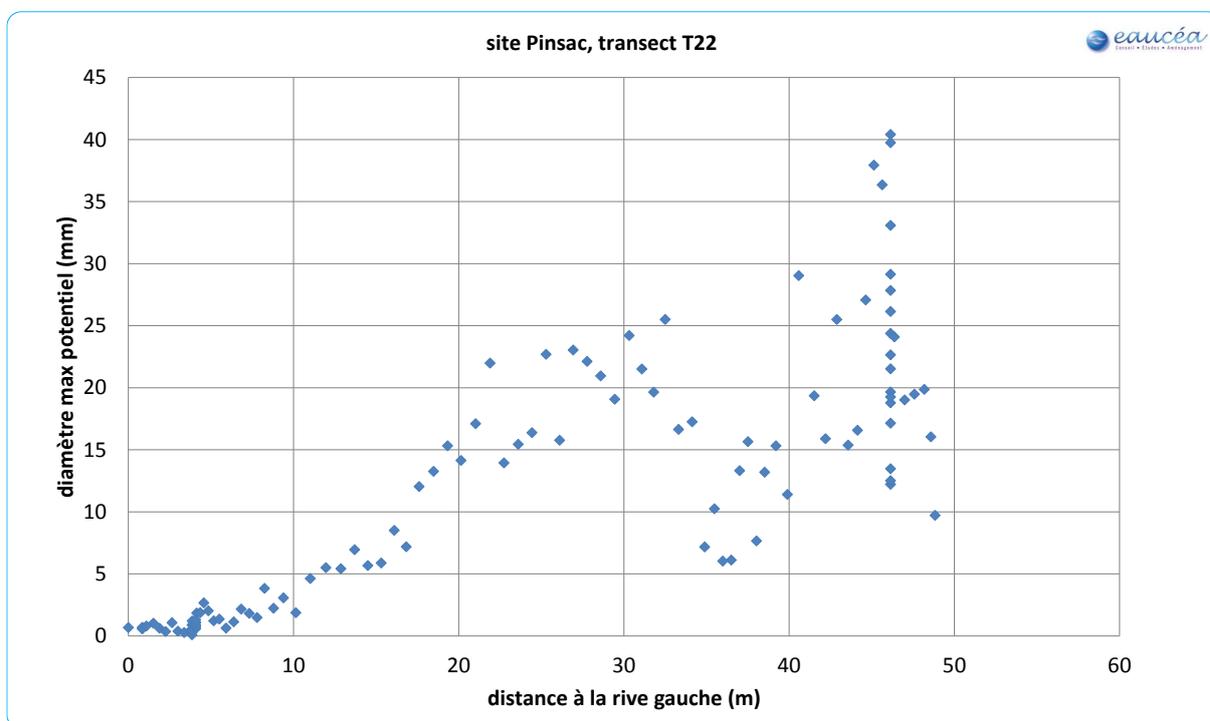


Figure 6-10 : Site de Pinsac - Répartition latérale des diamètres mobilisables sur profil T22

En rive droite, et très ponctuellement, des galets de 40 mm peuvent être mobilisés pour le débit de 260 m³/s. Il s'agit d'ailleurs d'un site bénéficiant de protections en enrochement.

Pour un débit de plein bord, la vitesse moyenne est augmentée de 40% environ. La traduction sur chacune des vitesses ponctuelles n'est pas accessible avec les moyens de modélisation mobilisés mais l'on peut supposer qu'elle augmentera partout y compris dans la zone d'accélération.

Sur les deux stations de contrôle terrain, Pinsac et Montfort, plusieurs centaines de vitesses moyennes par colonne d'eau ont été mesurées. Leur distribution est présentée dans les deux graphes suivants. La diversité des vitesses moyennes constitue donc un des termes importants à prendre en compte si l'on souhaite restituer la diversité des diamètres mobilisables, y compris sur des sous-parties de chaque section.

En conséquence, il est très important de ne pas réduire la puissance mobilisatrice du débit de plein bord à sa seule valeur moyenne par tronçon puisqu'une forte hétérogénéité existe autour des valeurs moyennes d'une section à l'autre au sein d'un même tronçon, et d'un point à un autre au sein d'une même section.

Les mesures réalisées permettent de préciser le contexte local de la dynamique sédimentaire sur les deux sites de Pinsac et Montfort. Cette approche a permis de définir une méthodologie accompagnant la recherche de sites offrant un potentiel de remobilisation de substrat via l'érosion des berges.

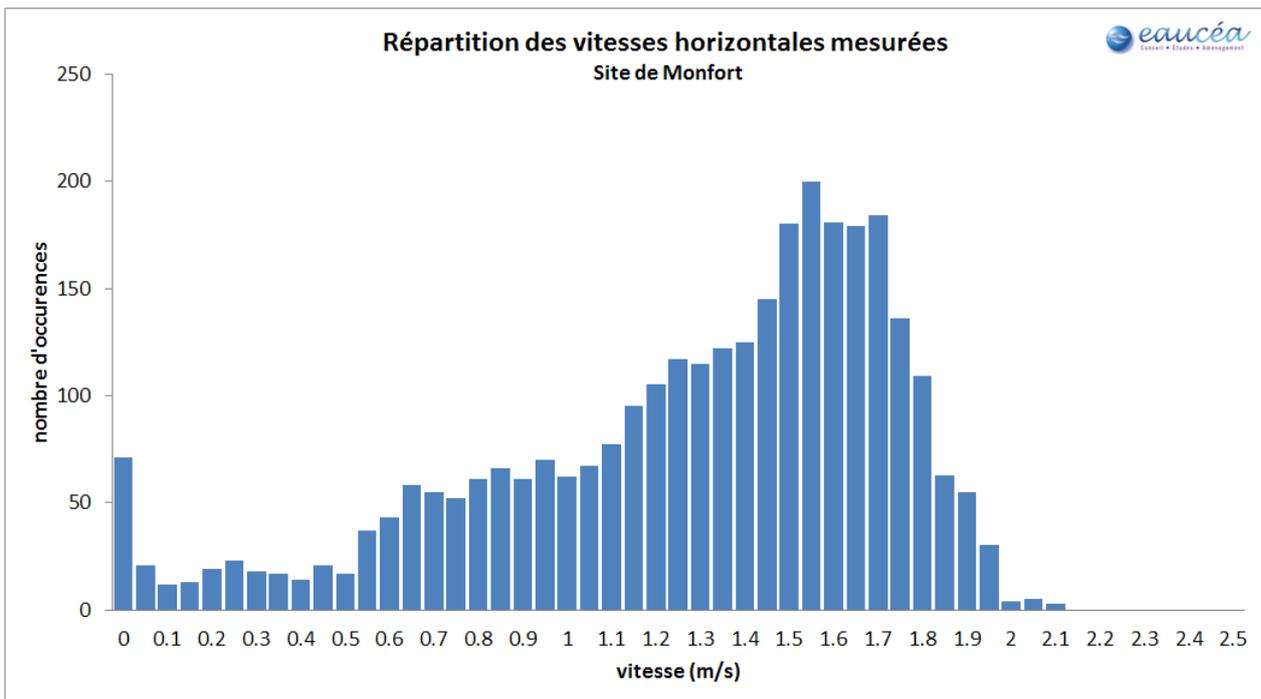
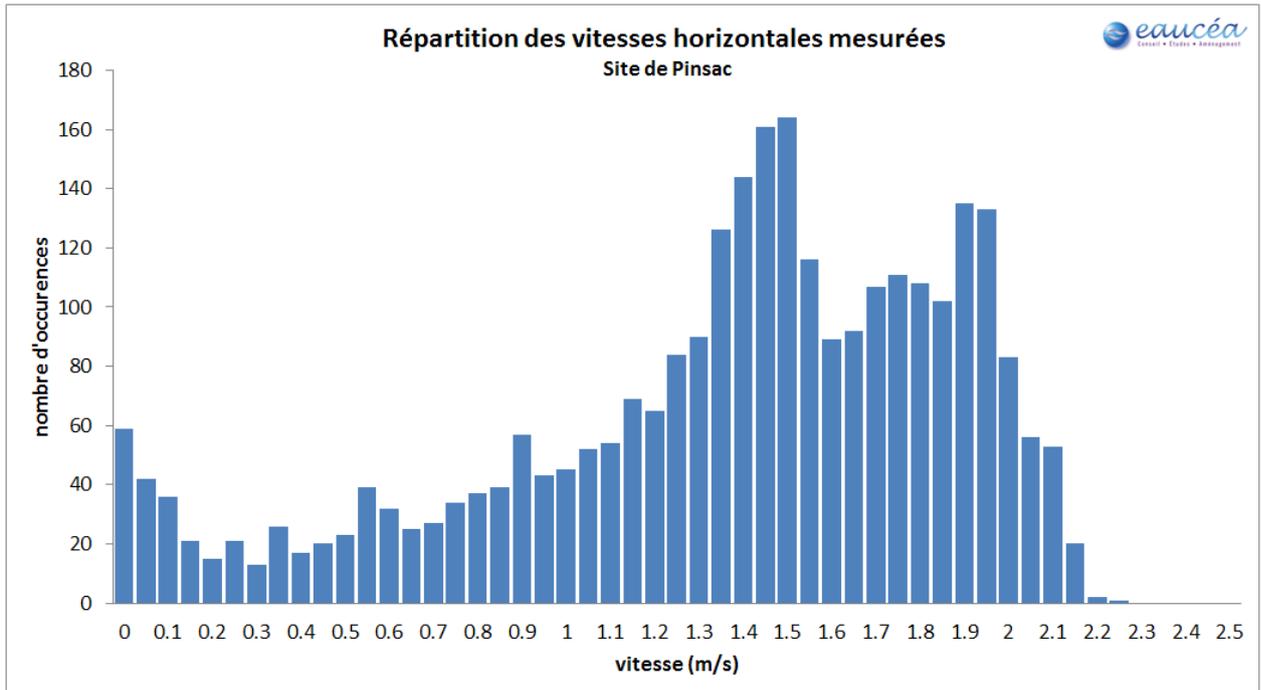


Figure 6-11 : Sites de Pinsac et Montfort - Distribution des vitesses horizontales mesurées par colonne d'eau échantillonnée

7 SYNTHÈSE ET PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENTS

La Dordogne des plaines, est un fleuve majeur riche de sa biodiversité et de ses paysages exceptionnels reconnus au niveau national, européen et aujourd'hui mondial. Il s'agit aussi d'un axe profondément marqué par l'histoire de son aménagement pour la navigation, la production de granulat et l'hydroélectricité. Cette dualité détermine un équilibre dynamique en reconstruction permanente.

Les formes fluviales qu'elles soient de grandes échelles géographiques comme les méandres de Montfort, plus locale comme les plages de Vitrac ou du niveau des microhabitats aquatiques sont toutes pilotées par des mécanismes hydromorphologiques qui se développent sur le temps long. C'est une première analyse de ces mécanismes que propose la présente étude.

L'étude propose tout d'abord un diagnostic séculaire des grandes formes fluviales. Il confirme que la combinaison des trois faits majeurs du dernier siècle, à savoir les extractions massives de granulat (une quinzaine de millions de mètres cubes au XX^{ème} siècle entre Argentat et Limeuil), le boisement des versants et l'aménagement hydroélectrique des hautes vallées s'est traduite par une évolution relativement lente du profil en plan du fleuve. Des évolutions majeures semblent aujourd'hui peu probables traduisant une certaine fixation du lit mineur. L'équilibre largeur profondeur est globalement cohérent avec les références fluviales disponibles dans la bibliographie même si l'incision du lit est très probable. Nous pouvons le considérer comme globalement constant à l'échelle des prochaines décennies.

L'analyse hydrologique nous dit aussi que les crues réputées les plus fréquentes ont été lourdement modifiées par la gestion des stocks hydroélectriques depuis la fin des années 50. Les effets sont différents selon la position sur le bassin mais l'impact sur les crues fréquentes de type quinquennal est d'autant plus évident que l'on est proche d'Argentat. Si les grandes crues sont connues pour leurs effets catastrophiques pour les populations riveraines, les crues plus fréquentes jouent un rôle réputé déterminant pour le fonctionnement du lit des rivières garantes d'une certaine forme d'auto-entretien du chenal principal. Pour mieux décrire ce mécanisme, une étude hydraulique des débits de plein bord a été effectuée par modélisation en exploitant des données bathymétriques mobilisées par Epidor. Elle permet de qualifier sur tout le profil en long, l'ordre de grandeur de ce débit débordant. Une analyse fréquentielle permet de vérifier avec quelle répétition s'observe ces crues qui dissipent le maximum d'énergie dans le lit mineur de la rivière. La fréquence d'impact de la gestion hydroélectrique sur ces crues présente un profil longitudinal différent de celui évoqué précédemment. Les effets attendus sont liés à l'impact sur la végétation (mal décrit par l'hydraulique), contrariant la fermeture des milieux et facilitant le rajeunissement ou la pérennité des bras morts.

La troisième échelle d'analyse est celle du transport solide en grand. L'énergie dissipée permet de mobiliser des granulats le plus souvent par charriage. Plus cette énergie est importante plus le diamètre de ces granulats est important. La modélisation hydraulique nous donne accès sur le plan théorique à ces tailles critiques de granulats. Le diamètre caractéristique évolue de 50 mm au pied d'Argentat à environ 25 mm vers Limeuil. Cela signifie qu'à chaque crue en limite de débordement les conditions garantissant une mobilité du fond du lit sont réunies du moins pour les classes de tailles inférieures à ces seuils. Cet effet s'observe effectivement sur la Dordogne qui présente des fonds majoritairement ouverts et favorables aux échanges hydrauliques hyporhéique et donc à la vie benthique.

La quatrième échelle explore des mécanismes beaucoup plus locaux. Des mesures in situ en hautes eaux ont pu décrire toute la diversité des conditions d'écoulements sur un même profil en travers. Ces singularités constituées par des accélérations, tourbillons ou ralentissements expliquent la variabilité des faciès sédimentaires avec des zones de galet, de sable ou de limon. Cette diversité est aussi une des conditions majeures de la biodiversité de la Dordogne.

En conséquence, les principaux facteurs de risque de désordre hydromorphologique semblent être un affaiblissement progressif et constant du matelas alluvial de la Dordogne. Les mécanismes mobilisant les matériaux du fond du lit sont encore actifs en raison de la capacité de charriage hydraulique et aussi de l'érosion induite par la cicatrisation des anciennes fosses d'extraction alluvionnaires. Or les mécanismes de renouvellement spontané du stock alluvionnaire sont aujourd'hui très affaiblis par la gestion des berges, le ralentissement de l'érosion des versants boisés et le blocage des sédiments dans les grandes retenues. Les conséquences de cette dynamique sont la réduction inexorable des faciès favorables à l'écosystème benthique et aux frayères de nombreuses espèces.

A partir de ce diagnostic multi-scalaire, les orientations de gestion suivantes peuvent être proposées :

D'ordre scientifique

Une analyse des flux sédimentaires est nécessaire pour évaluer le taux d'érosion actuel du fond du lit. Un suivi sur le piégeage dans les fosses d'extractions ou de comblement de zone de ralentissement contribuerait très certainement à renseigner les ordres de grandeurs. Sur cette base, l'ampleur des compensations éventuelles à mobiliser (en millier de m³/an) pourra être évaluée.

Une expertise longitudinale de la dynamique des bancs alluviaux et de la granulométrie du lit serait aussi utile pour mieux décrire les fractions mobiles, présentes ou absentes dans les alluvions de surface.

D'ordre technique

Le renouvellement à grande échelle des fractions mobiles ne peut aujourd'hui être trouvé que dans une remobilisation des fractions grossières depuis les berges de la Dordogne. Le transport de matériaux exogènes ne peut être clairement que local sachant qu'il pose des questions liées à la source de ces matériaux, à leur coût de transport et à leur mise en œuvre.

L'approche proposée consiste donc en une démarche expérimentale visant à faciliter les mécanismes d'érosion semi contrôlée. Il s'agit tout d'abord d'identifier des linéaires de berge présentant des caractéristiques sédimentaires utiles et un contexte hydraulique favorable à leur érosion. Les surfaces seraient exposées à l'érosion par une gestion spécifique de la végétation et un suivi sur des situations de débits adaptés. Plus ces sites seront proches d'Argentat, plus le linéaire bénéficiaire sera important. Il s'agit aussi d'un secteur à fort enjeu de frayère à salmonidés et lamproie. La fréquence des événements de hautes eaux et les débits sollicités seront recherchés de façon expérimentale au travers du suivi des sites mais resteront compris dans la gamme des débits de pointes turbinable sur la chaîne Dordogne.

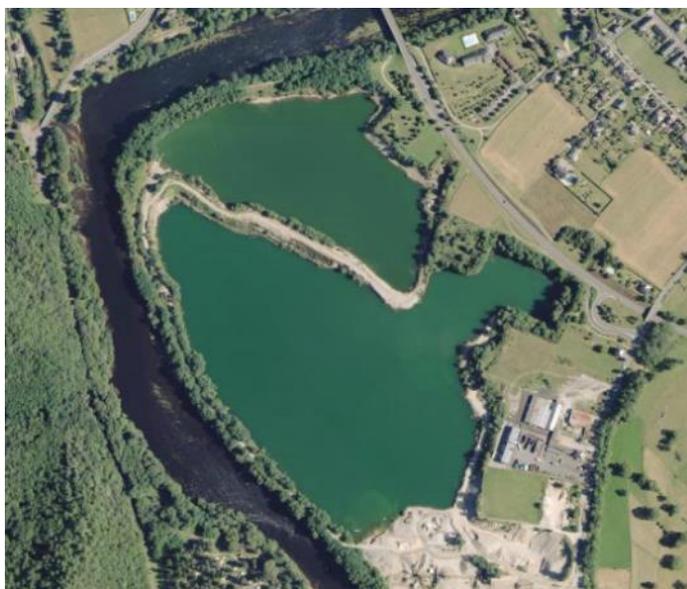


Figure 7-1 : Les gravières d'Argentat (environ 22 ha sur 2m équivalent à un matelas de 3 cm d'alluvions sur 150 km de rivière)

D'ordre social

Le bilan sédimentaire joue un rôle important dans le fonctionnement de nombreuses infrastructures de la vallée (pont, ouvrage de protection) mais aussi dans l'entretien de sites à haute valeur touristique (plage, accessibilité à l'eau). L'érosion est cependant un mécanisme consommateur de foncier et potentiellement destructeur d'infrastructure. La régulation de ces mécanismes doit aujourd'hui être raisonnée à la bonne échelle géographique. Il est donc nécessaire de fixer un cadre de concertation pour :

- Expliquer les motivations du projet ;
- Partager la notion d'enjeu environnementaux et civils ;
- Rassurer quant aux effets sur les débordements ;
- Organiser les compensations économiques ou foncières ;
- Mobiliser les outils réglementaires.

Ce dispositif peut aboutir à la définition d'un espace de mobilité et d'une stratégie de gestion des berges adaptés et partagés. Le SAGE constitue une opportunité pour planifier cette démarche.

8 CONCLUSIONS DE L'ETUDE ET PERSPECTIVES

Cette étude est une première approche de la compréhension de la dynamique fluviale de la Dordogne. La méthode employée a été une analyse hydraulique de la Dordogne sur un secteur de 170 km de long, couplée à deux mesures situées sur deux sites à enjeux.

L'hydrologie de la rivière en interaction avec le substrat du lit majeur est l'élément structurant de la dynamique sédimentaire et de la morphologie du lit de la Dordogne. L'impact sur les habitats aquatiques et la biologie est très important.

L'état de la dynamique fluviale de la Dordogne a été analysé entre Argentat et Limeuil :

- Le lit est incisé suite à l'exploitation de ses granulats jusqu'en 1980.
- L'hydrologie est fortement modifiée par la présence d'aménagements hydroélectriques en amont d'Argentat dont la fréquence et l'amplitude des crues ainsi que leur dynamique (augmentation de la rapidité des décrues).
- Sur le secteur d'étude l'analyse diachronique de la bande active du lit a mis en évidence la dynamique de stabilisation des bancs de sédiments, en particulier leur végétalisation.
- L'état d'équilibre théorique de la dynamique fluviale de la Dordogne est proche de celle de cours d'eau similaires naturels (à lit graveleux). La largeur du lit à débit de plein bord semble cependant légèrement plus grande que la moyenne observée.

La capacité morphogène de la rivière a ensuite été analysée :

- Le débit morphogène a été identifié au débit de plein bord, cette approche étant classique dans les études hydromorphologiques (Malavoi & Bravard, Elements d'hydromorphologie fluviale, 2010).
- Les caractéristiques hydrologiques des débits de plein bord ont été analysées : période de retour, durée, en amont (Argentat) et en aval (Cénac) avant et après aménagements hydroélectriques.
- Il a été montré que la capacité morphogène de la Dordogne à débit de plein bord permet le charriage potentiel du substrat pour des diamètres maximum de 30 à 50 mm. Localement, ce processus de transport a même été observé pour des débits moindres. Ces valeurs de diamètre correspondent à des sédiments essentiels pour le maintien des habitats aquatiques de la Dordogne.
- Des mesures bathymétriques et de vitesses d'écoulement ont été réalisées sur deux sites au niveau de Pinsac en amont et Montfort en aval à un niveau de débit de l'ordre de 1,5 fois le module de la Dordogne à Souillac (2,5 fois le module à Argentat). Ces mesures ont permis de décrire la diversité des écoulements à une échelle plus petite. Les diamètres de substrat potentiellement mobilisable ont aussi été estimés et montrent une variabilité conséquente des valeurs trouvées autour de la moyenne.

La synthèse de ces connaissances a permis de proposer des pistes de suivi de l'évolution du substrat de la Dordogne et de gestion de son renouvellement :

- Le volume de substrat en mouvement doit être évalué, par une approche locale en suivant le comblement des anciennes fosses d'extraction et globalement par l'analyse diachronique des photos aériennes régulièrement mises à jour.
- De pair avec les stratégies de gestion mises en place pour le renouvellement du stock de sédiments, le contrôle de l'hydrologie provenant de l'amont d'Argentat doit accompagner ce processus.

9 BIBLIOGRAPHIE

- US army corps of engineers. (s.d.). Récupéré sur HEC-RAS: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- Biotec. (2011). *schéma directeur de gestion du lit mineur (et ses marges) de la Dordogne entre Girac et Mauzac. Note de synthèse*. EPIDOR.
- Chapuis, M. (2012). *Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance*. CEREGE, Université d'Aix-Marseille.
- Chen, C.-L. (1989). Power law of flow resistance in open channels - Manning's formula revisited. *Proceedings of the International Conference on Channel Flow and Catchment Runoff: Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula*, (pp. 818-848). Charlottesville.
- Degoutte, G. (2012). *Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale*. Consulté le 2015, sur <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/COURSDHYDRAULIQUEDYN/>
- DREAL Limousin. (2014). *Outil d'aide à la compréhension des enjeux environnementaux de la vallée de la Dordogne et de la Maronne*. DREAL.
- EPIDOR. (2004). *Etude bathymétrique de la Dordogne et de la basse Isle. Données 1998. Ligne d'eau d'étiage 2001*.
- EPIDOR. (2012). *Schéma Directeur de gestion du lit mineur (et ses marges) de la Dordogne entre Girac et le barrage de Mauzac*.
- Epteau (Malavoi, J.-R.). (1998). *Guide technique N°2. Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau*. SDAGE Rhône Méditerranée-Corse.
- Fujita, K., Yamamoto, K., & Akabori, Y. (1998). *Evolution mechanisms of the longitudinal bed profiles of major alluvial rivers in Japan and their implications for profile change prediction*. Transactions, Japan Society of Civil Engineering.
- Kellerhals, R., Neill, C., & Bray, D. (1972). *Hydraulic and geomorphic characteristics of rivers in Alberta, River Engineering and Surface Hydrology Report*. Research Council of Alberta, Canada.
- Macé, S. (2002). *La dynamique fluviale de la Dordogne au XXème siècle : Eléments d'explication de la formation et de l'évolution des bras morts de la Dordogne périgourdine*.
- Malavoi, J.-R., & Bravard, J.-P. (2010). *Elements d'hydromorphologie fluviale*. ONEMA.
- Malavoi, J.-R., Garnier, C., Landon, N., Recking, A., & Baran, P. (2011). *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. ONEMA.
- Parker, G. (2004). *1D sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents*. Récupéré sur <http://hydrolab.illinois.edu/people/parkerg/default.asp>
- SonTek. (2014). *RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 3.80*. SonTek.

10 ANNEXE 1 : MODELE HYDRAULIQUE DE LA DORDOGNE

10.1 Mise en place du domaine d'étude

Les profils en travers de la Dordogne nécessaires à la réalisation du domaine de calcul pour HEC-RAS sont issus de l'étude bathymétrique de la Dordogne (EPIDOR, 2004) réalisée à partir de la campagne de relevés effectués en 1998.

Chaque profil en travers est constitué de points de mesures géo-référencés à l'aide d'un GPS et dont la cote bathymétrique est référencée verticalement en mètres IGN 69.

Les profils en travers retenus sont ceux situés partant d'Argentat en amont jusqu'au barrage de Mauzac en aval de Limeuil, ce qui représente un linéaire de cours d'eau d'environ 172 km.

Dans la notice de l'étude bathymétrique, les profils sont indiqués comme décrits à partir de la rive gauche. Cette hypothèse n'étant pas vérifiée pour tous les profils, il a été nécessaire de générer un jeu de données cohérentes pour l'export de la bathymétrie vers HEC-RAS. De plus certains points de berge non géoréférencés ont dû être reconstitués manuellement.

La bathymétrie réalisée en 1998 est limitée au lit mouillé lors de la mesure. Afin de décrire entièrement le lit mineur de la Dordogne jusqu'aux points de plein bord, les données du LIDAR 2010 provenant du produit RGE ALTI de l'IGN ont été assemblées à la bathymétrie. Des profils en travers étendus ont ainsi été construits sur tout le domaine de calcul. La figure ci-dessous représente les positions des points des profils en travers de la bathymétrie 1998 (en rouge) ainsi que ceux issus du LIDAR calculés systématiquement à partir des limites de la bathymétrie.

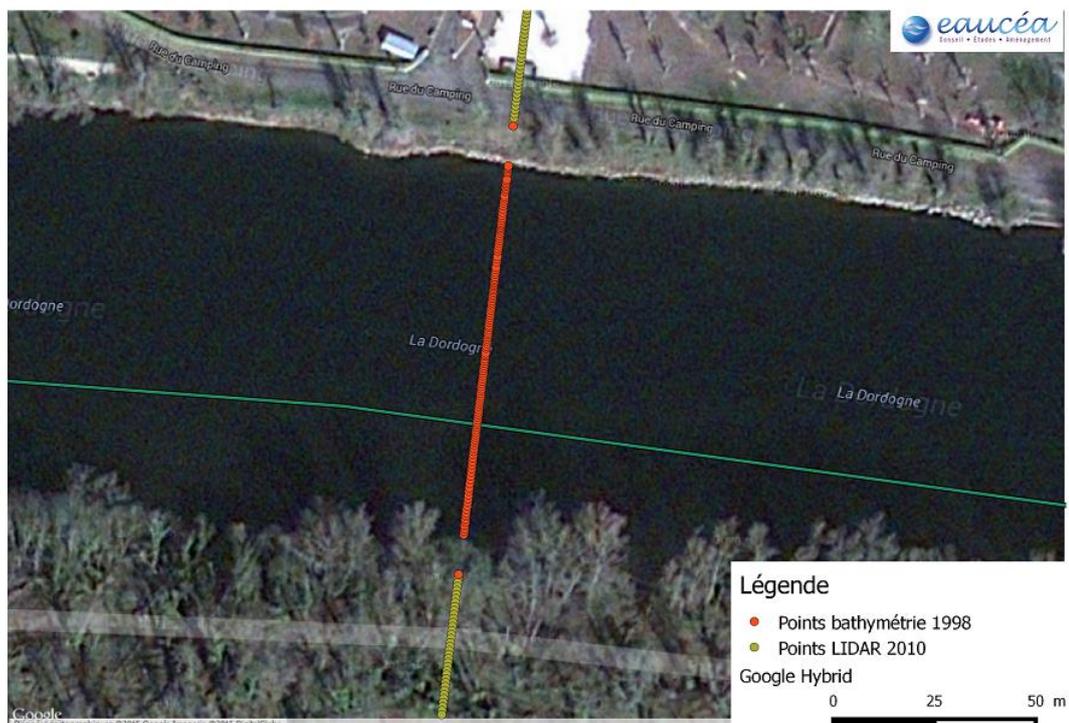


Figure 10-1 : Assemblage bathymétrie 1998 & LIDAR 2010

Le procédé de construction de la bathymétrie pour le modèle HEC-RAS est le suivant :

1. Sélection des profils en travers inclus dans le domaine d'étude. Les profils retenus vont d'Argental jusqu'au plan d'eau amont de Mauzac situé environ 13 km à l'aval de Limeuil ;
2. Repérage des points en rive gauche et rive droite afin de détecter les profils en travers décrits par erreur de la droite vers la gauche ;
3. Validation des points de berge, certains n'ayant aucun géo-référencement ;
4. Ecriture de la table des données à importer dans HEC-RAS ;
5. Dans HEC-RAS, import des données sélectionnées précédemment ;
6. Dans HEC-RAS, validation de chaque profil en travers constitué de l'assemblage de la bathymétrie 1998 et du LIDAR 2010. Les données bathymétriques en amont de la confluence avec la Cère ne sont pas cohérentes avec celles du LIDAR. Le décalage entre ces données n'est pas connu, le domaine de calcul est donc réduit dans HEC-RAS et sa limite amont commence donc après la confluence avec la Cère.
7. Dans HEC-RAS, lissage de la bathymétrie de chaque profil afin d'éviter les instabilités numériques lors des simulations.
8. Dans HEC-RAS, ajout de digues sur certains profils en travers de telle sorte à exclure du calcul les surface mouillées en dehors du lit mineur (externes au bourrelet de berges).
9. Dans HEC-RAS, interpolation des profils en travers tous les 80 m : passage de 411 à 1853 profils en travers.

La figure ci-dessous représente une situation de profils en travers dont les points de berge en rive gauche sont placés en rive droite de manière erronée (étape 2 du traitement de la bathymétrie nécessaire).

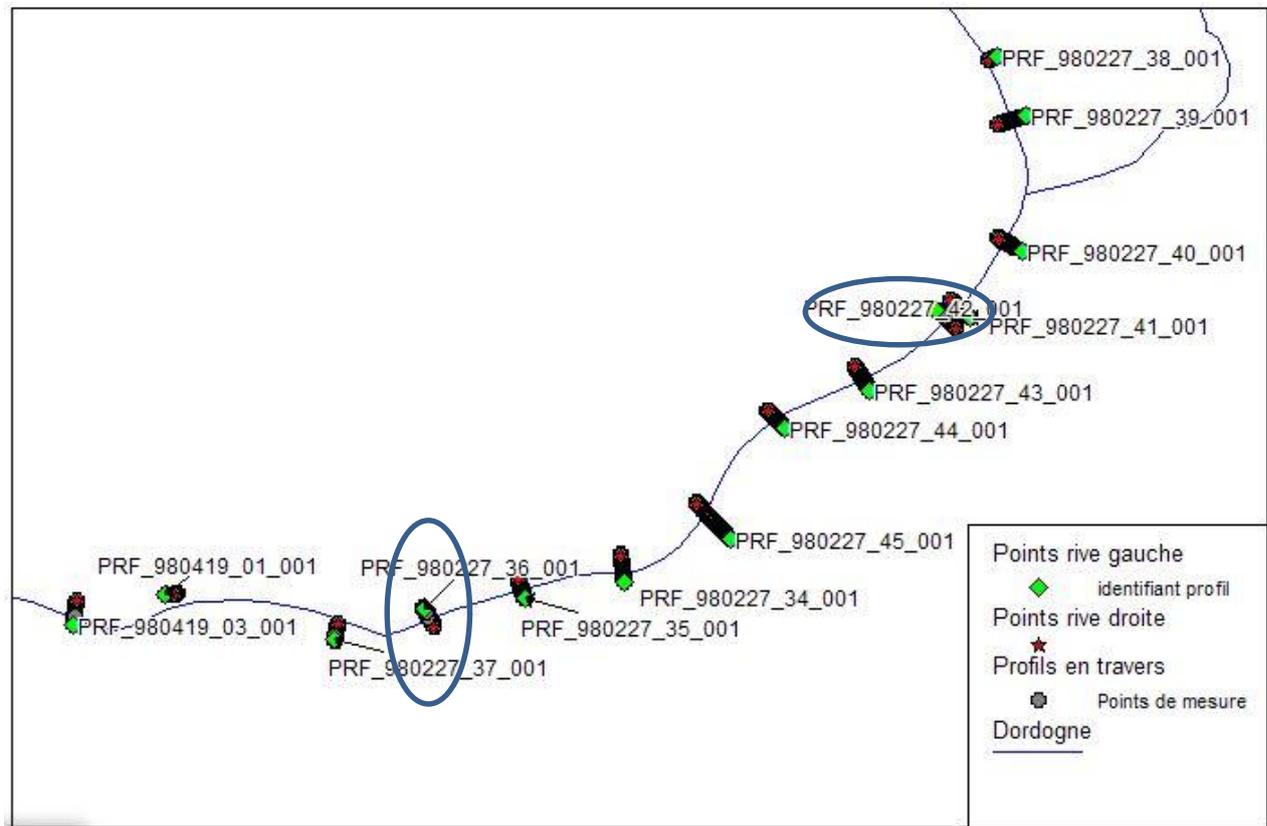


Figure 10-2 : Exemple de points de berge rive gauche mal identifiés

La figure ci-dessous illustre l'effet du lissage des données de bathymétrie pour chaque profil en travers (étape 6 du traitement de la bathymétrie).

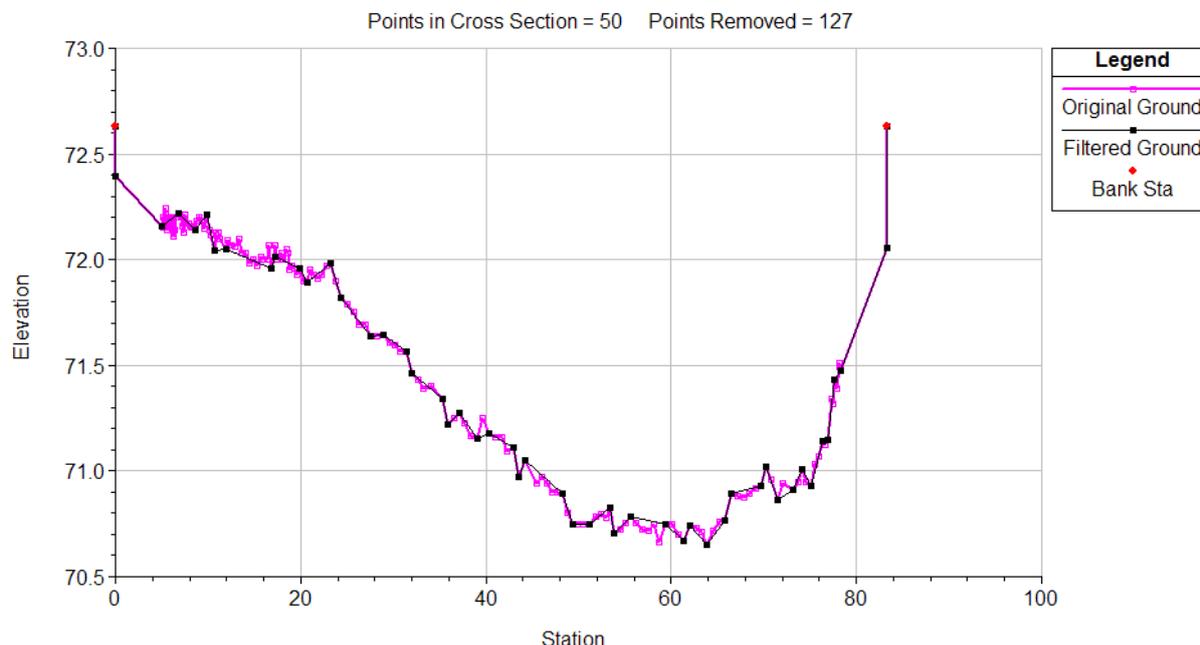


Figure 10-3 : Exemple de lissage de la bathymétrie sur un profil en travers
(La courbe rose indique la bathymétrie mesurée et la courbe noire celle filtrée)

10.2 Calage du modèle

Les paramètres du modèle dans HEC-RAS sont les valeurs du coefficient de Strickler, noté K_s par la suite. Afin de choisir des valeurs cohérentes de K_s , des simulations de situations de référence sont nécessaires.

Les situations de référence connues sont les suivantes :

1. Débit de plein bord de 550 m³/s à Argentat ;
2. Cotes des lignes d'eau mesurées lors de la campagne de relevés 1998 et débits des stations hydrométriques correspondant aux moments des prises de mesures.

Le choix des bonnes valeurs de K_s se fait par une séparation des données de références en un ensemble servant à assigner les valeurs de K_s et l'autre à vérifier le bon comportement du modèle pour les valeurs choisies.

Hypothèse importante : dans ce modèle HEC-RAS, une valeur de K_s uniforme sera choisie pour tout le domaine de calcul. Cette hypothèse est simplificatrice mais cohérente avec une analyse hydraulique sur 130 km de cours d'eau. Localement la simulation hydraulique pourra être imprécise mais les résultats seront exploités à une échelle de tronçons homogènes très grands par rapports aux erreurs locales.

Dans toutes les simulations de cette étude, la condition aux limites aval imposée au modèle est établie à 43,07 m NGF, cote de la retenue normale du barrage de Mauzac.

La Dordogne étant soumise à des éclusées et variations de débits fréquentes à l'échelle de temps horaire, il est nécessaire de caler le modèle en recherchant les débits mesurés aux stations hydrométriques aux heures les plus proches possibles du passage du bateau de mesures. Les résultats présentés ci-dessous correspondent aux situations suivantes :

- 4 km autour de la station de Cénac le 01/04/1998 entre 11h30 et 12h30, débit d'environ 160 m³/s
- 4 km autour de la station de Siorac le 07/04/1998 entre 12h00 et 14h00, débit d'environ 180 m³/s
- 3 km autour de la station de Souillac le 17/04/1998 entre 16h30 et 19h00, débit d'environ 620 m³/s
- 5 km autour de la station de Carennac (rive droite) le 19/04/1998 entre 10h40 et 13h40, débit d'environ 250 m³/s

Les figures suivantes contiennent pour les stations hydrométriques de la Dordogne positionnées dans le domaine d'étude les lignes d'eau mesurées lors de la bathymétrie de 1998 et les lignes d'eau simulées pour trois valeurs de K_s. Le débit de simulation issu de la banque hydro est indiqué dans le titre de chaque graphe. En abscisse, les numéros de profils dans HEC-RAS correspondent à la distance entre le profil et l'aval du domaine de calcul (exprimée en m, pouvant aller de 0 pour l'aval à 133000 = 133 km pour l'amont).

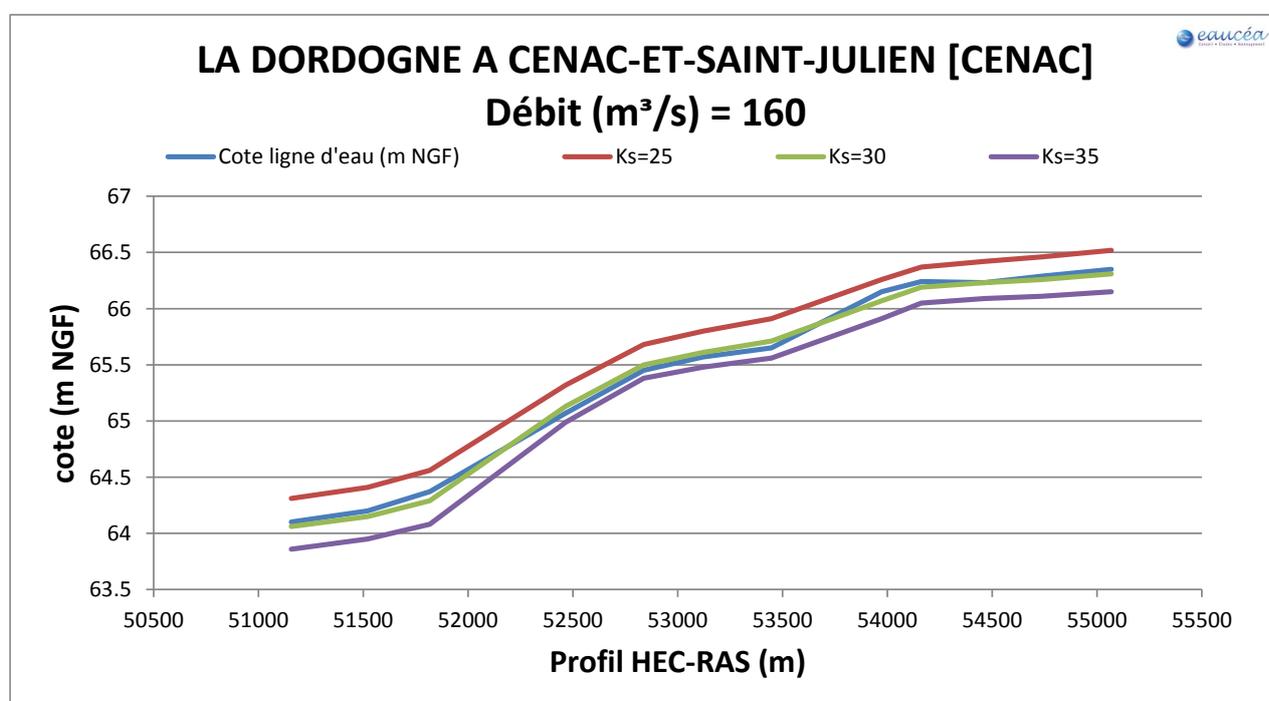


Figure 10-4 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Cénac et St Julien

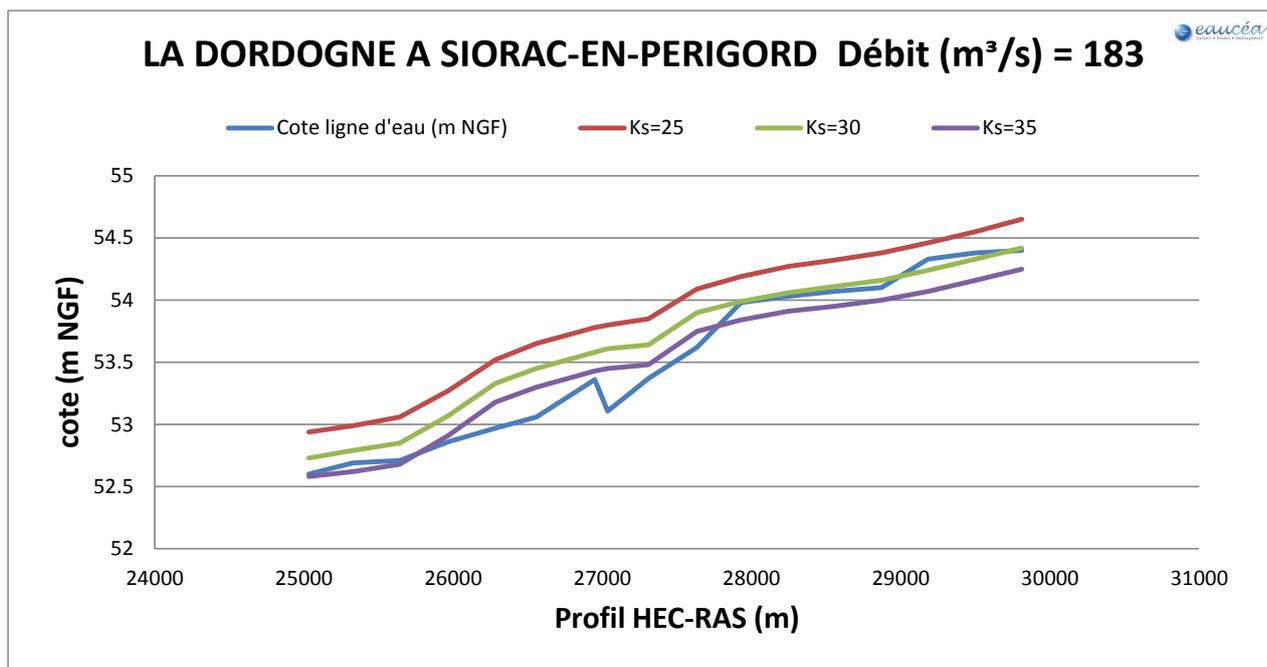


Figure 10-5 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Siorac

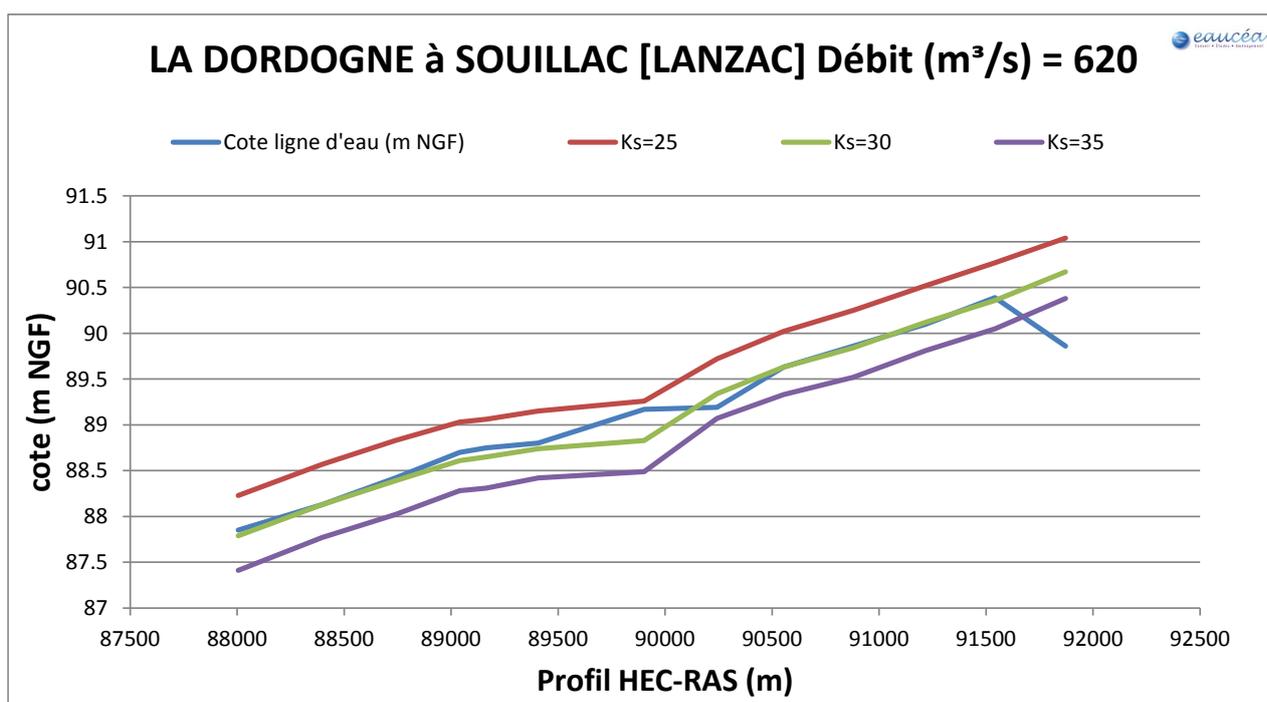


Figure 10-6 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Souillac

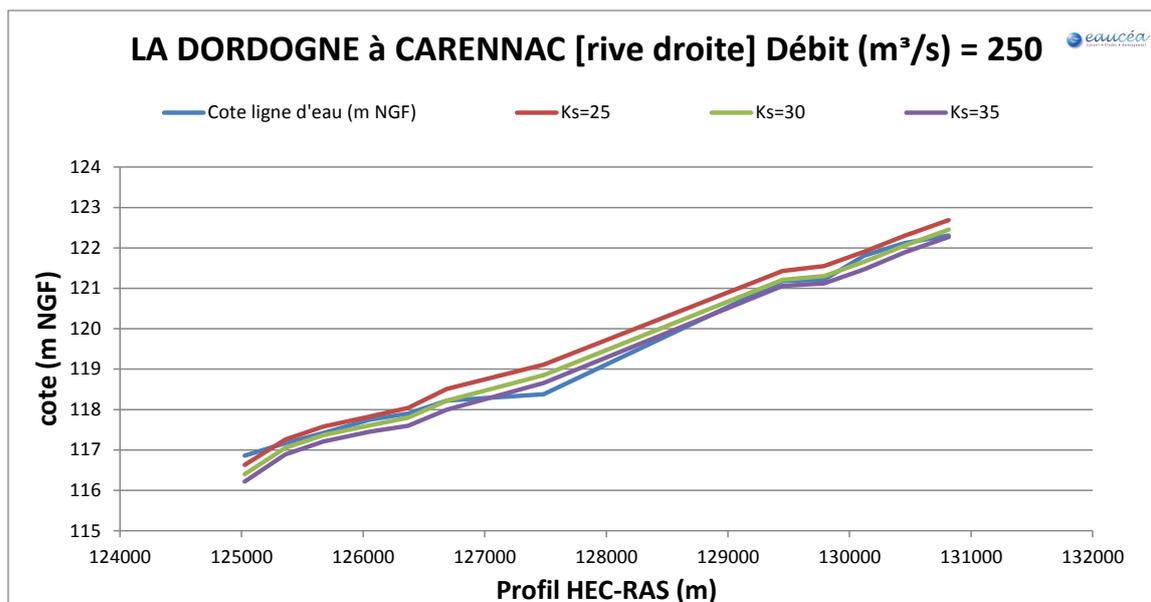


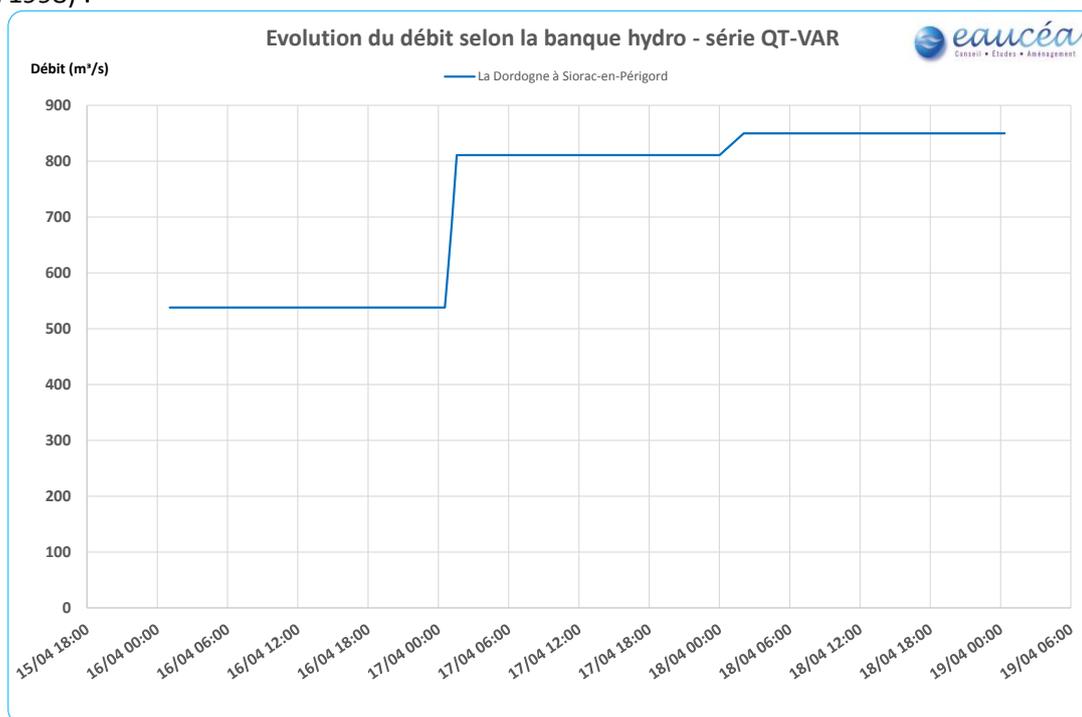
Figure 10-7 : Ligne d'eau mesurée et simulée autour de la Dordogne à Carrenac

Dans l'ensemble, c'est la valeur $K_s=30$ qui permet de simuler une ligne d'eau la plus cohérente avec les lignes d'eau mesurées en 1998 pour des valeurs de débits correspondantes.

Les anomalies repérées entre les mesures et les simulations pour $K_s=30$ sont décrites brièvement ci-après.

Siorac-en-Périgord :

La partie amont du profil 28000 correspond à une bonne cohérence entre simulation et mesure. En aval la ligne d'eau mesurée devient non cohérente avec une pente négative, correspondant à une probable variation de débit importante lors de la mesure. Cependant les données disponibles sur la banque Hydro ne sont pas assez précises (et peut-être non valides ?) comme cela est visible ci-dessous le jour de la mesure (17/04/1998) :



Source Banque Hydro

Figure 10-8 : Evolution du débit mesuré à la station de Siorac-en-Périgord

Souillac :

Le premier point de mesure en amont correspond à une pente négative non cohérente. Ensuite la cohérence entre simulation et mesure est bonne sauf au niveau du profil 89902. Ce profil correspond à une zone comportant une annexe hydraulique et donc moins bien simulée avec HEC-RAS (cf. figure ci-dessous).



Figure 10-9 : Limite du calage d'HEC-RAS - Profil RS89902 au niveau d'une annexe hydraulique

Carennac :

La simulation est partiellement cohérente avec la mesure sur cette section analysée pour le calage, en particulier la zone centrale. Cette difficulté peut être imputée aux écoulements au niveau de l'île de la Prade dont seul le bras principal est simulé et relevé en bathymétrie.

10.3 Conclusion

Le modèle hydraulique réalisé avec HEC-RAS donne des résultats cohérents à partir de la bathymétrie réalisée en 1998 combinée avec le LIDAR 2010.

Le domaine d'étude décrit le lit mineur de la Dordogne entre la confluence avec la Bave et l'amont du barrage de Mauzac, soit 130 km de cours d'eau environ. La partie amont correspondant aux 40 premiers km n'a pu être modélisée car les données bathymétriques et LIDAR ne sont pas cohérentes et le LIDAR ne remonte pas la Dordogne au-delà de Beaulieu.

Dans cette étude, ce modèle est utilisé pour combiner les résultats de simulations avec les données de substrat cartographiées en 2011 (EPIDOR) : les simulations du modèle hydraulique permettent d'évaluer les contraintes de frottement pour des gammes de débits allant jusqu'aux débits de plein bord.

11 ANNEXE 2 : MESURES DOPPLER

Contexte hydrologique

L'évolution du débit de la Dordogne à Souillac est représentée sur la figure ci-dessous le jour des mesures.

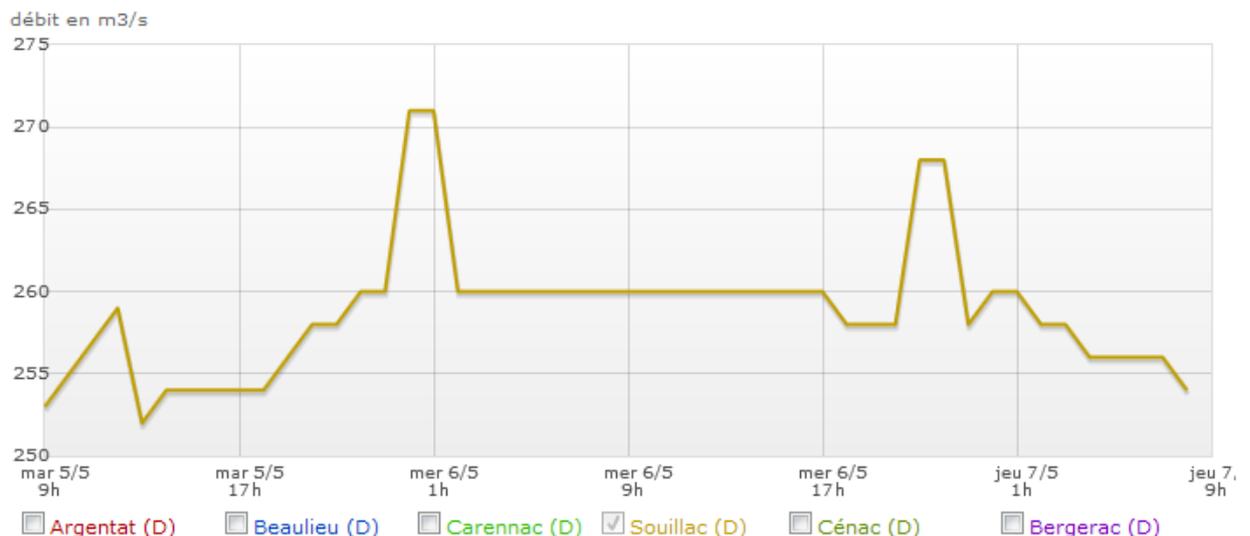


Figure 11-1 : Débit de la Dordogne à Souillac le jour de la mesure (site www.debits-dordogne.fr)

Le débit de la Dordogne est resté stable à 260 m³/s au niveau Souillac toute la journée du 6 mai 2015. Plus en aval vers le cingle de Montfort, le débit a été mesuré à 270 m³/s, ce qui est cohérent avec les apports intermédiaires du bassin versant de la Dordogne.

11.1 Limites méthodologiques

La méthodologie employée pour les deux sites de mesures est présentée dans cette section.

Le transport sédimentaire dans un modèle 1D a été présenté au chapitre 0. A partir des profils en travers réalisés par le profileur de courant, il est possible de calculer les vitesses de frottement pour chacune des colonnes d'eau verticales du profil en travers.

Dans le voisinage des parois, la distribution verticale des vitesses d'écoulement suit une loi logarithmique. Sous l'hypothèse d'une modélisation de type Manning-Strickler (Chen, 1989), cette loi s'écrit asymptotiquement en fonction de la hauteur z au-dessus du fond sous la forme :

$$\frac{u(z)}{u_*} = a \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/6}$$

Où $a = 9,5$, u_* la vitesse de frottement et z_0 correspond à une longueur de rugosité dépendant du substrat présent. Lors du traitement de données mesurées par l'ADCP, la valeur du rapport $u_*/z_0^{1/6}$ est ajustée à partir des vitesses mesurées dans les cellules sur chaque colonne d'eau du profil en travers (SonTek, 2014).

Afin de déduire la vitesse de frottement u_* , il est nécessaire d'évaluer la hauteur de rugosité z_0 , dépendant des sédiments présents. Attention, cette dimension hydraulique n'est pas équivalente au diamètre d'un gravier ou d'un galet. Cette hauteur est en général proportionnelle au diamètre D_{84} du substrat (diamètre du substrat tel que 84% des éléments relevés sont de diamètre inférieur). Cette donnée n'étant pas disponible pour les sites de mesures, une valeur constante sera fixée pour la suite du calcul.

Le calcul des vitesses de frottement est effectué ci-après en faisant l'hypothèse $z_0=5$ mm, sachant que la sensibilité du calcul de u_* à la variation de z_0 est l'élévation à la puissance 1/6. Une petite incertitude sur la longueur z_0 entraîne une variation importante de la vitesse de frottement u_* et le carré de cette variation pour la contrainte de cisaillement. Par exemple **une variation de 1 mm de z_0 entraîne une variation de 0,30 m/s de la vitesse de frottement u_* !**

La valeur de la contrainte de cisaillement locale τ au fond de chaque cellule verticale est évaluée à partir de la vitesse de frottement par la relation

$$\tau = \rho u_*^2$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³).

11.2 Site de Pinsac, le 6 mai 2015 entre 10h00 et 13h00

La figure ci-dessous représente les points GPS des profils en travers réalisés sur le site de mesure de Pinsac.

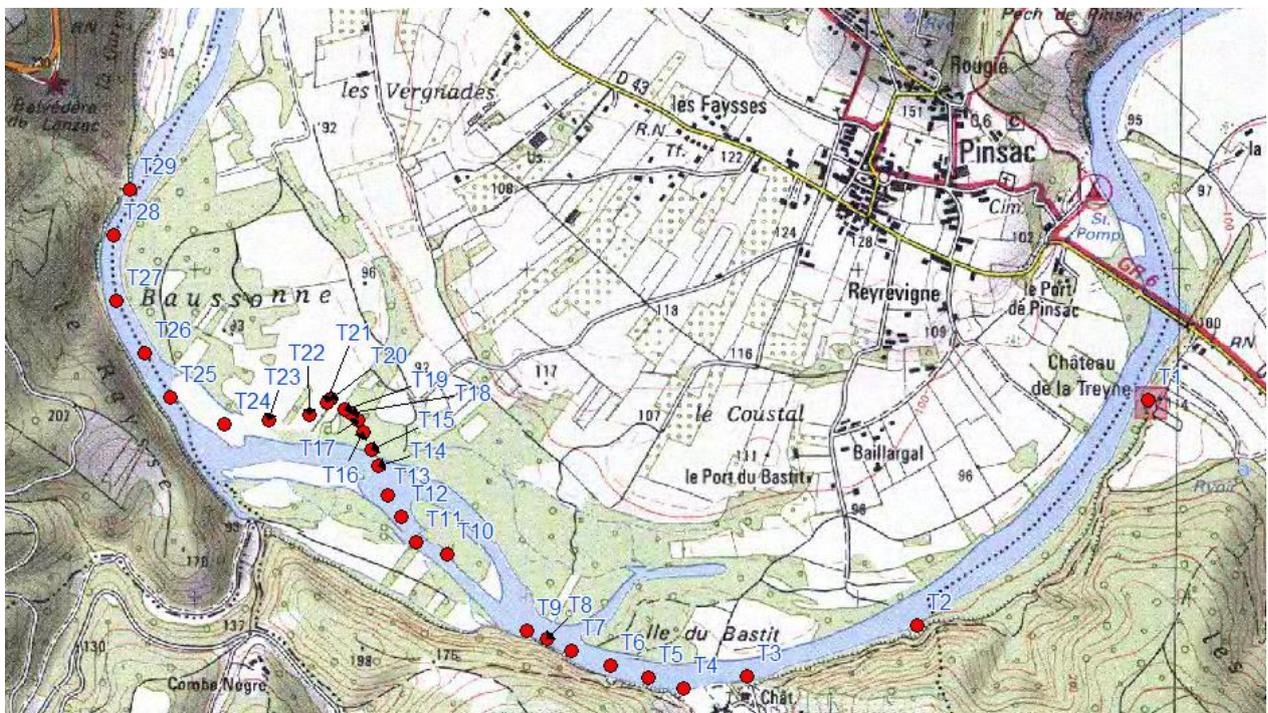


Figure 11-2 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)

Le fond de carte est une ancienne carte IGN de type SCAN 25 d'une date antérieure à la construction du viaduc de l'autoroute, ce qui permet de voir l'évolution du lit de la Dordogne soumis à une importante érosion au niveau des piles du pont.

En prenant la photo aérienne du site Géoportail, les points de mesures se retrouvent bien sur le lit de la Dordogne actuel (figure ci-dessous) :



Figure 11-3 : Site de Pinsac - Points GPS des profils en travers mesurés (Geoportail)

Le site de Pinsac a été mesuré à l'aide de 29 profils en travers. Les éléments structurant du point de vue hydraulique et hydromorphologique sont les suivants :

- T1 à T6 : la rive gauche est très raide, sinon une falaise, la rive droite est stable, la ripisylve composée essentiellement de peupliers et de saules.
- T7 à T9 : la rive gauche reste principalement une falaise, la rive droite comporte le bras mort du Bastit, puis l'amont d'une annexe hydraulique connectée au moment de la mesure.
- T10 à T12 : une érosion de berge est visible en rive gauche, le bois séparant le bras principal de l'annexe hydraulique est partiellement inondé en rive droite.
- T13 à T15 : aval de la confluence avec l'annexe hydraulique, la rive gauche est boisée, l'érosion commence en rive droite.
- T16 à T20 : atterrissement en rive gauche, dont le substrat est composé de pierres fines et pierres grosses, érosion tout le long de la rive droite.
- T21 à T23 : fin de l'atterrissement en rive gauche, suivi par une ripisylve plus fournie en peupliers. En rive droite c'est la zone des piles de soutien du viaduc avec des enrochements de protection partiellement emportés. Une annexe hydraulique part en rive gauche
- T24 : île séparant les deux bras en rive gauche, boisée de peupliers, ripisylve boisée en rive droite.
- T25 : aval de l'annexe hydraulique. La rive gauche est une falaise, un atterrissement végétalisé se situe en rive droite.
- T26 à T29 : la rive gauche est boisée mais reste très pentue, la ripisylve côté rive droite est composée de grands peupliers.

A l'aide des mesures de débits, le débit des annexes hydrauliques a été évalué (débit total de 260 m³/s de la Dordogne) :

- Première annexe hydraulique : débit d'environ 60 m³/s.
- Deuxième annexe hydraulique : débit d'environ 70 m³/s.

Les photos ci-dessous représentent les deux zones d'érosion, la première en rive gauche au niveau de T12 et la deuxième en face de l'atterrissement T16 à T20. Les mécanismes d'érosion de berge sont complexes et n'ont pas été spécifiquement analysés dans le cadre de cette étude.



Figure 11-4 : Site de Pinsac - Zone d'érosion en rive gauche au niveau du profil T12



Figure 11-5 : Site de Pinsac - Zone d'érosion en rive droite entre profils T16 et T20

11.2.1 Analyse hydraulique

Les figures ci-dessous représentent la cartographie réalisée à partir des profils en travers et le champ de vitesses mesurées avec le profileur de courant. Des bathymétries associées sont représentées sous chaque carte.



Figure 11-6 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur le profil en travers T1

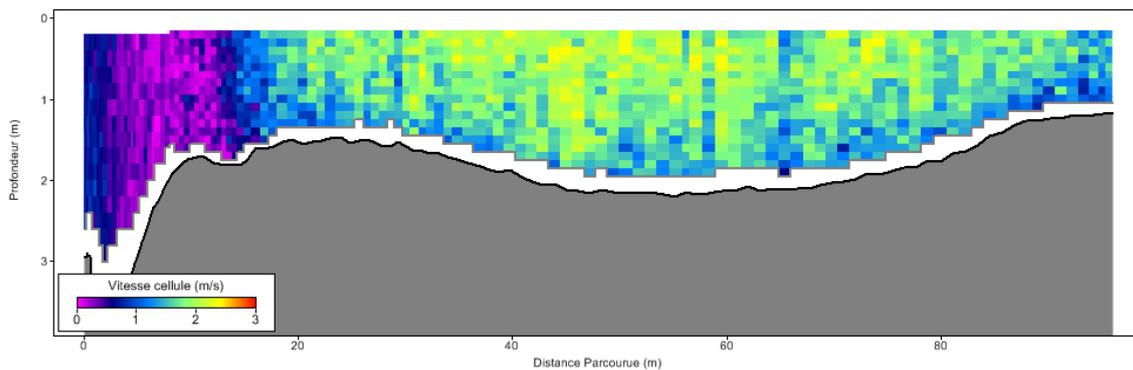


Figure 11-7 : Site de Pinsac - Profil en travers T1, bathymétrie et vitesses

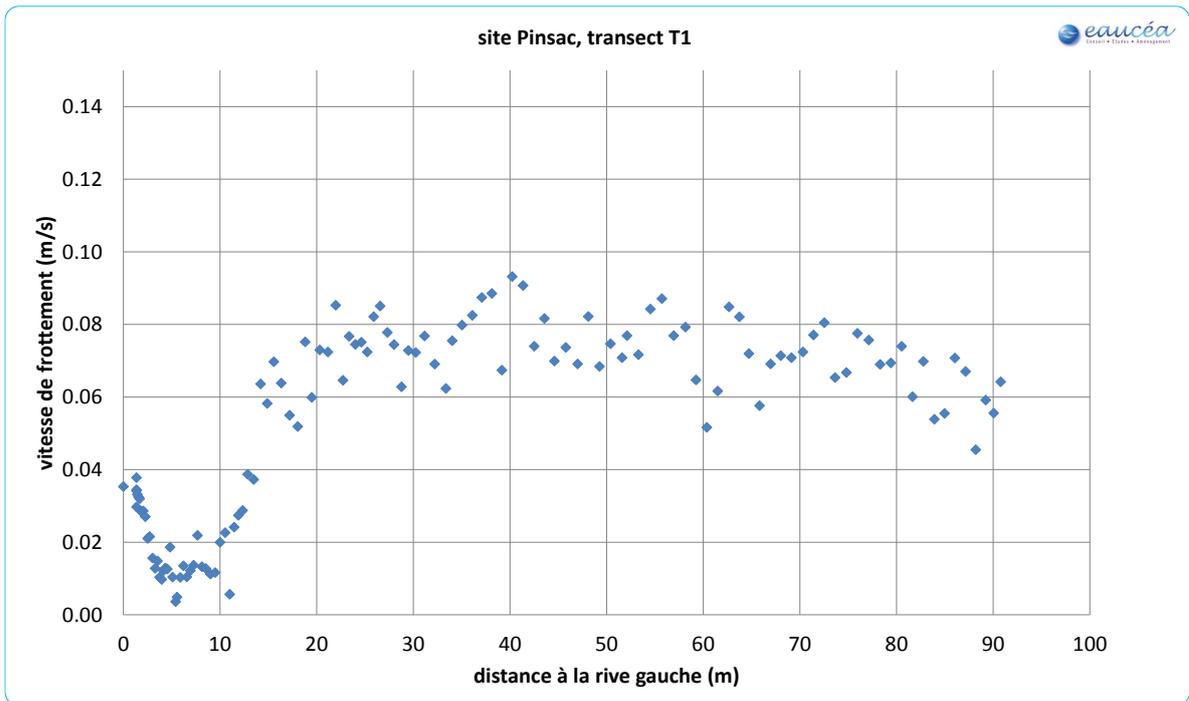


Figure 11-8 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T1

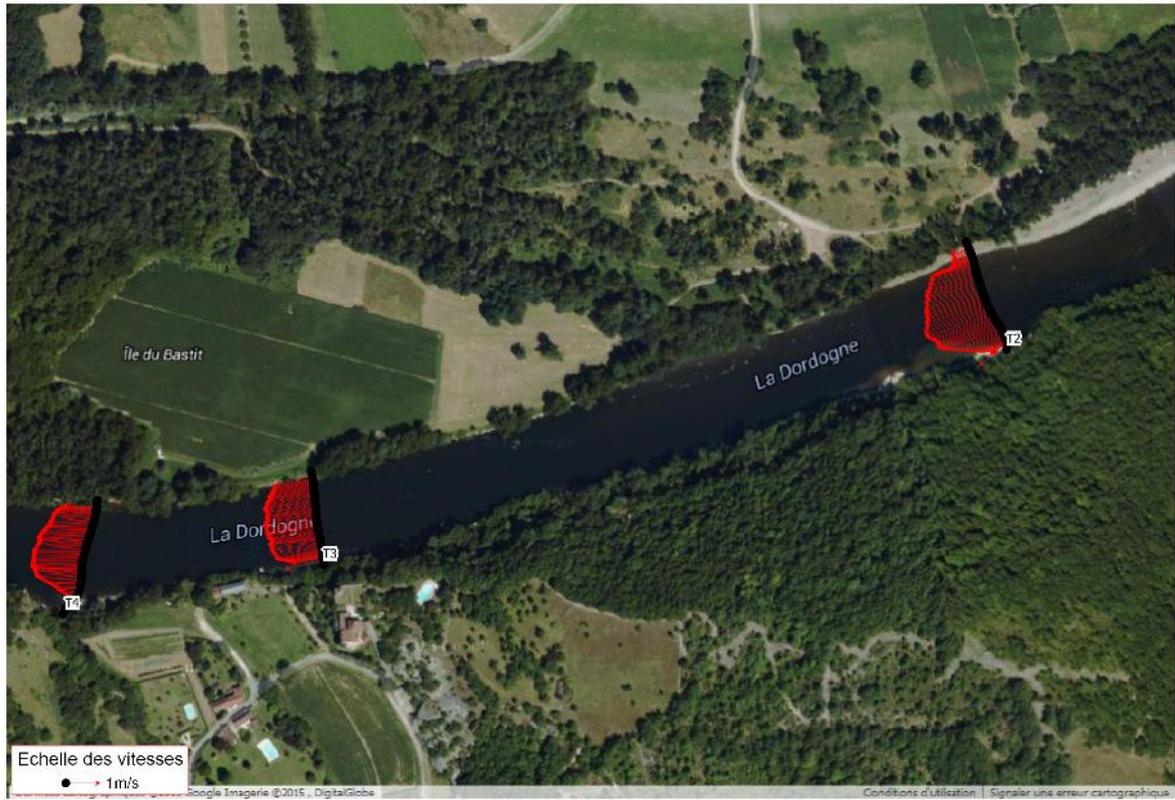


Figure 11-9 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T2 à T4

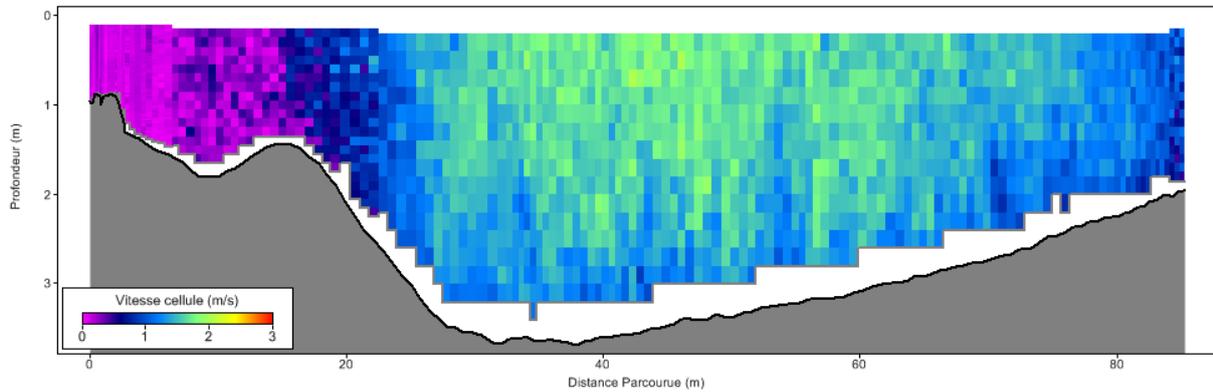


Figure 11-10 : Site de Pinsac - Profil en travers T4, bathymétrie et vitesses

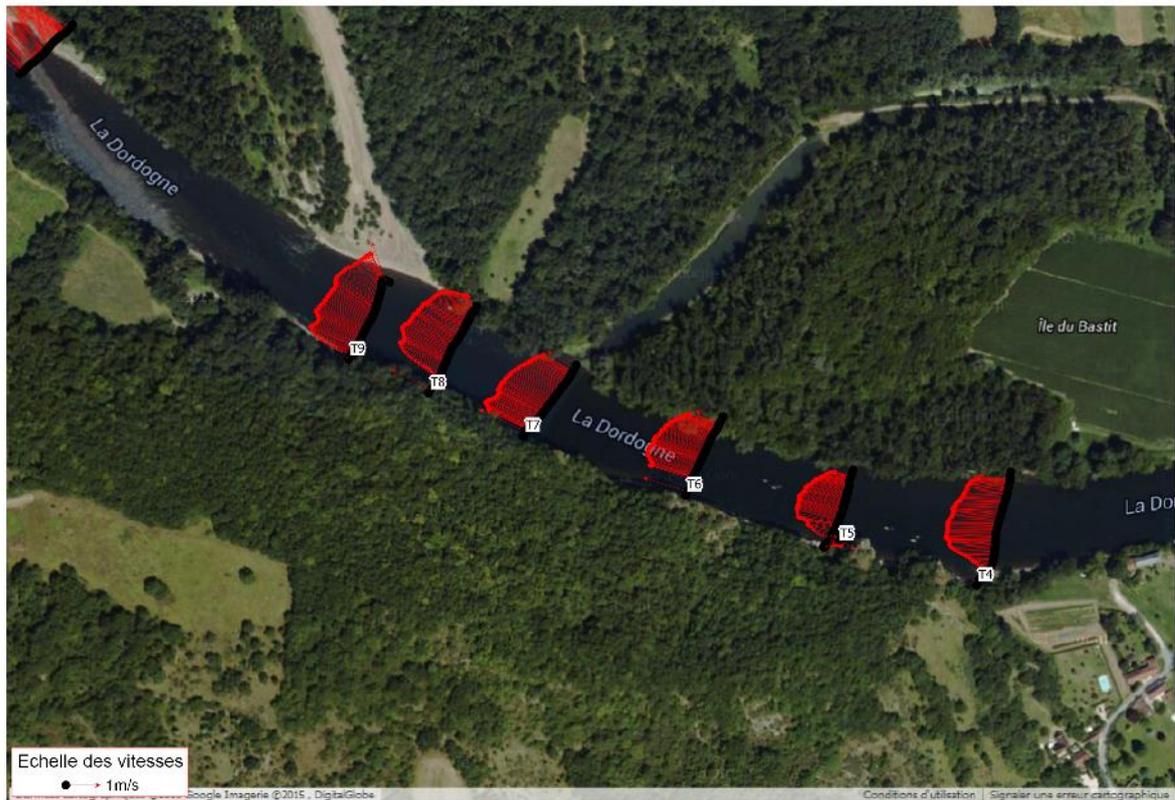


Figure 11-11 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T4 à T9

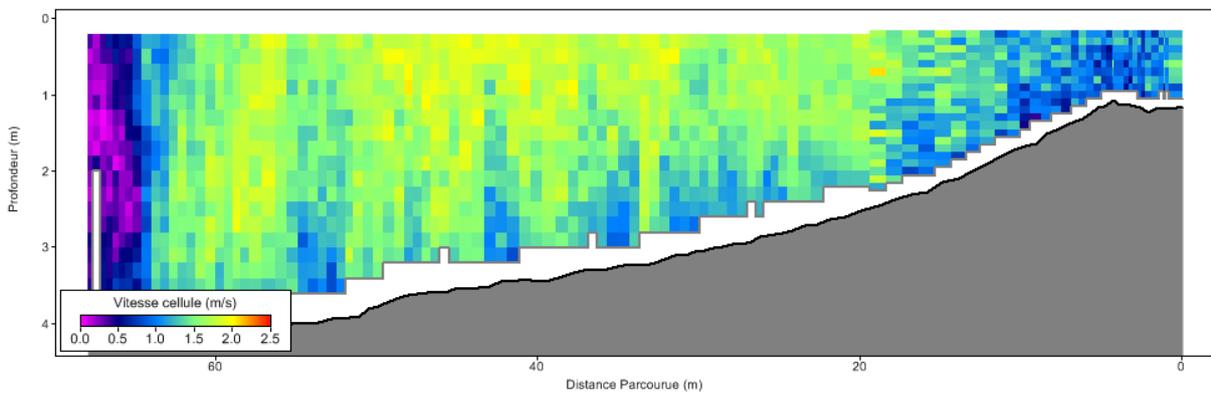


Figure 11-12 : Site de Pinsac - Profil en travers T9, bathymétrie et vitesses



Figure 11-13 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T10 à T23

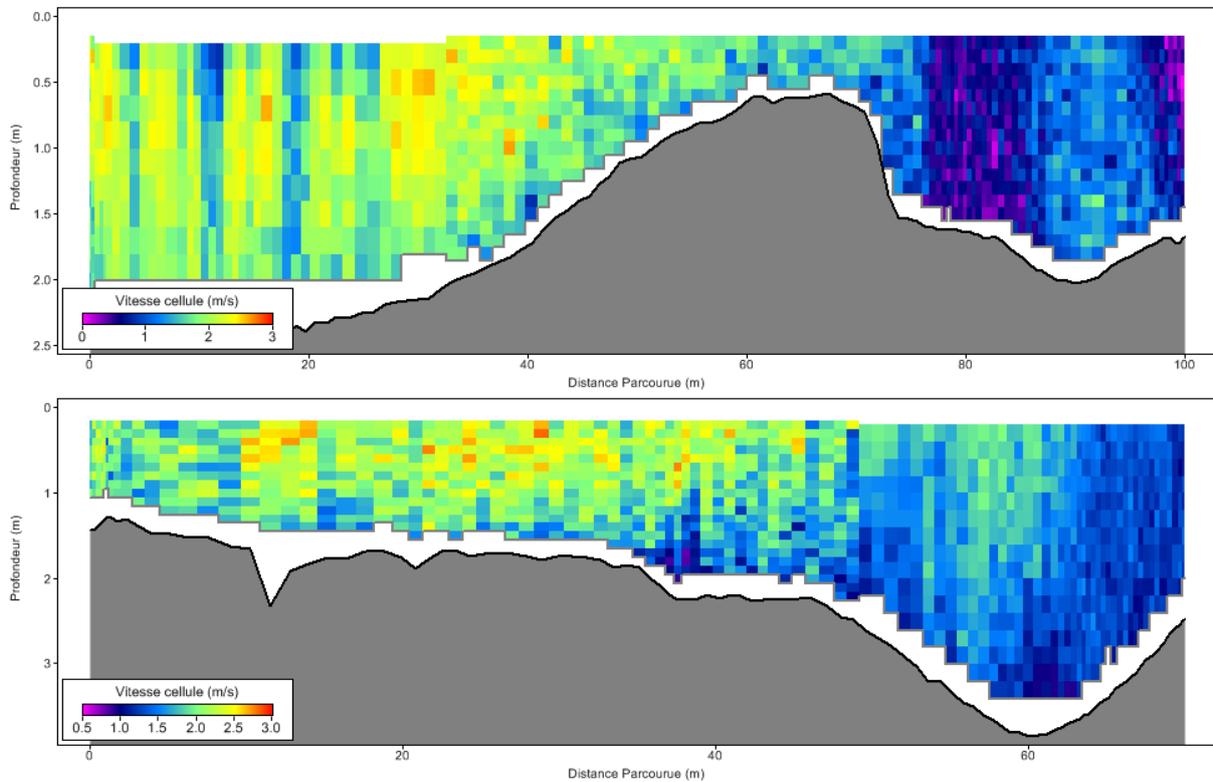


Figure 11-14 : Site de Pinsac - Profils en travers T13 (haut) et T15 (bas), bathymétrie et vitesses



Figure 11-15 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T23 à T28

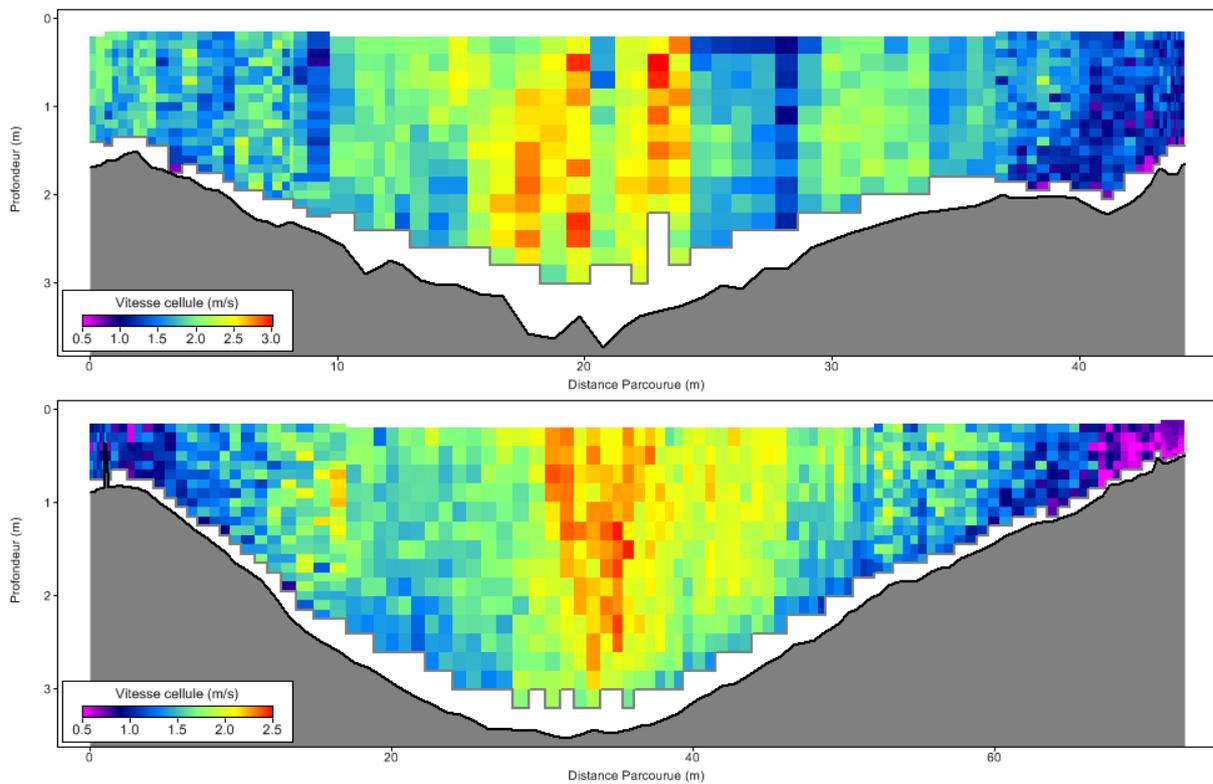


Figure 11-16 : Site de Pinsac - Profils en travers T23 (haut) et T25 (bas), bathymétrie et vitesses



Figure 11-17 : Site de Pinsac - Champ des vitesses sur les profils en travers T26 à T29

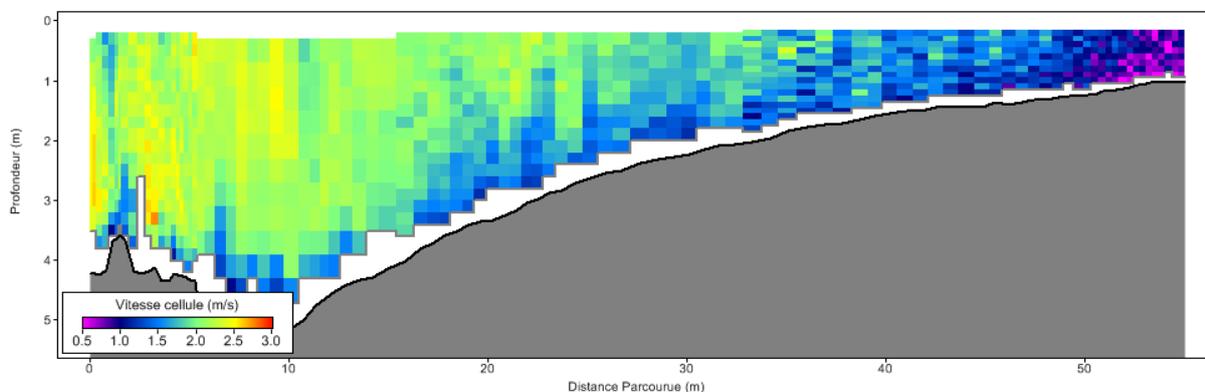


Figure 11-18 : Site de Pinsac - Profil en travers T28, bathymétrie et vitesses

Ces mesures montrent que pour ce débit de $260 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la Dordogne, les vitesses des écoulements dépassent souvent $1,5 \text{ m/s}$ et atteignent 3 m/s localement. La répartition spatiale des vitesses montre que la zone d'érosion située au niveau de T14 et T15 correspond à un écoulement ayant des vitesses de l'ordre de 2 m/s situées particulièrement du côté de la berge érodée. D'autres mécanismes de déstabilisation des berges existent et les dynamiques d'écoulements sont très variables et peuvent changer à des débits plus élevés.

La répartition verticale des vitesses montre que des vitesses importantes sont présentes proche du fond (dès la deuxième cellule en partant du fond).

11.2.2 Transport sédimentaire

Selon la méthode et avec les hypothèses présentées au § 6.1, le tableau ci-dessous présente les valeurs de diamètre maximum potentiellement mobilisable (en mm) pour chaque profil en travers et le calcul équivalent obtenu par le modèle hydraulique HEC-RAS.

site de Pinsac		Modèle HEC-RAS	
Profil en travers	Dmax profil (mm)	RS Profil	Dmax HECRAS (mm)
T1	18	96690	15
T2	19	95965	92
T3	13	95501	32
T4	12		
T5	8		
T6	13		
T7	11		
T8	12		
T9	13	94685	9
T10	22	94355	31
T11	22		
T12	26		
T13	22		
T14	30	94019	16
T15	25		
T16	23		
T17	25		
T18	25		
T19	25		
T20	27		
T21	17		
T22	40	93701	10
T23	28		
T24	35		
T25	21	93424	34
T26	22		
T27	23	93022	21
T28	25		
T29	13	92660	6

Tableau 11-1: Site de Pinsac - Diamètre max potentiellement mobilisable par profil en travers

L'ordre de grandeur des valeurs calculées dans le tableau ci-dessus à partir des mesures ADCP et du modèle hydraulique reste globalement le même, excepté pour le profil en travers T2.

Il faut cependant garder en mémoire le fait que le positionnement physique (ADCP et bathymétrie) et les dates de mesures (2015 et 1998) de chaque profil en travers diffèrent.

Globalement pour le site de Pinsac, le diamètre maximum potentiellement mobilisable moyen est de 21 mm selon les mesures ADCP 2015 et de 27 mm selon les données du modèle HEC-RAS.

Les courbes suivantes présentent des profils en travers de vitesses de frottement calculées pour le site de Pinsac selon les faciès d'écoulement.

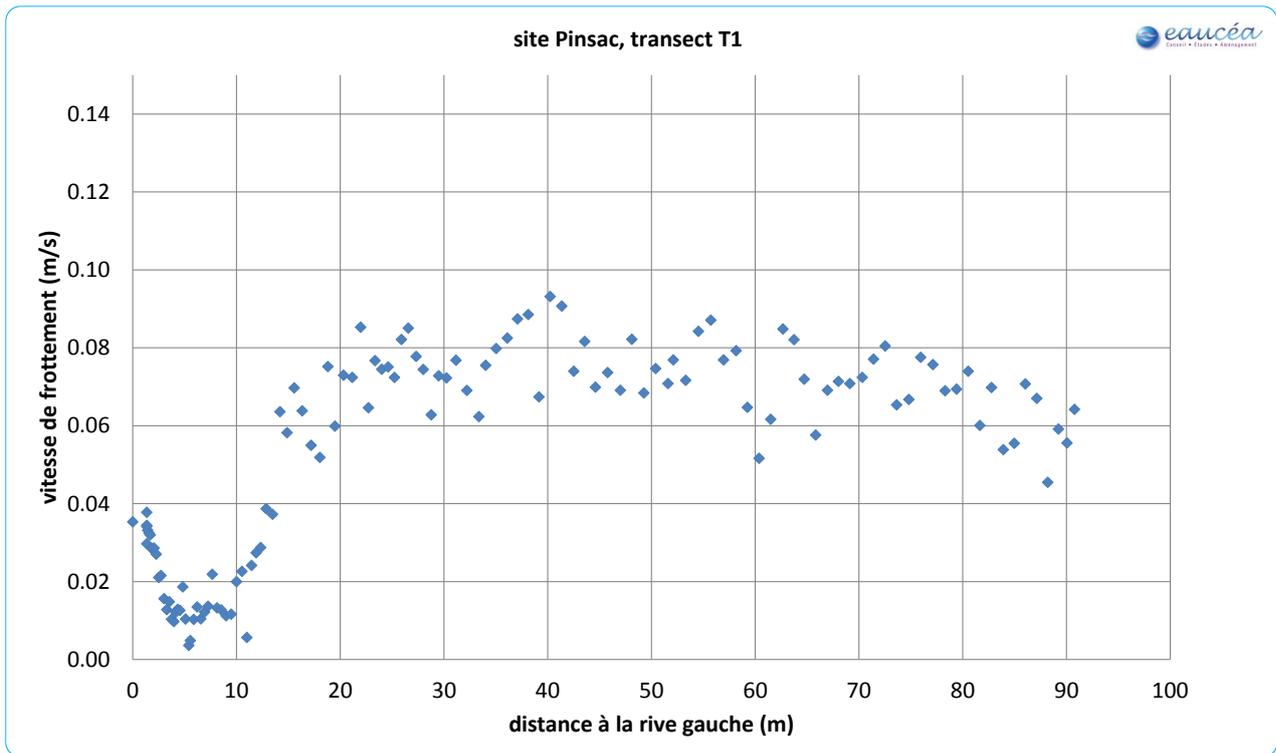


Figure 11-19 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T1

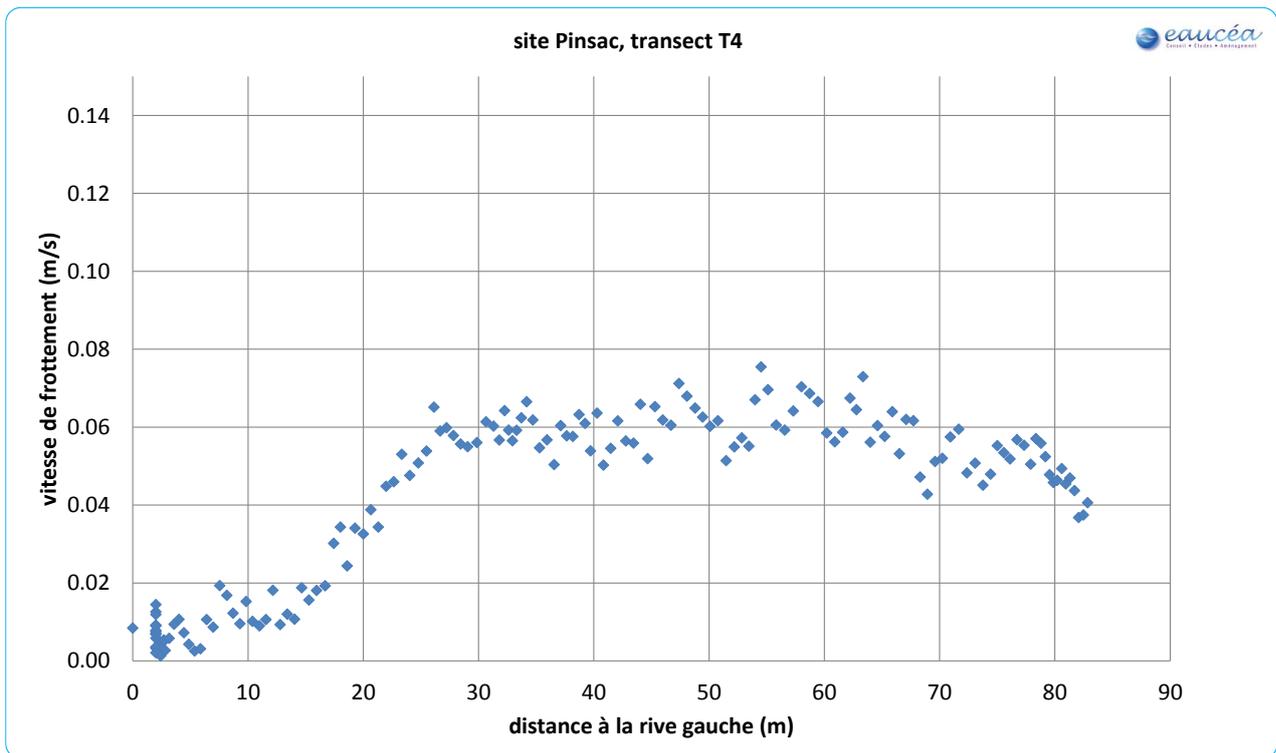


Figure 11-20 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T4

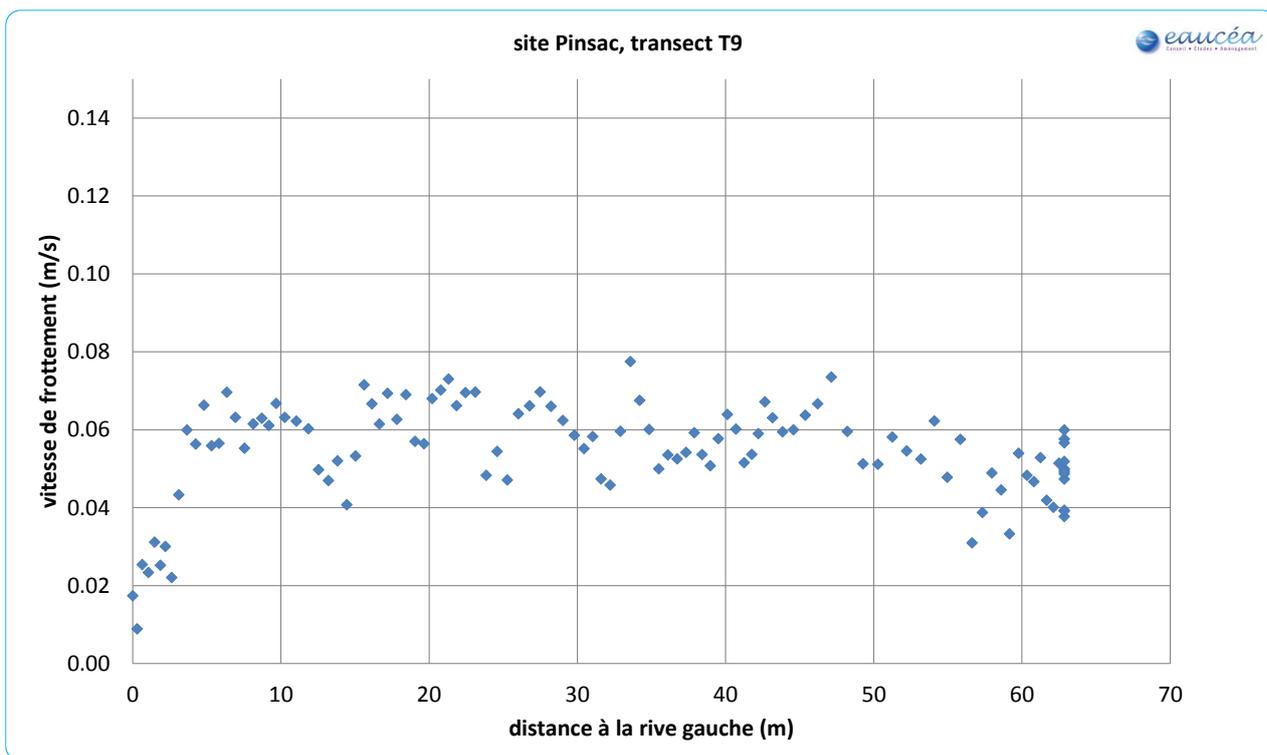


Figure 11-21 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T9

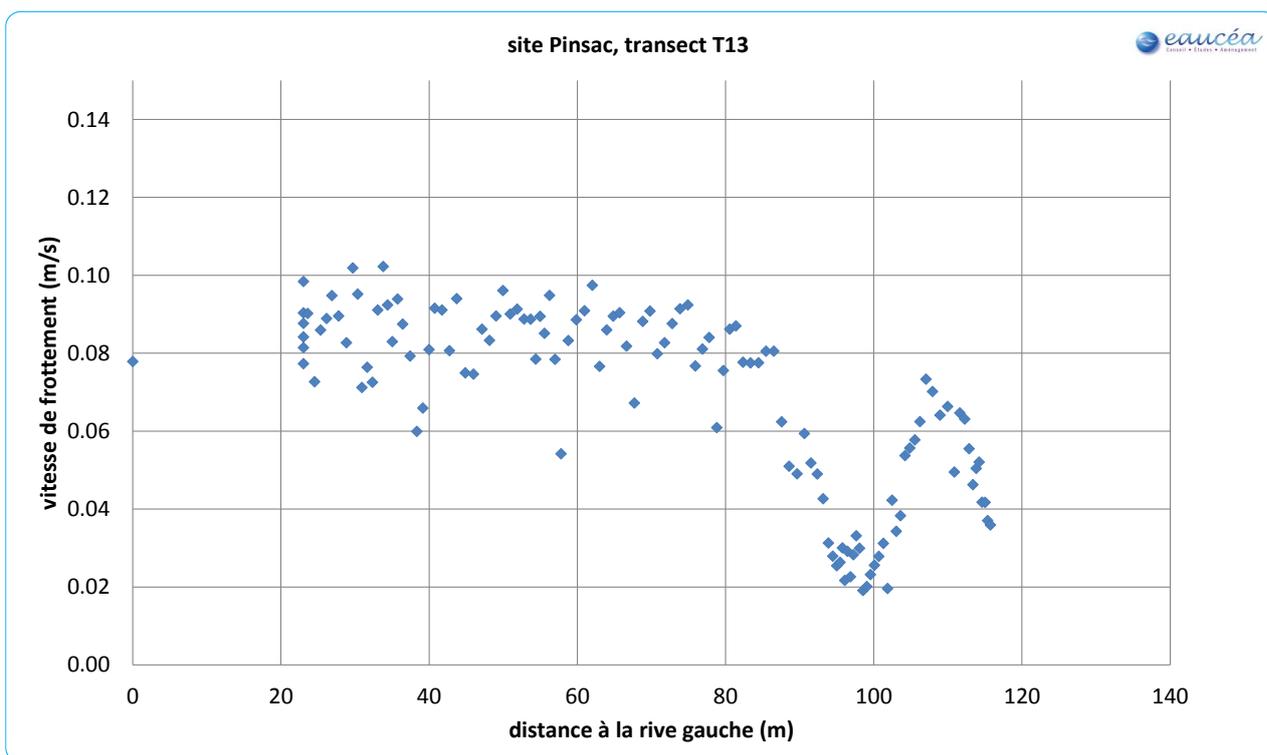


Figure 11-22 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T13

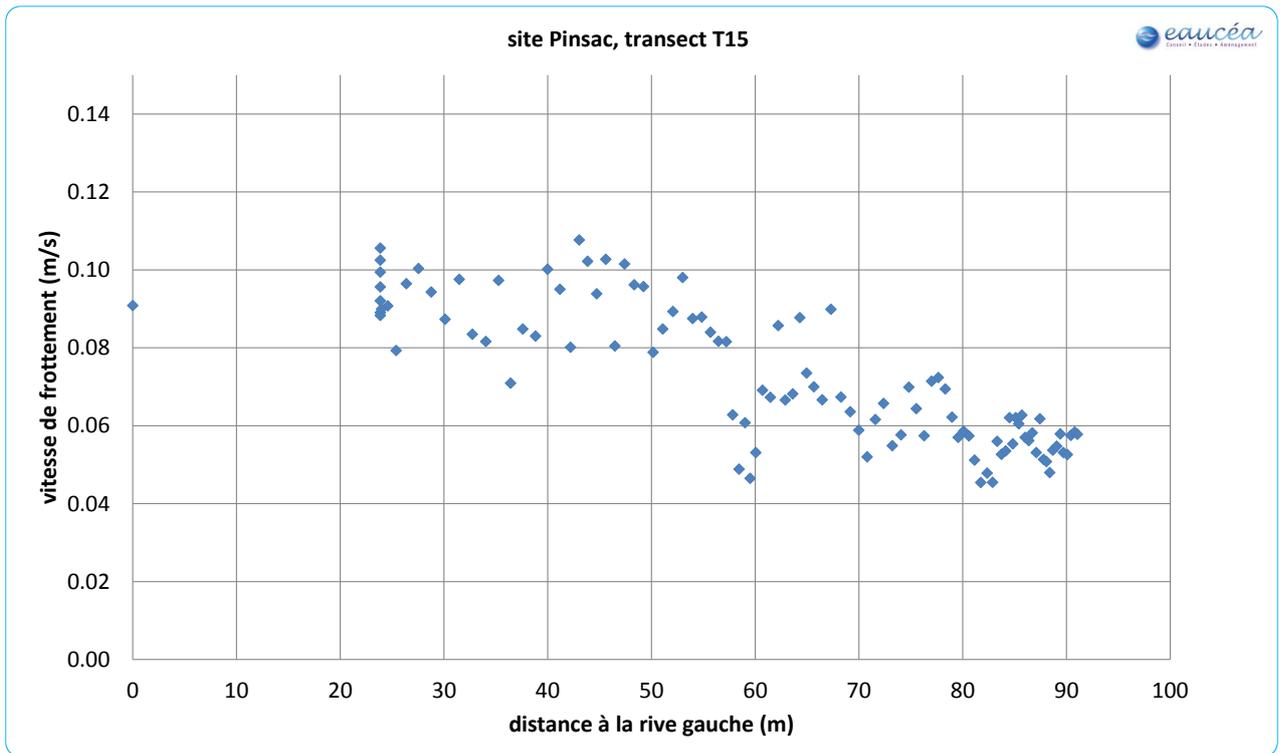


Figure 11-23 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T15

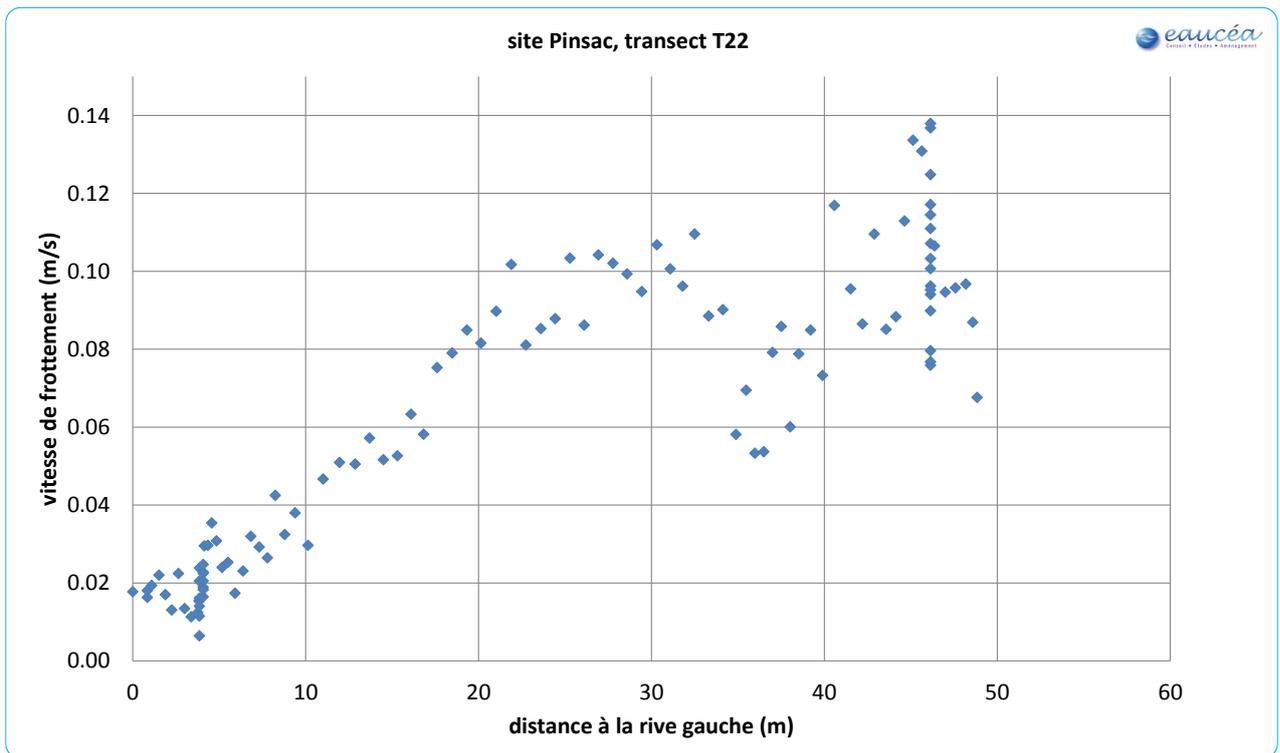


Figure 11-24: Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T22

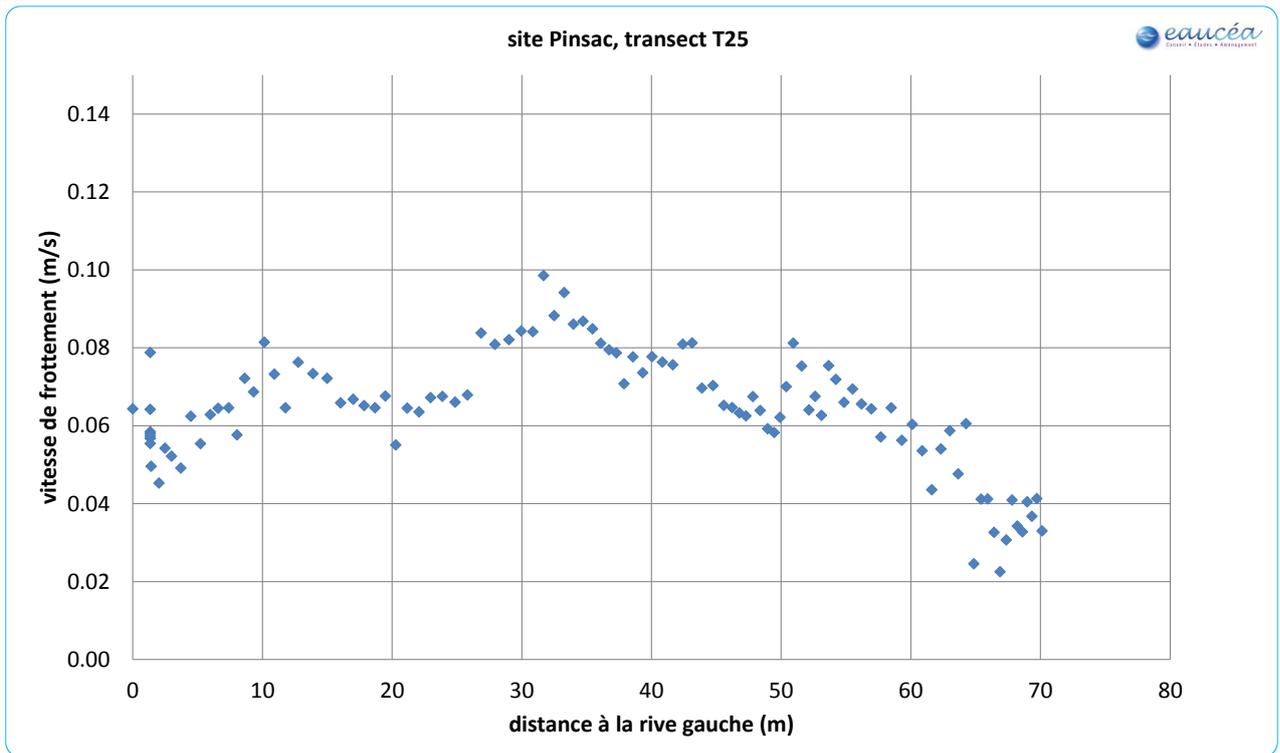


Figure 11-25 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T25

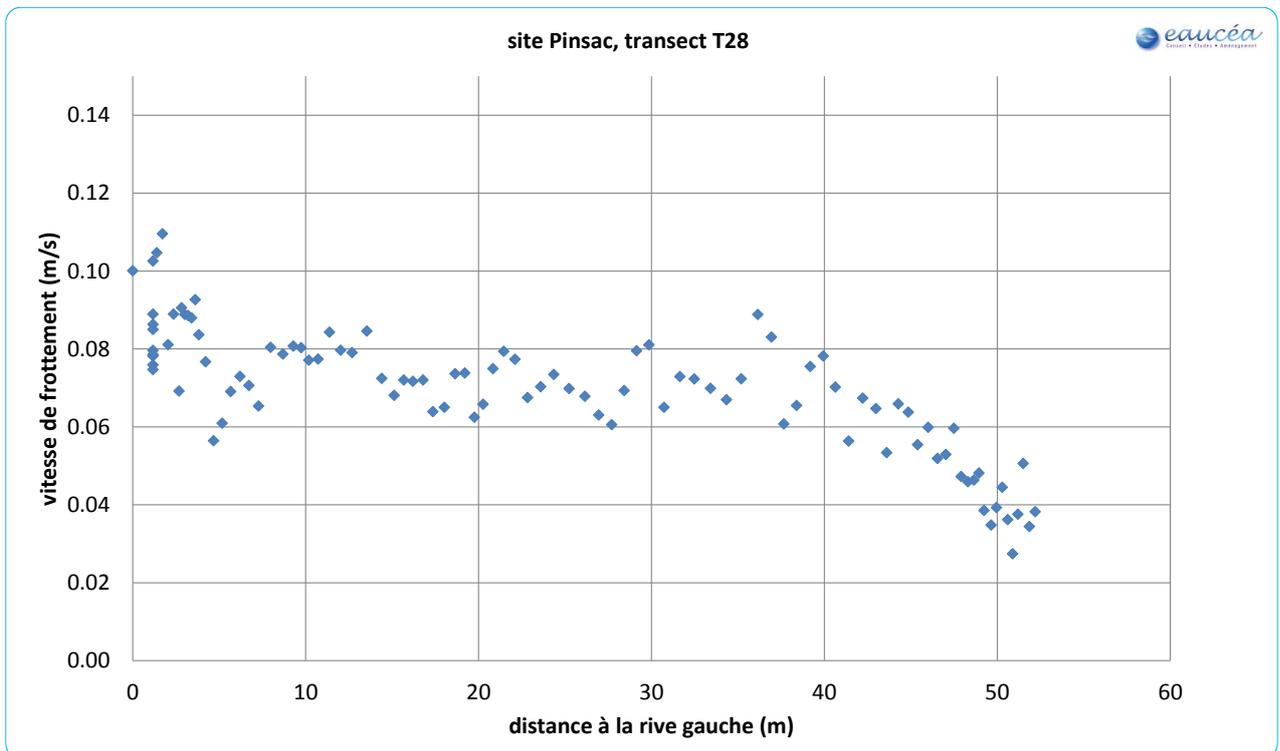


Figure 11-26 : Site de Pinsac - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T28

11.3 Site de Montfort, le 6 mai 2015 entre 15h00 et 18h00

La figure ci-dessous représente les points GPS des profils en travers réalisés sur le site de mesure de Montfort.

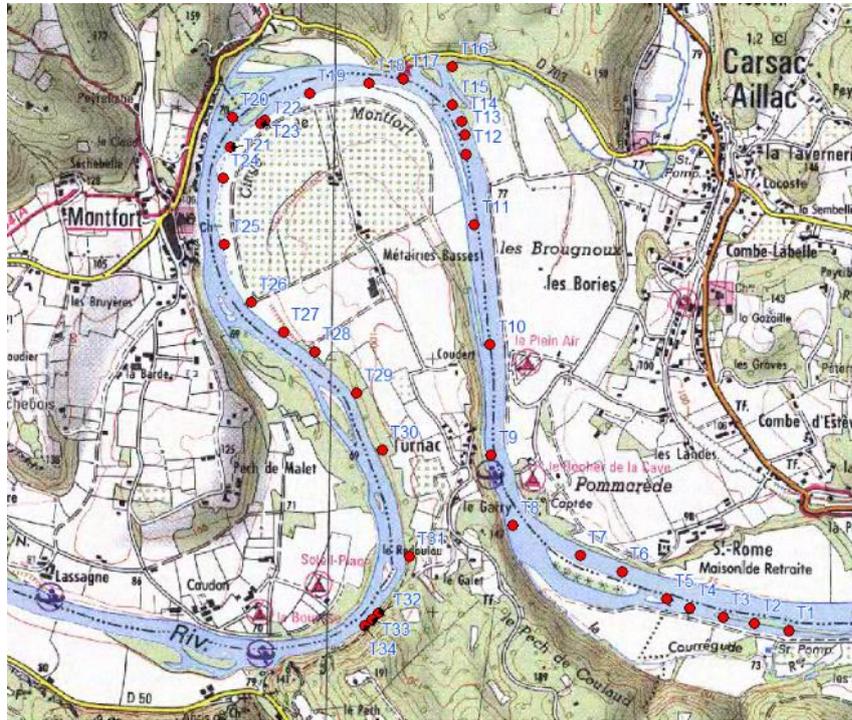


Figure 11-27 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (carte IGN)

Au niveau des premiers profils en travers, la carte IGN SCAN 25 représente une annexe hydraulique qui n'est plus active. Cette zone est maintenant boisée avec un atterrissement en bordure rive gauche. La photo aérienne du site Géoportail ci-dessous est présentée avec les positions des profils en travers par rapport au lit actuel de la Dordogne.

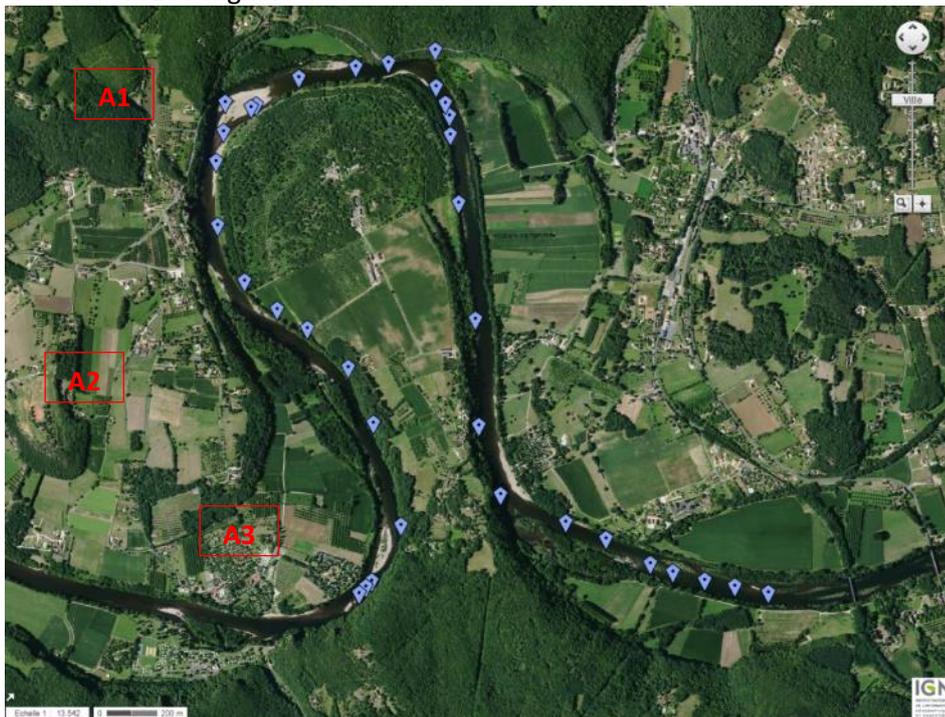


Figure 11-28 : Site de Montfort - Points GPS des profils en travers mesurés (Géoportail)

Le site a été mesuré à l'aide de 34 profils en travers. Les éléments structurant du point de vue hydraulique et hydromorphologique sont les suivants :

- T1 à T2 : atterrissement en rive gauche. Ripisylve arborée en rive droite.
- T3 à T4 : ripisylve plus fournie en rive gauche. Ripisylve arborée en rive droite.
- T5 à T8 : atterrissement en rive gauche. Ripisylve arborée en rive droite.
- T9 à T11 : rives gauche et droite boisées.
- T12 à T14 : encoche d'érosion en rive droite, traitée avec une plantation de saules.
- T15 à T20 : falaise en rive droite
- T21 : aval atterrissement (A1) en cours de végétalisation formant une annexe hydraulique
- T22 à T23 : bras gauche de l'atterrissement (A1)
- T24 à T25 : entre les deux atterrissements.
- T26 : bras gauche de l'atterrissement (A2).
- T27 : aval de l'annexe hydraulique située en rive droite.
- T28 : entre deux atterrissements
- T29 : bras gauche de l'atterrissement (A3), avant confluence.
- T30 : aval de l'atterrissement et de la confluence.
- T31 : bras gauche petite île en amont du dernier virage.
- T32 : amont érosion camping
- T33 à T34 : zone d'érosion du camping, avec plantation de saules en traitement.

A l'aide des mesures de débits, le débit des annexes hydrauliques autour des atterrissements A1 à A3 a été évalué (débit total de 270 m³/s de la Dordogne) :

- A1 : débit d'environ 90 m³/s par le bras gauche.
- A2 : débit d'environ 25 m³/s par le bras droit.
- A3 : débit d'environ 40 m³/s par le bras droit.
- Bras droit dernière île : débit d'environ 45 m³/s.

La photo ci-dessous a été prise au niveau du cingle, vers le profil T18. Elle illustre le fait que la végétation sur ce secteur a pu croître à l'intérieur même du lit mineur, le débit le jour de la mesure étant nettement inférieur au débit de plein bord.



Figure 11-29 : Site de Montfort - Ripisylve en lit mineur

11.3.1 Analyse hydraulique

Les figures ci-dessous représentent la cartographie réalisée à partir des profils en travers et le champ de vitesses mesurées avec le profileur de courant. Des bathymétries associées sont représentées sous chaque carte.



Figure 11-30 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T1 à T3

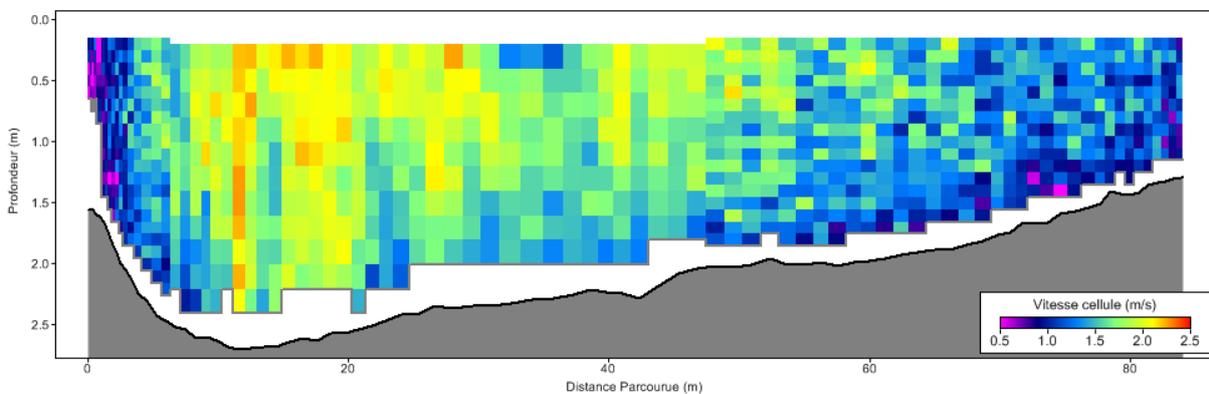


Figure 11-31 : Site de Montfort - Profil en travers T3, bathymétrie et vitesses

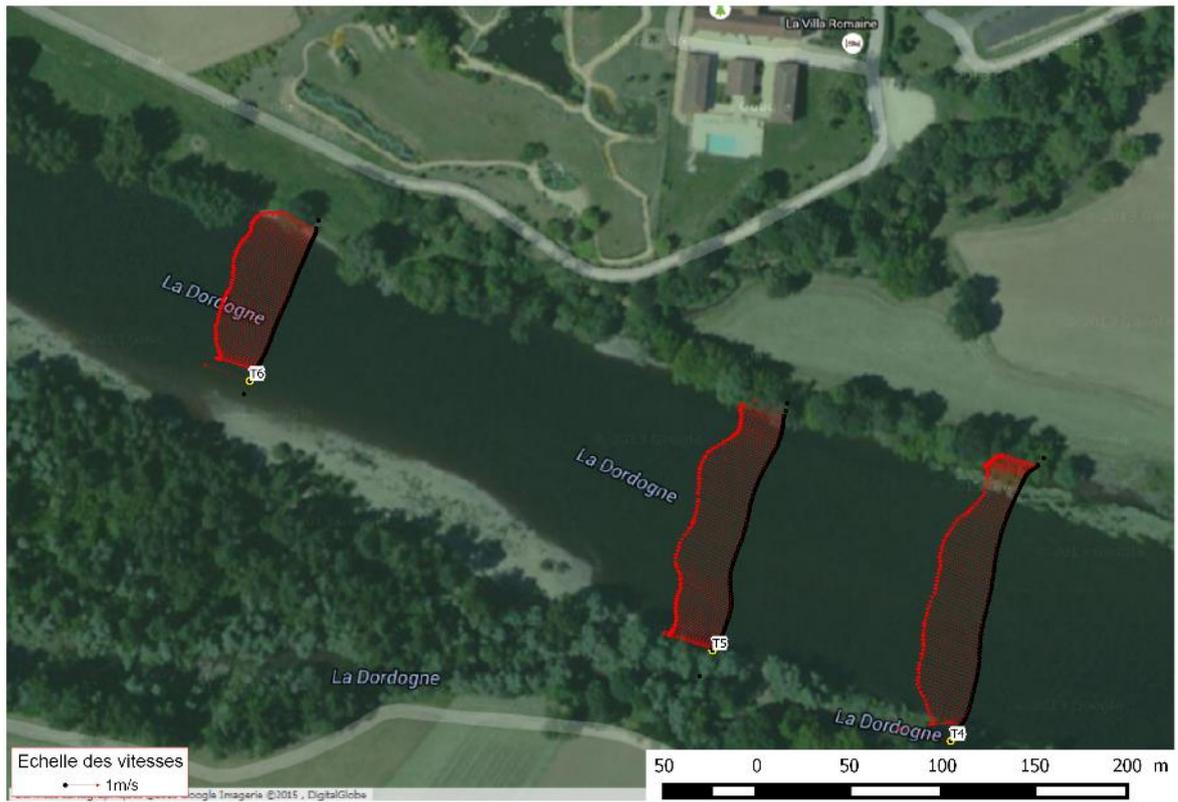


Figure 11-32 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T4 à T6

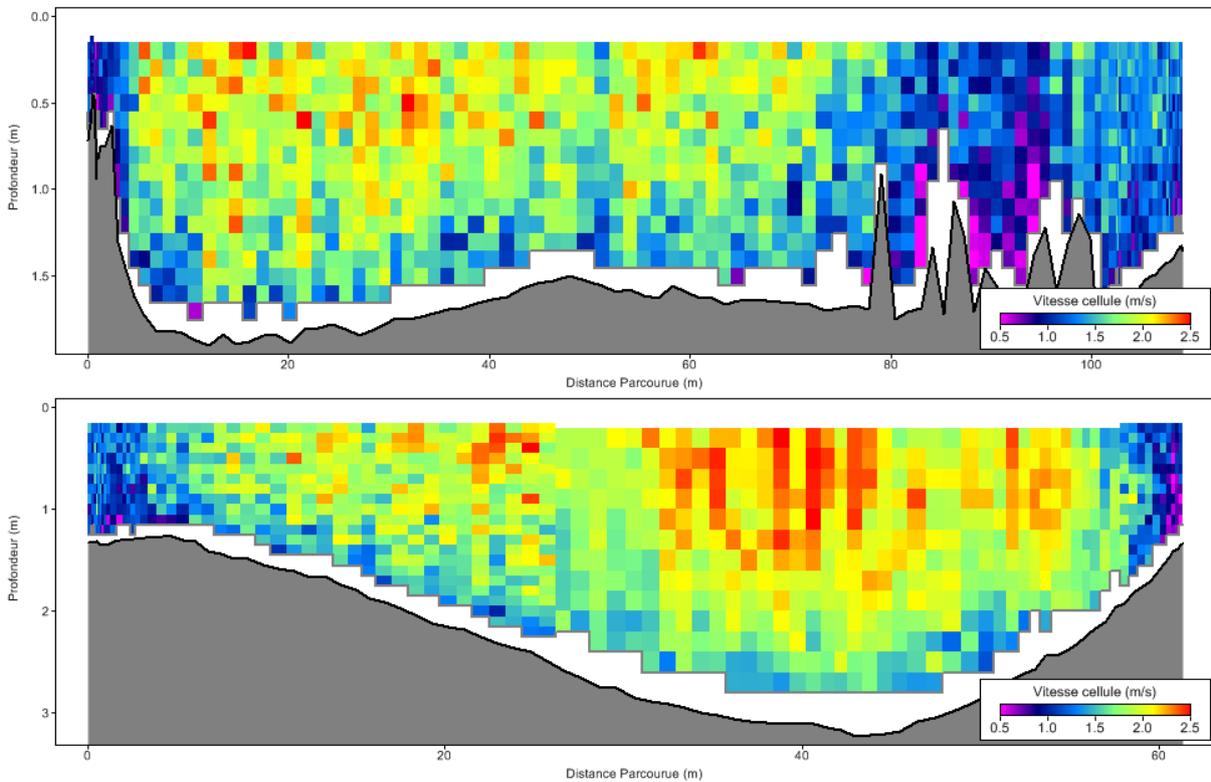


Figure 11-33 : Site de Montfort - Profils en travers T4 (haut) et T6 (bas), bathymétrie et vitesses



Figure 11-34 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T6 à T9

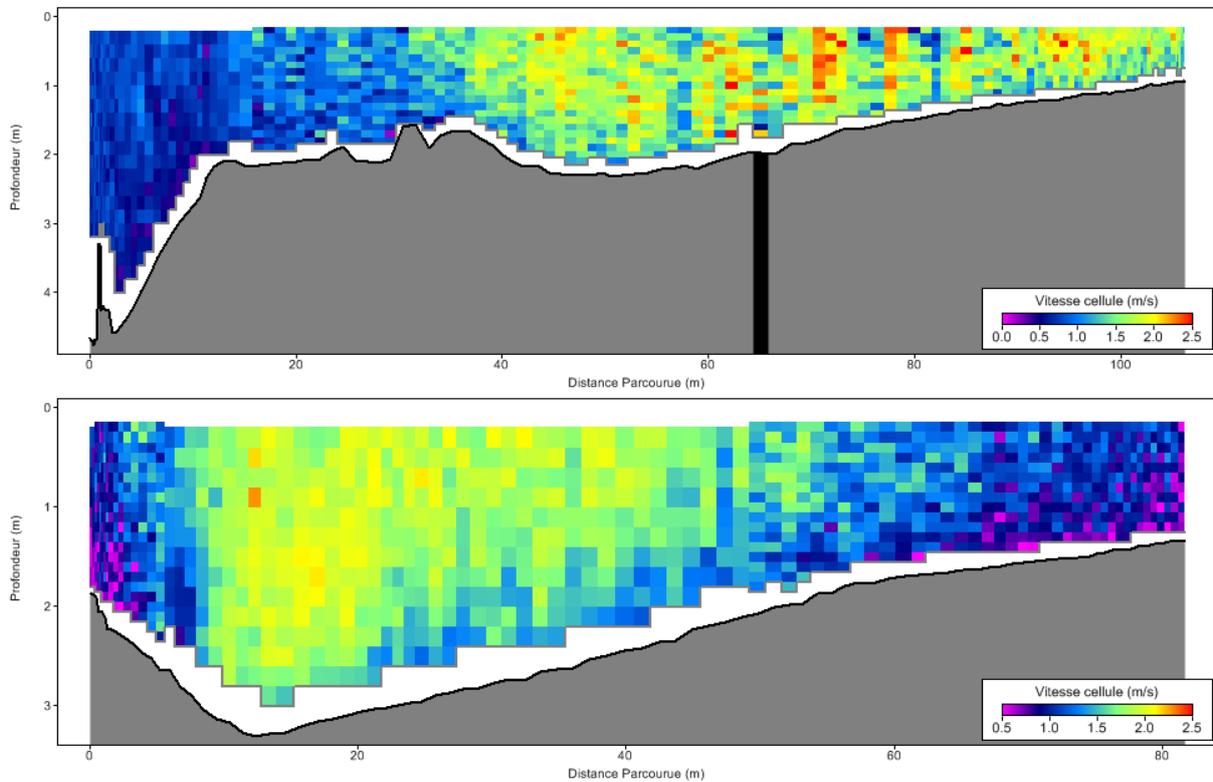


Figure 11-35 : Site de Montfort - Profils en travers T8 (haut) et T9 (bas), bathymétrie et vitesses



Figure 11-36 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T10 à T11



Figure 11-37 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T12 à T19

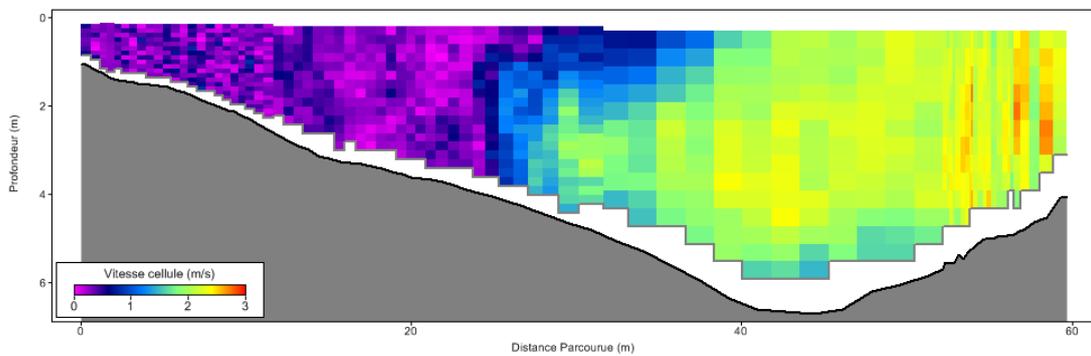


Figure 11-38 : Site de Montfort - Profil en travers T17, bathymétrie et vitesses

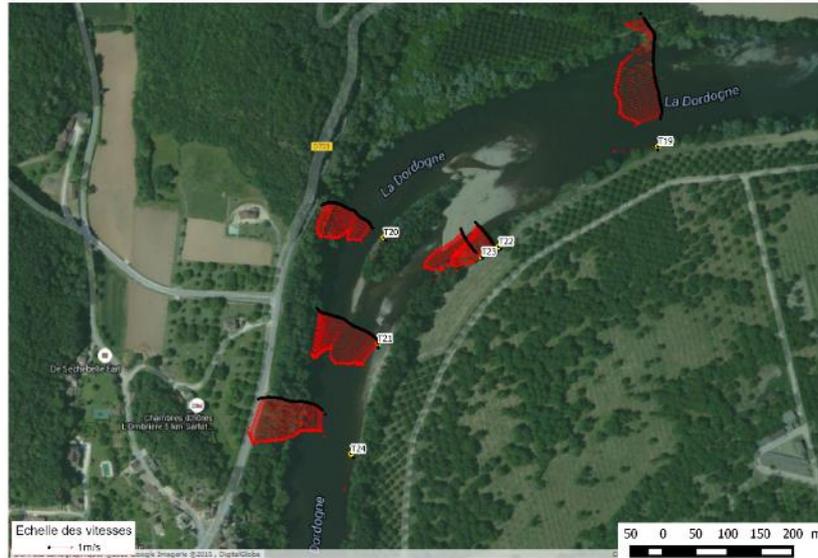


Figure 11-39 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T19 à T24

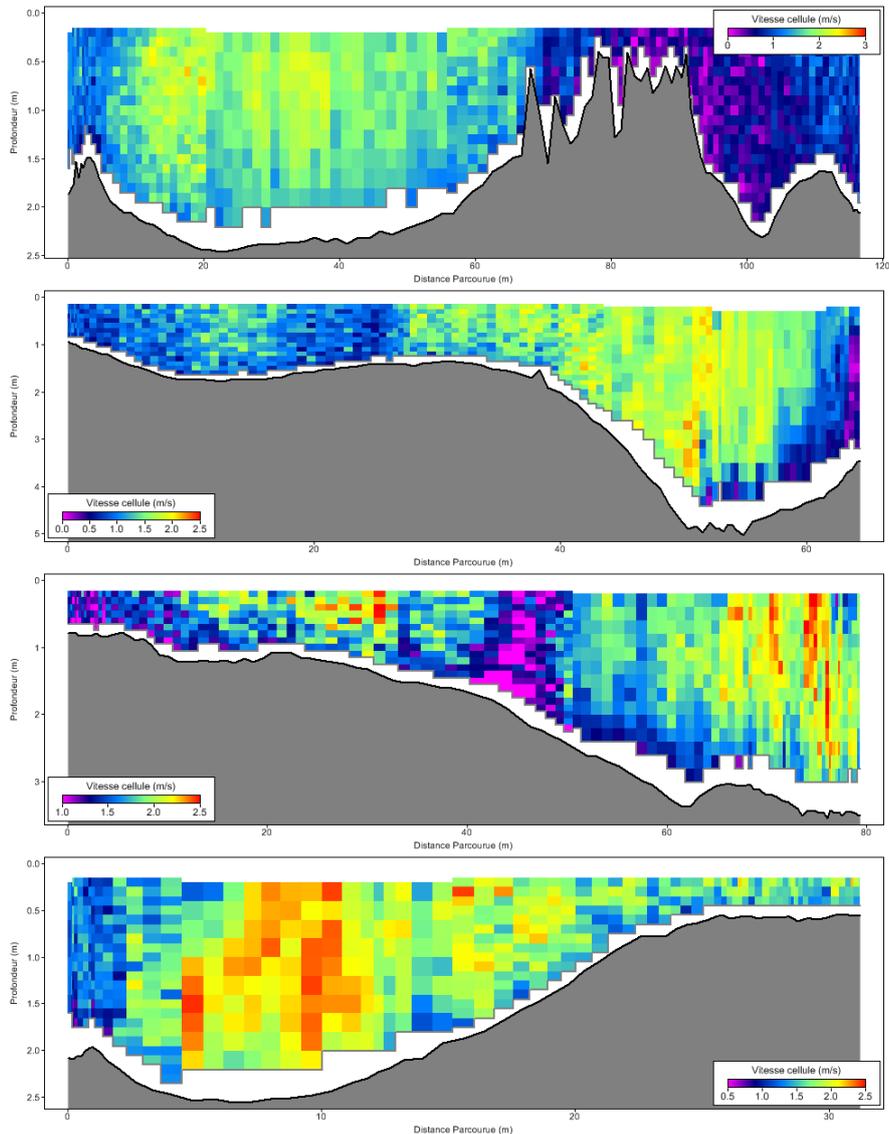


Figure 11-40 : Site de Montfort - Profils en travers T19 (haut) à T22 (bas), bathymétrie et vitesses



Figure 11-41 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T25 à T28

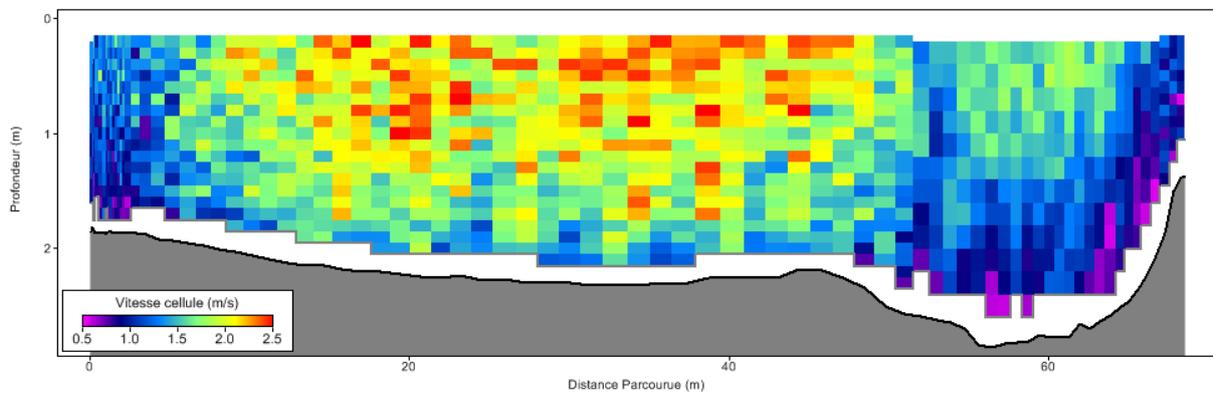


Figure 11-42 : Site de Montfort - Profil en travers T26, bathymétrie et vitesses

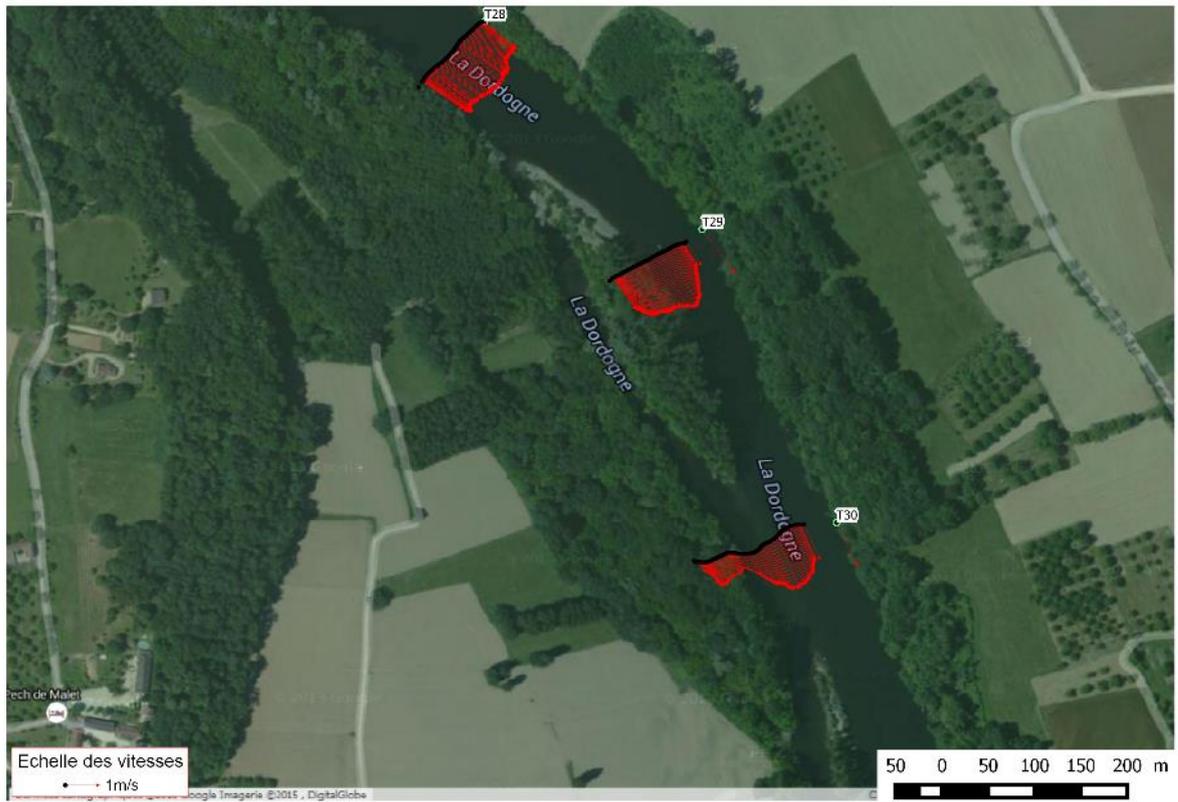


Figure 11-43 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T28 à T30

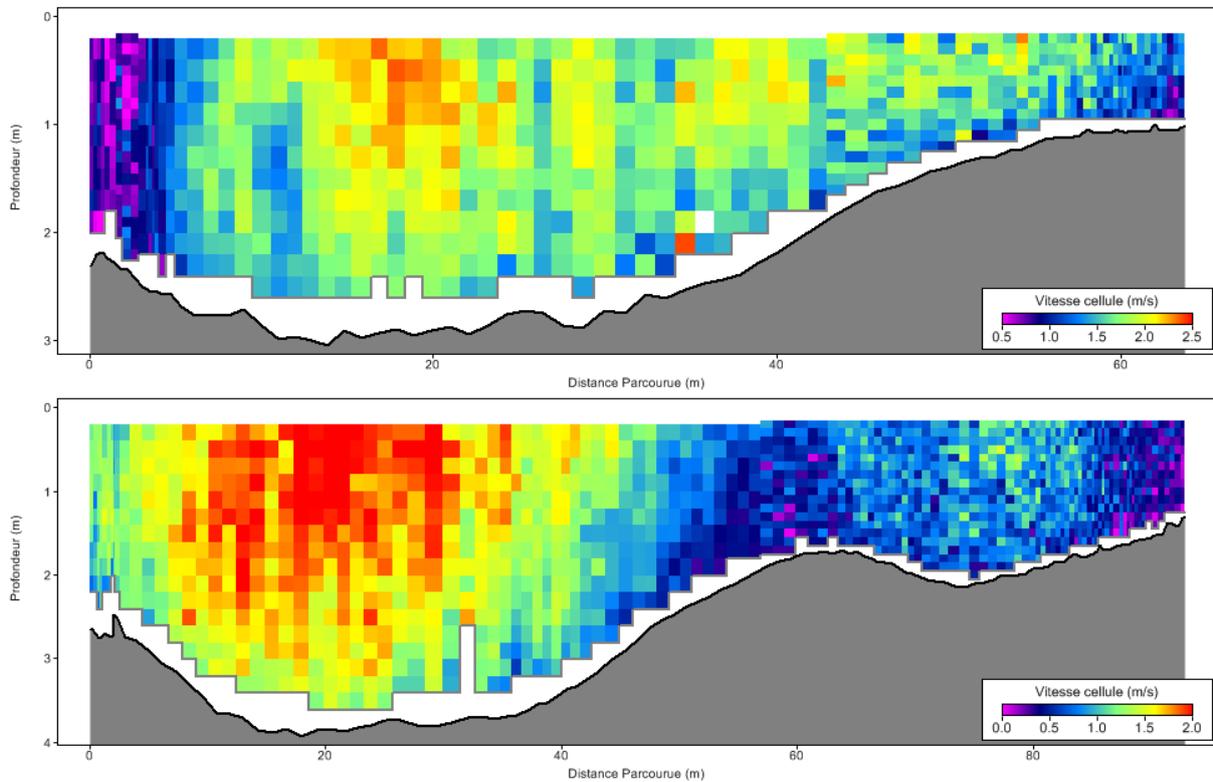


Figure 11-44 : Site de Montfort - Profils en travers T29 (haut) et T30 (bas), bathymétrie et vitesses



Figure 11-45 : Site de Montfort - Champ des vitesses sur les profils en travers T31 à T34

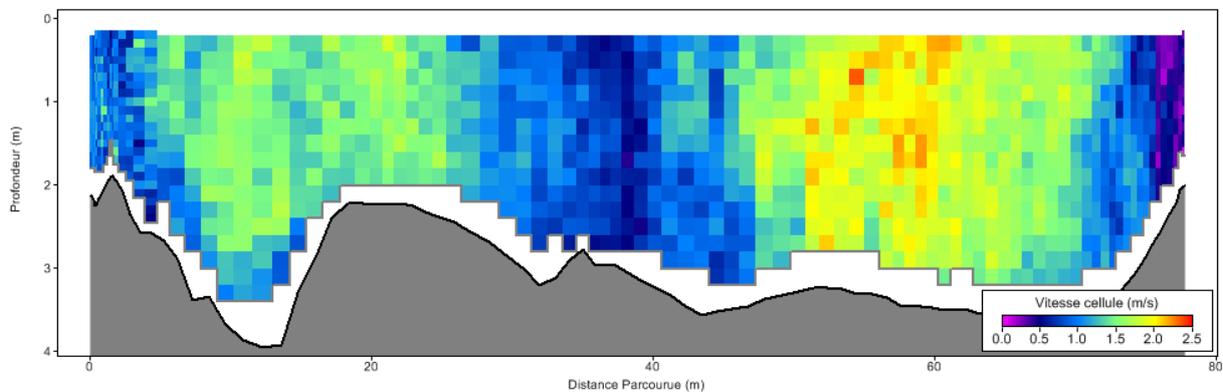


Figure 11-46 : Site de Montfort - Profil en travers T32, bathymétrie et vitesses

Les cartes de vitesses montrent que dans le secteur du cingle de Montfort, des zones profondes et présentant des vitesses élevées sont observées (illustrant les phénomènes de dépôt dans la partie interne du cingle et d'érosion dans la partie externe), cf profil en travers T17.

Les zones d'érosion des berges correspondent sur ce secteur à des zones de vitesses élevées, en particulier au niveau du camping (profil en travers T32).

11.3.2 Transport sédimentaire

Selon la méthode et les avec les hypothèses présentées au § 6.1, le tableau ci-dessous présente les valeurs de diamètre maximum potentiellement mobilisable (en mm) pour chaque profil en travers et le calcul équivalent obtenu par le modèle hydraulique HEC-RAS.

site de Monfort		Modèle HEC-RAS	
Profil en travers	Dmax profil (mm)	RS Profil	Dmax HECRAS (mm)
T1	19	66438	25
T2	19		
T3	21		
T4	21		
T5	23	66055	21
T6	17		
T7	21	65776	41
T8	23	65369	25
T9	16	65022	16
T10	12		
T11	18	64388	16
T12	18		
T13	21		
T14	17		
T15	24	63755	53
T16	23		
T17	21	63486	12
T18	18		
T19	16	63145	26
T20	14		
T21	24	62769	23
T22	24		
T23	36		
T24	23		
T25	10	62265	20
T26	18		
T27	16	61938	18
T28	17	61672	31
T29	18		
T30	12	61301	16
T31	23	60998	37
T32	17		
T33	11	60623	11
T34	18		

Tableau 11-2: Site de Montfort - Diamètre max potentiellement mobilisable par profil en travers

Globalement pour le site de Montfort, le diamètre maximum potentiellement mobilisable moyen est de 19 mm selon les mesures ADCP 2015 et de 24 mm selon les données du modèle HEC-RAS.

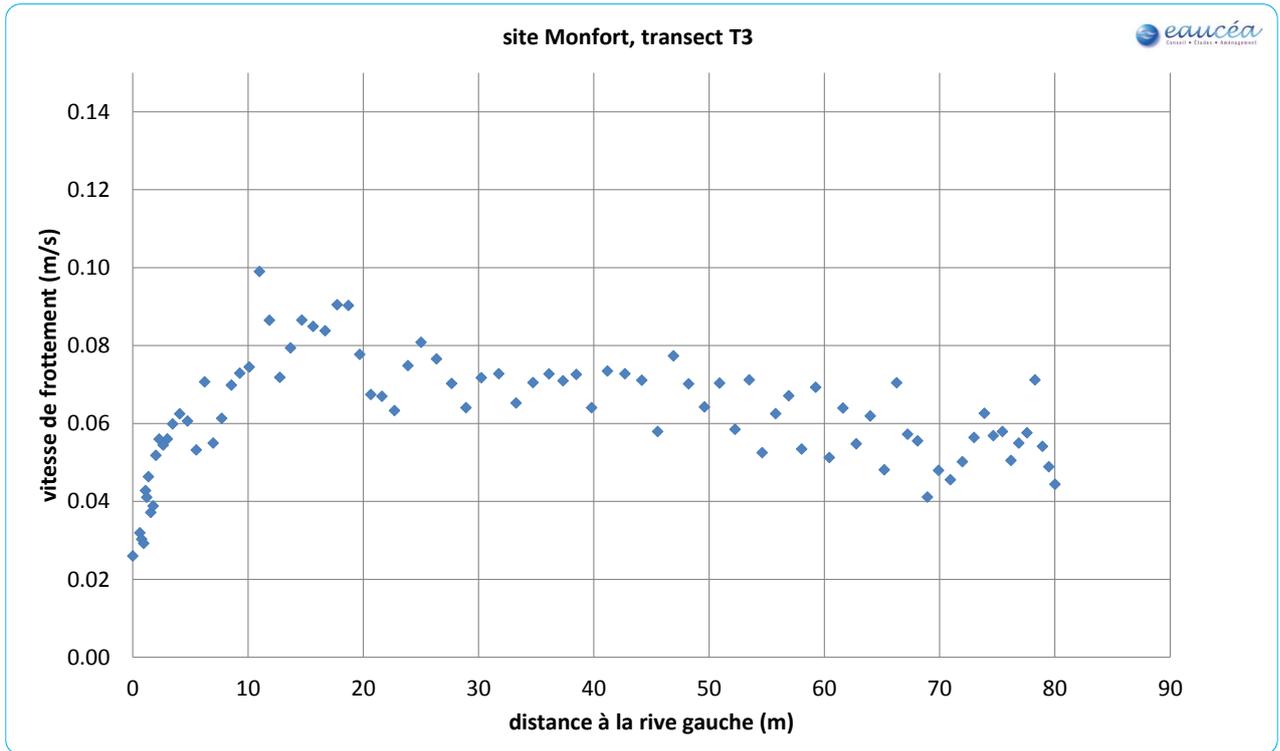


Figure 11-47 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T3

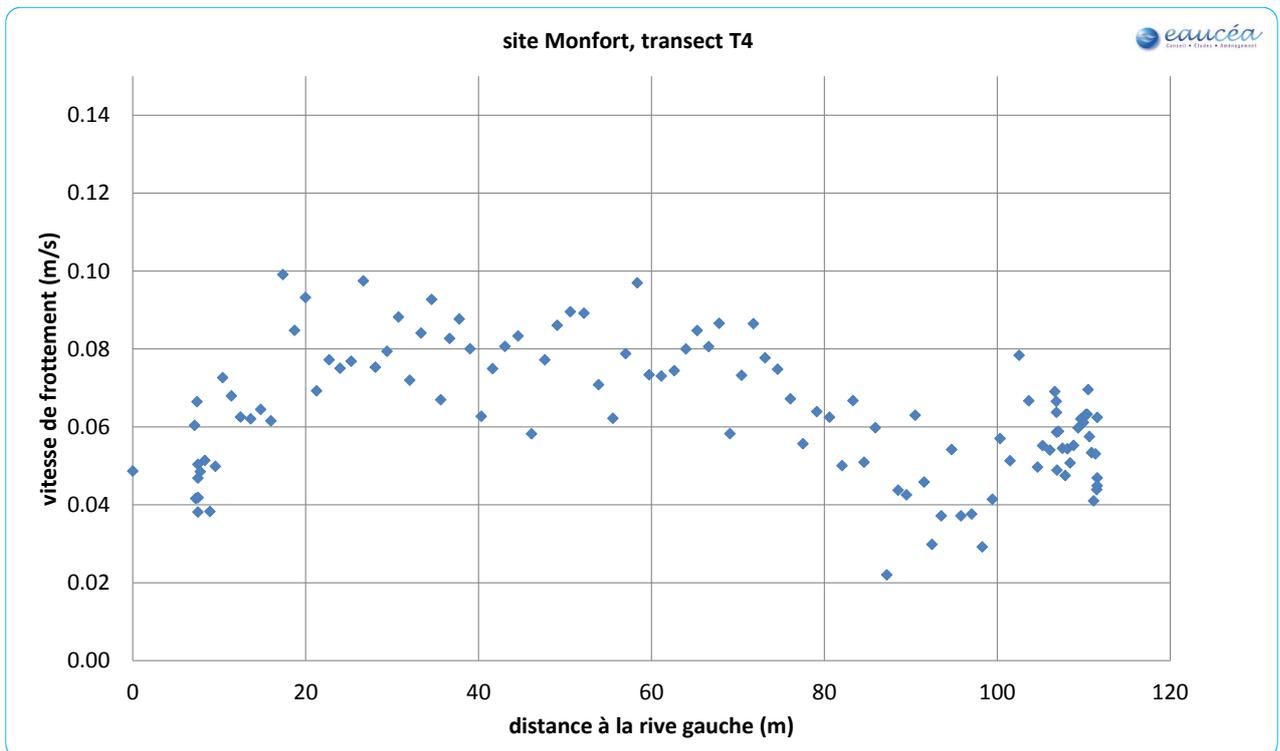


Figure 11-48 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T4

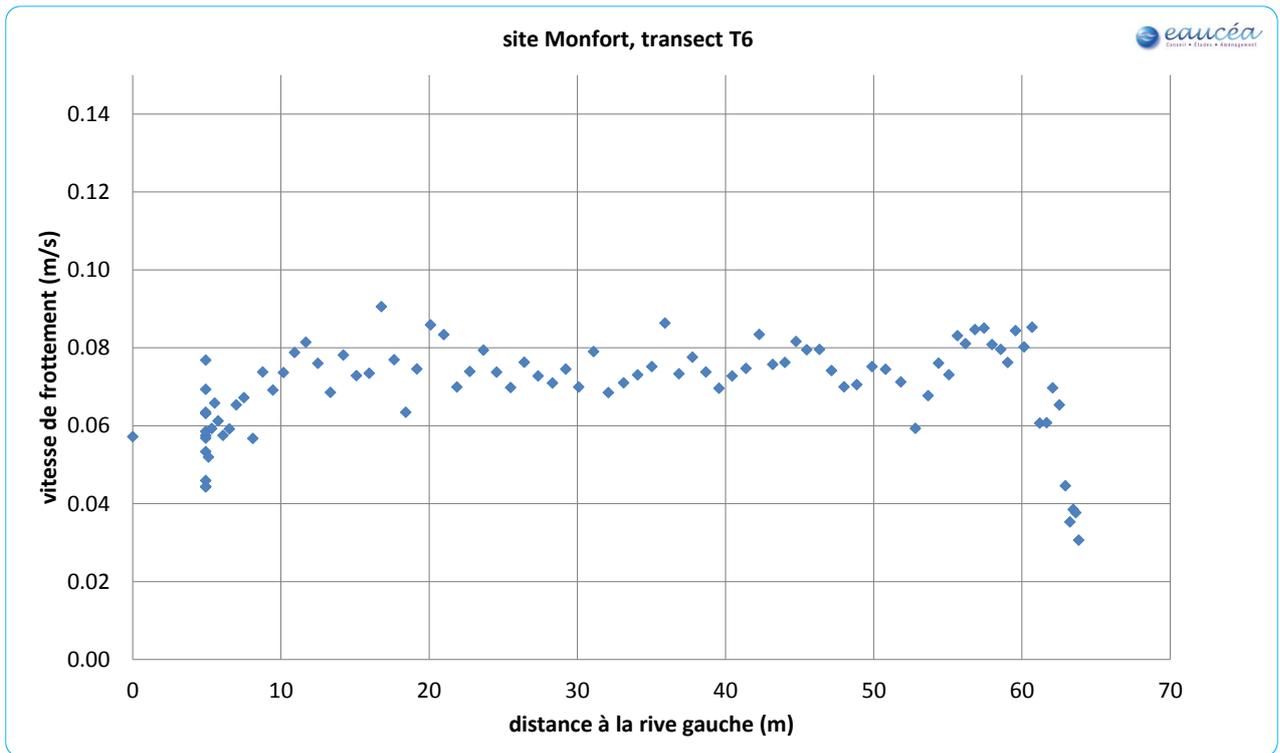


Figure 11-49 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T6

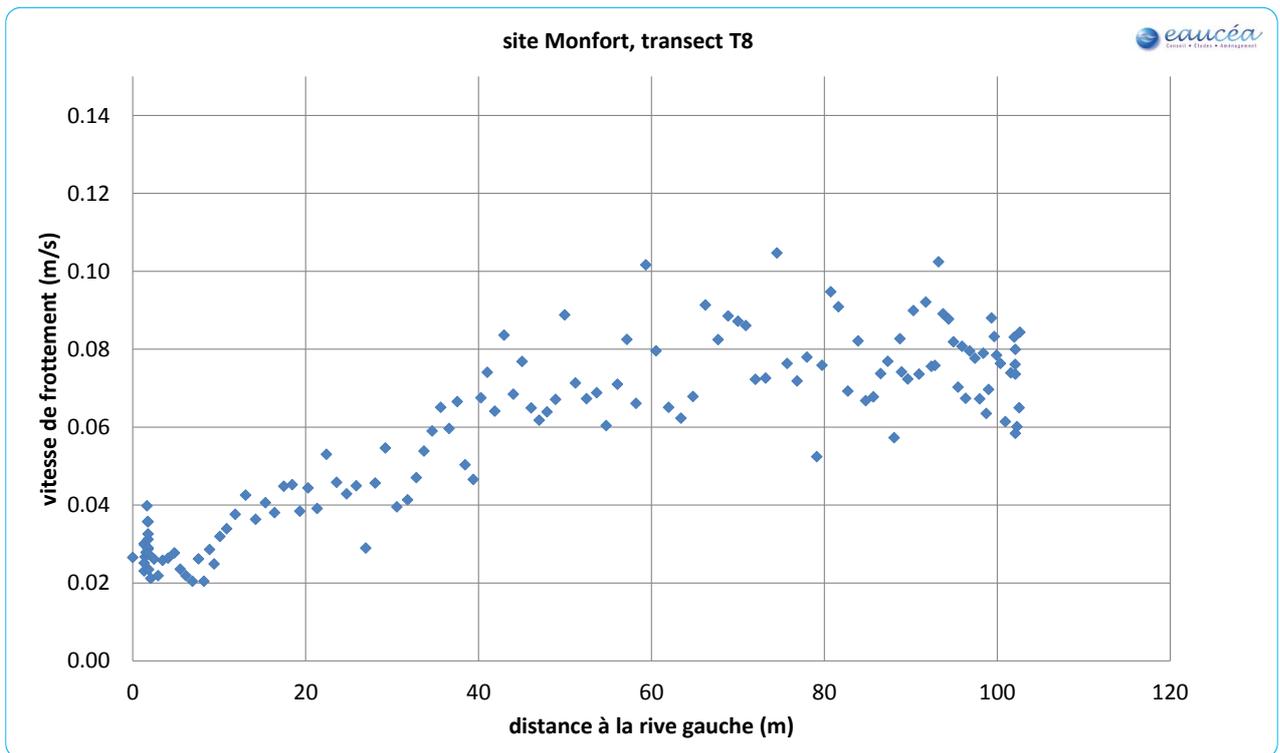


Figure 11-50 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T8

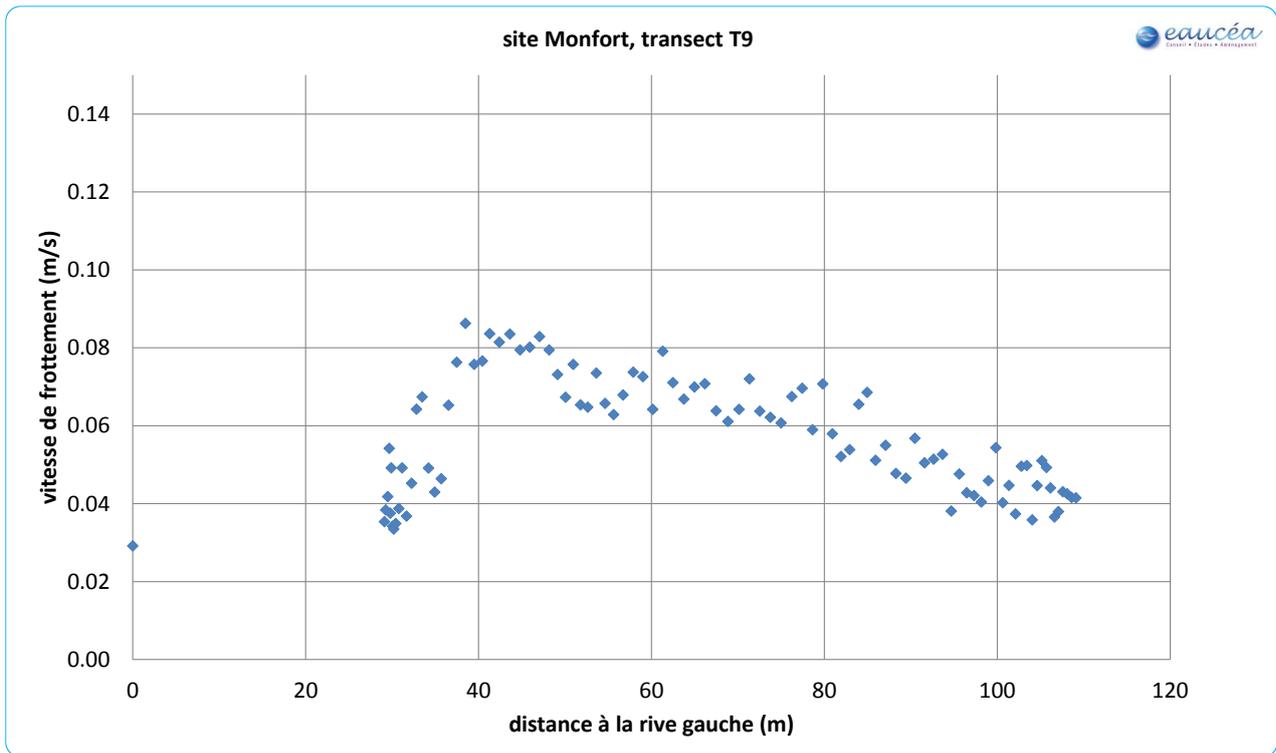


Figure 11-51 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T9

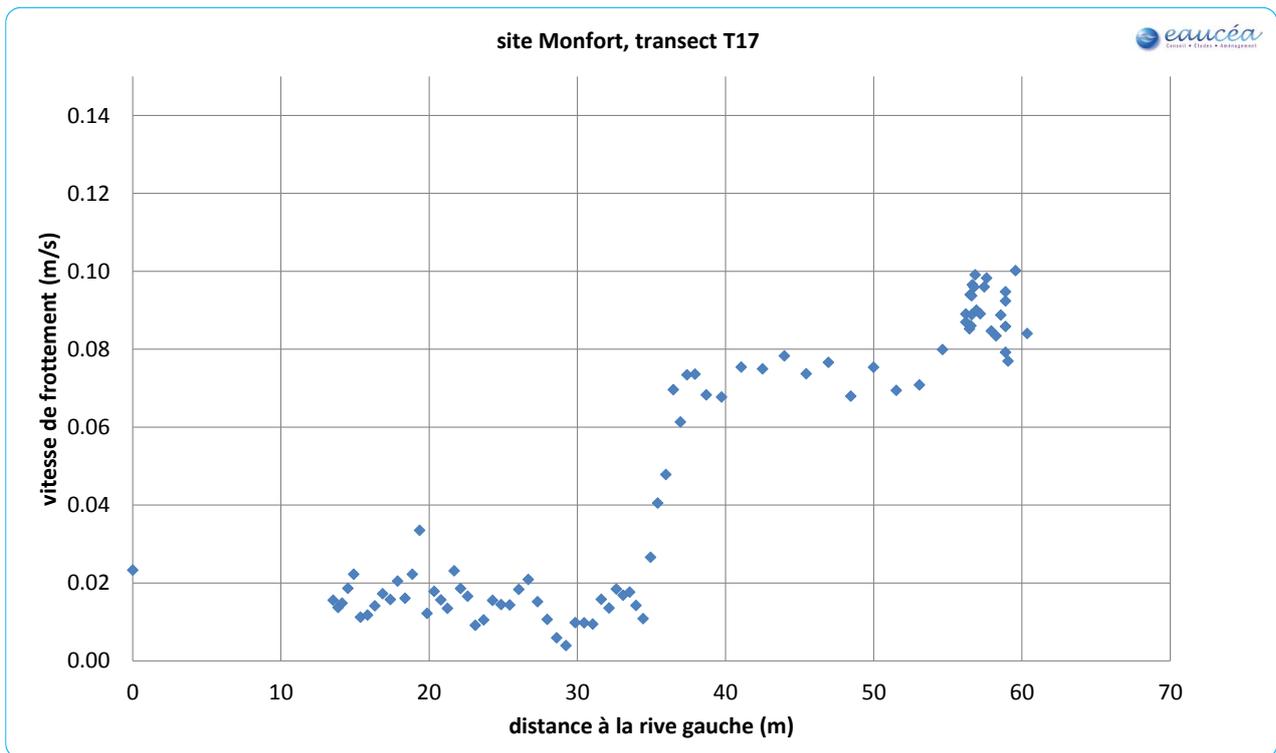


Figure 11-52 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T17

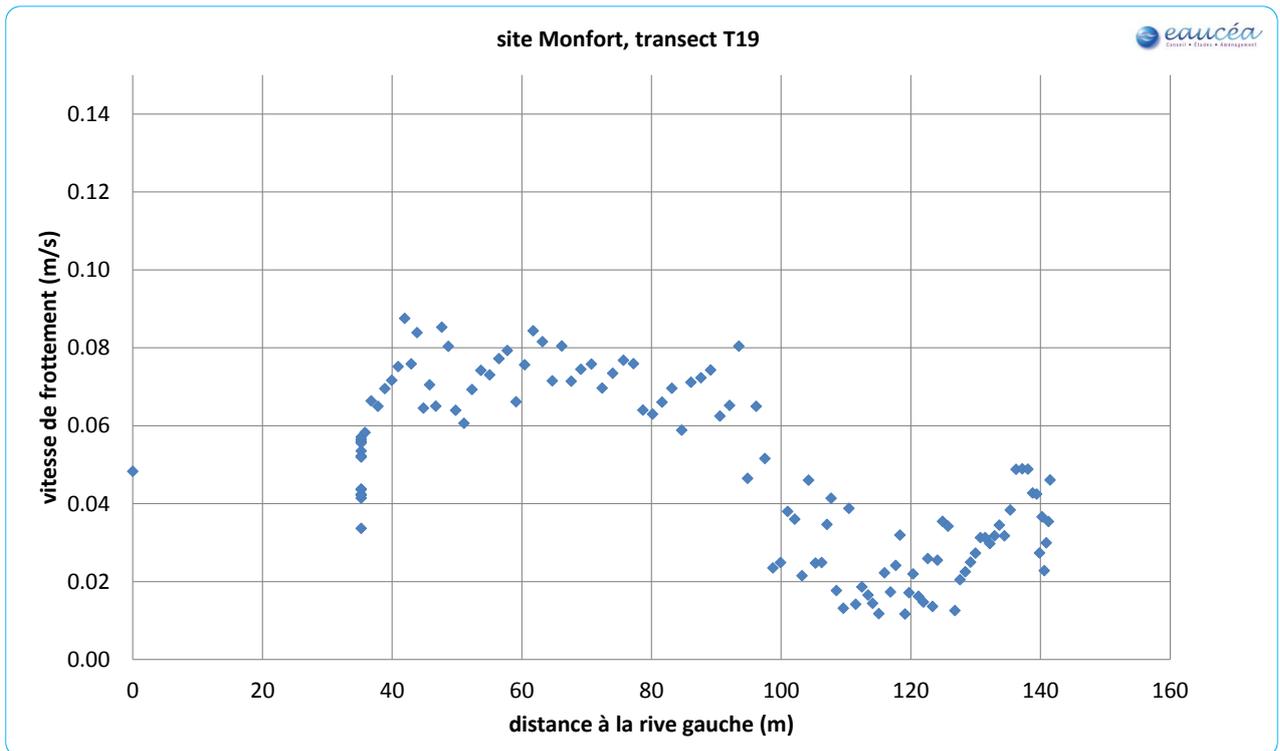


Figure 11-53 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T19

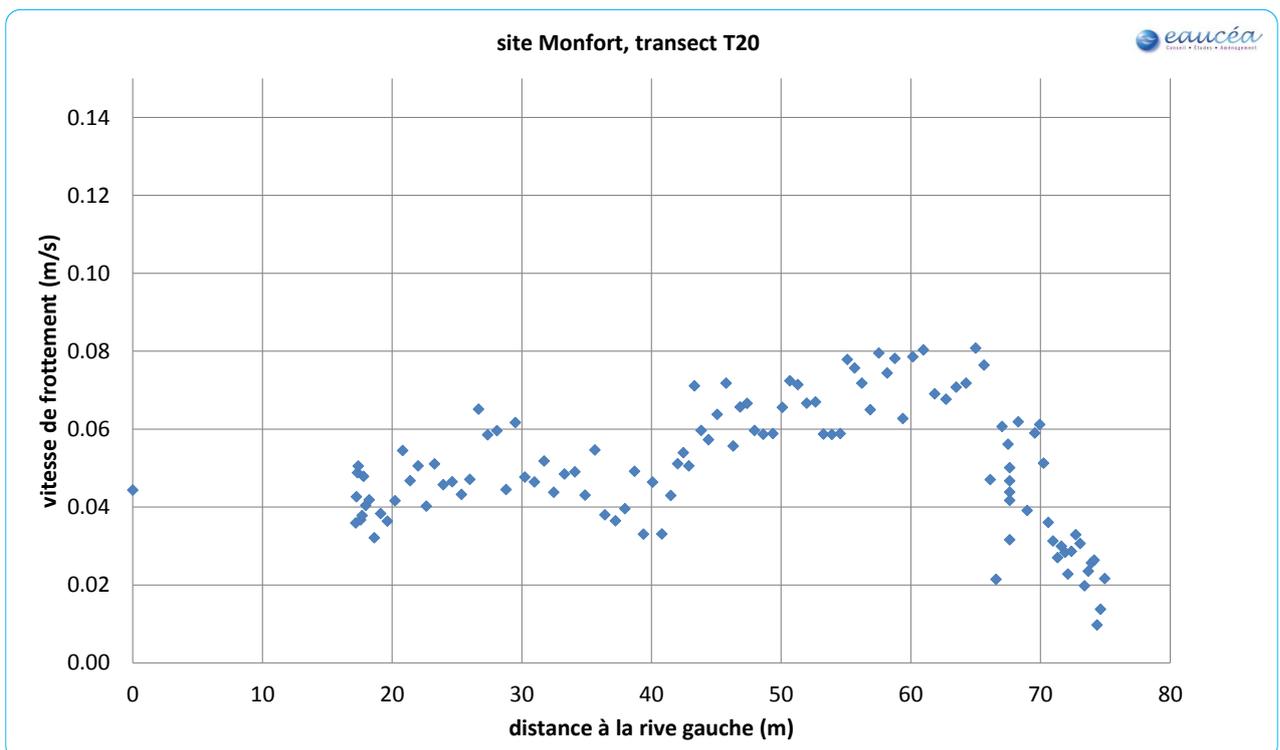


Figure 11-54 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T20

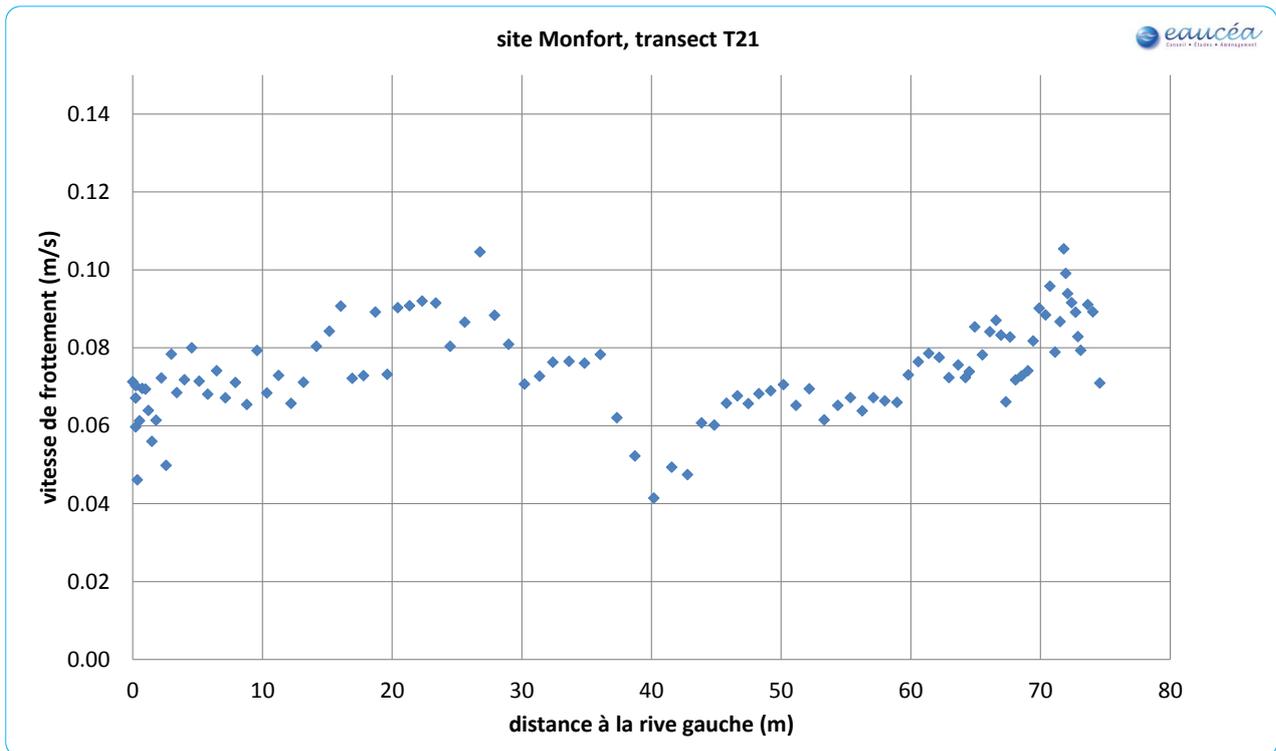


Figure 11-55 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T21

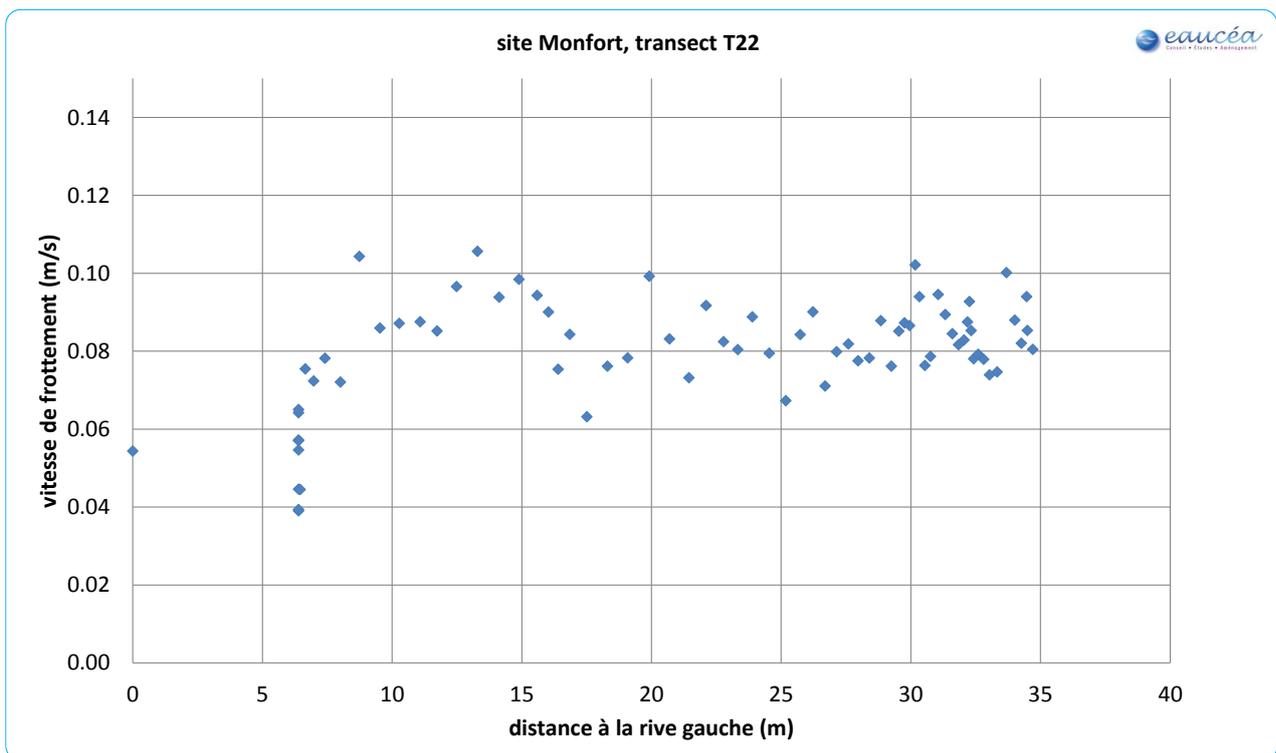


Figure 11-56 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T22

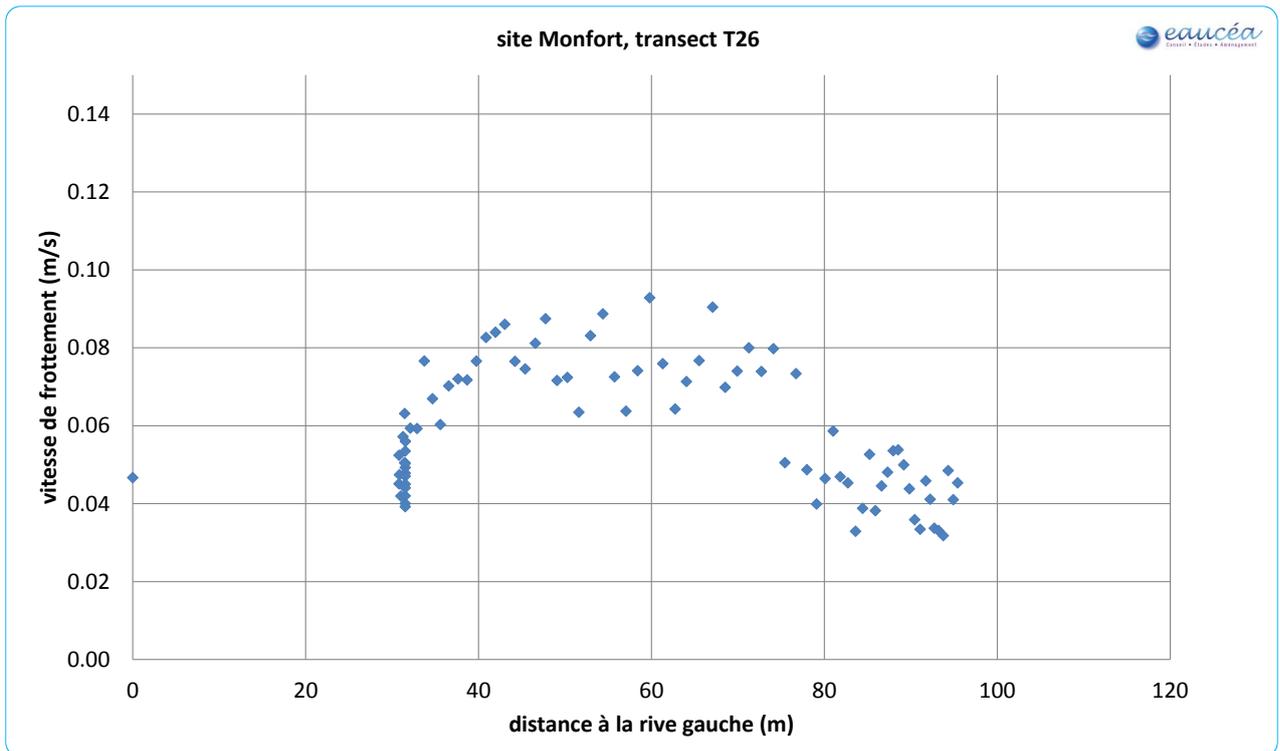


Figure 11-57 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T26

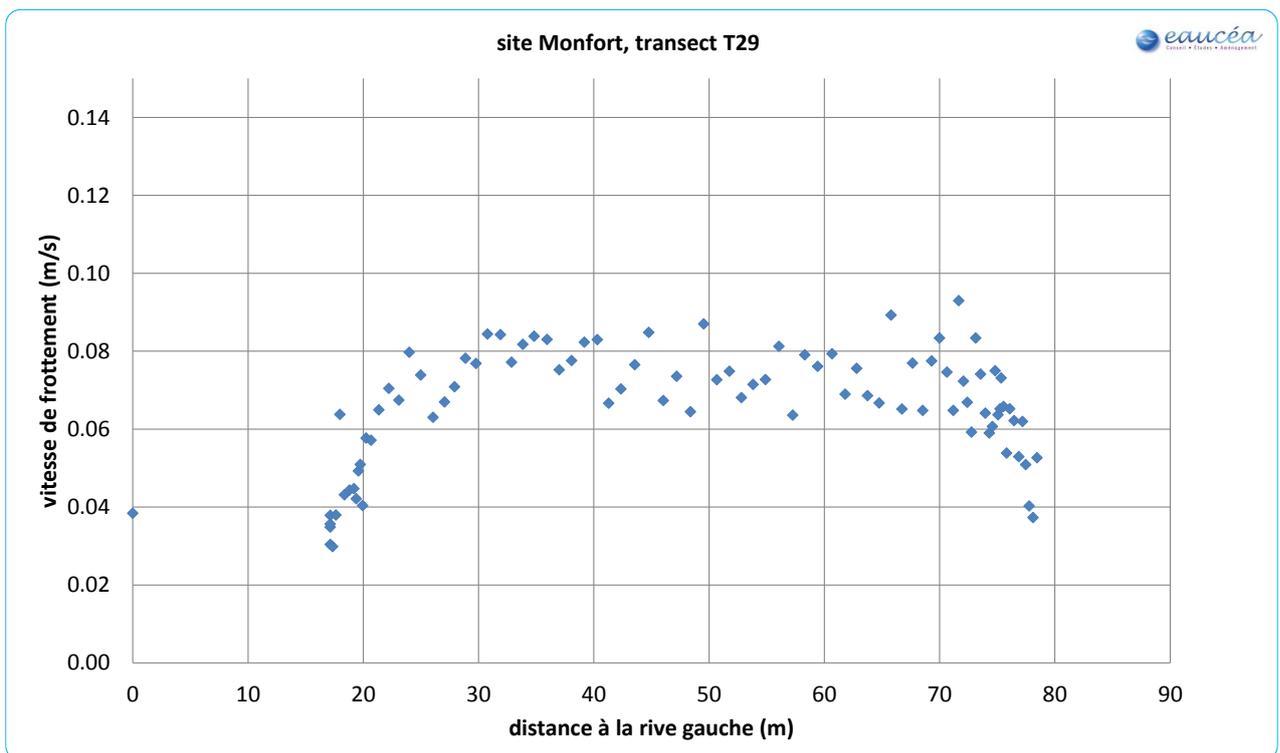


Figure 11-58 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T29

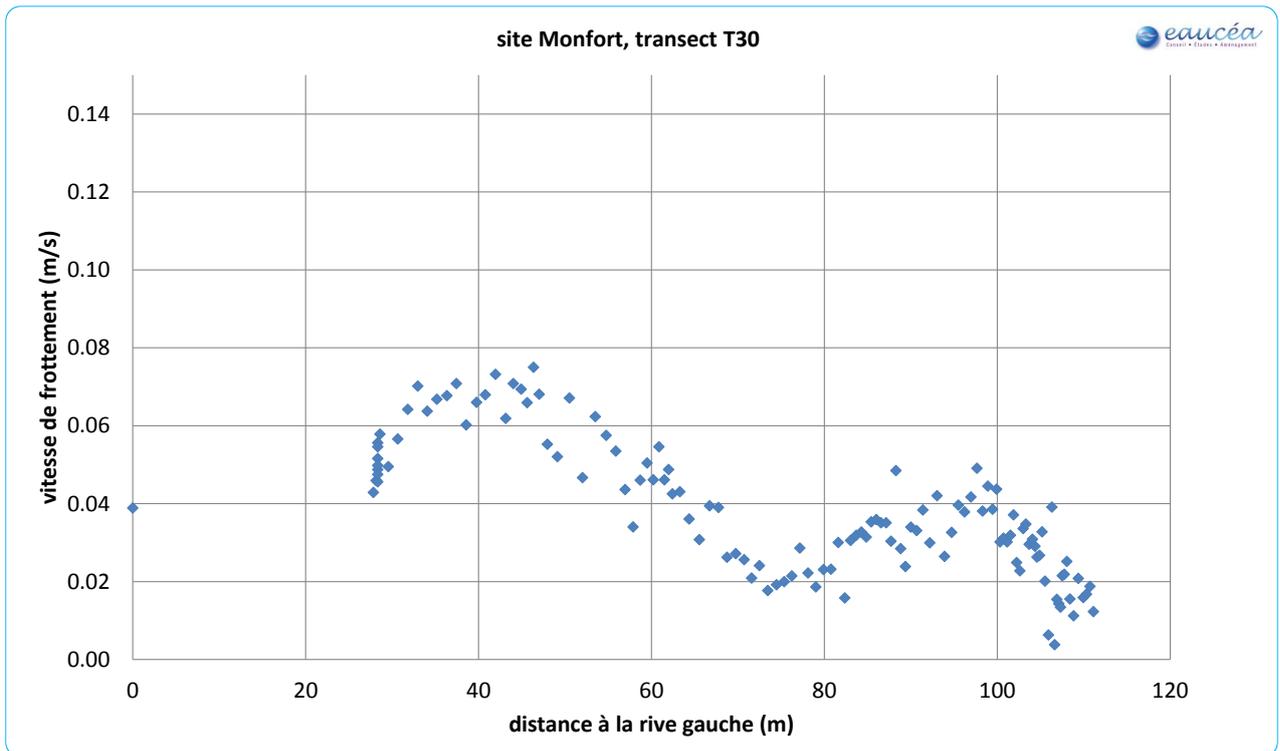


Figure 11-59 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T30

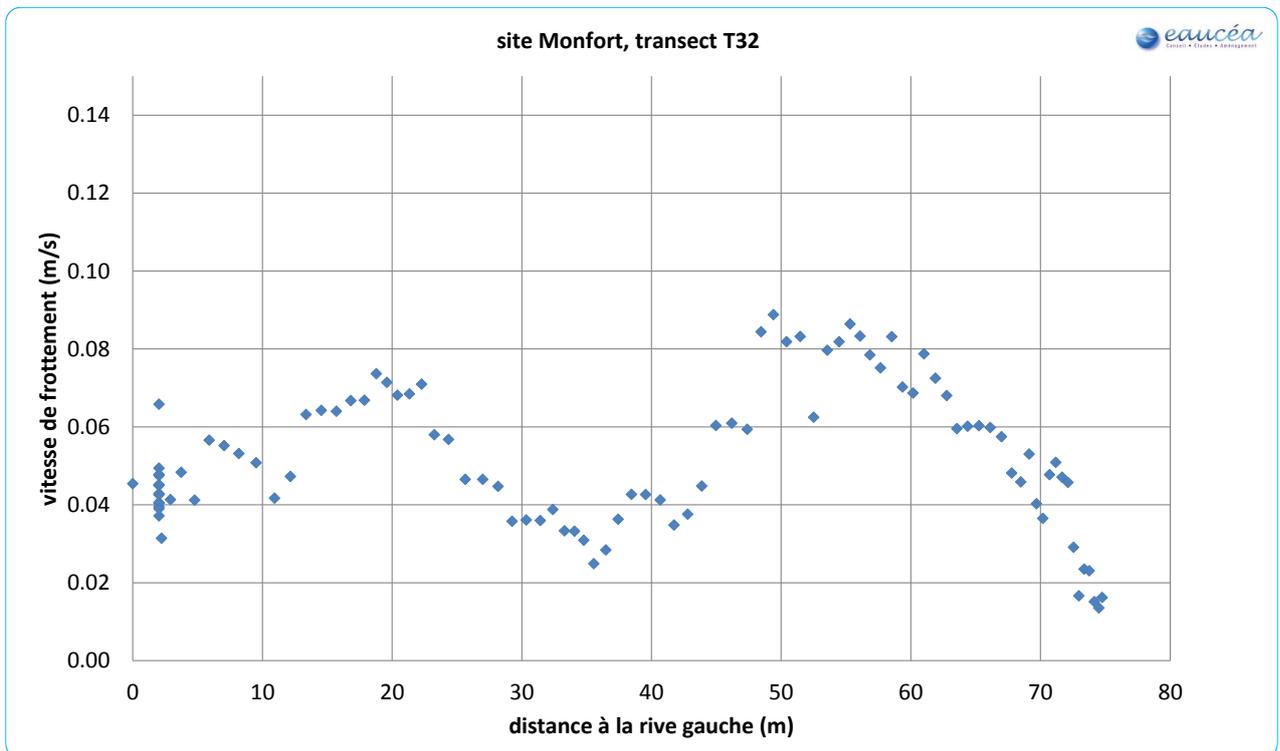


Figure 11-60 : Site de Montfort - Répartition latérale des vitesses de frottements sur profil T32