

La Loire des Ponts de Cé à Nantes Expertise hydro-sédimentaire

Phase 1

Analyse des évolutions morphologiques de la Loire et proposition de pistes d'intervention

Octobre 2009

Sommaire

Objet de l'expertise.....	4
Remarques préliminaires	5
1. La Loire des Ponts de Cé à Montjean.....	6
1.1. Description du site.....	6
1.2. Les transformations du lit au 20^{ème} siècle et leurs effets	6
1.2.1. Les travaux d'amélioration de la navigation	6
1.2.2. Evolution du lit de la Loire de 1900 à 1950	8
1.2.3. Les transformations du lit après 1950.....	9
1.2.4. Evolution du lit de la Loire de 1950 à 2007	10
1.2.5. Capacité des ouvrages pour l'étiage de référence	14
1.2.6. Analyse spatiale des profondeurs à débit donné.....	14
1.2.7. Synthèse.....	16
1.3. Examen de l'étude hydro-sédimentaire	17
1.4. Recommandations pour le remodelage des épis.....	21
1.4.1. Les objectifs.....	21
1.4.2. Les paramètres	21
1.4.3. Choix de la cote de première submersion des têtes d'épi.....	22
1.4.4. Choix de la largeur du bras navigable entre épis.....	22
1.4.5. Géométrie des épis.....	23
1.5. Remarques et suggestions sur les propositions de l'AVP.....	24
1.5.1. La Pointe – PK 7.000 à 9.500	24
1.5.2. Bras des Lombardières – PK 9.500 à 14.500	24
1.5.3. De la Possonnière à l'Alleud (PK 14.500 à 19.000).....	26
2. La Loire de Montjean à Ancenis.....	28
2.1. Description morphologique du site et des ouvrages de navigation.....	28
2.2. Evolution des niveaux de 1900 à 2007	29
2.2.1. Analyse de l'état 1900	29
2.2.2. Evolution du lit de la Loire de 1900 à 1950	29
2.2.3. Evolution du lit de 1950 à 2007.....	31
2.3. Analyse de l'expérimentation des épis à radier.....	33
2.3.1. Rappel des buts et principes de l'expérimentation	33
2.3.2. Réalisation des ouvrages	35
2.3.3. Evolution des niveaux de part et d'autre des épis à radier	37
2.3.4. Evolution des fonds : première analyse	42
2.3.5. Analyse d'octobre 2009.....	48
2.3.6. Bilan de l'expérimentation	53

3. Loire d'Ancenis à Nantes.....	56
3.1. Généralités	56
3.2. Description morphologique du site et des ouvrages de navigation.....	57
3.2.1. Ancenis à Oudon - km 58 à 65	57
3.2.2. Oudon à Mauves - km 65 à 75.....	57
3.2.3. Mauves à Bellevue – km 75 à 85.....	58
3.2.4. Bellevue à Trentemoult – km 85 à 94.....	59
3.3. Analyse de l'évolution des niveaux et des fonds.....	60
3.3.1. Méthodes d'étude	60
3.3.2. Evolution des niveaux de 1997 à 2007.....	61
3.3.3. Evolution des fonds de 1995 à 2007 à l'aval de Bellevue.....	63
3.3.4. Evolution des fonds de 1995 à 2006 entre Mauves et Bellevue.....	64
3.3.5. Synthèse des observations	66
3.4. Discussion des possibilités d'intervention.....	66
3.4.1. La recherche des objectifs et des fonctions	66
3.4.2. Analyse du fonctionnement des ouvrages de relèvement des niveaux.....	70

Objet de l'expertise

Depuis le début du 20^{ème} siècle, l'aménagement d'un chenal navigable au moyen d'épis et de chevrettes et les extractions massives de sables en Loire ont profondément modifié la morphologie du fleuve, principalement en incisant les fonds du bras navigable, mais aussi en atrophiant les bras non navigables. L'abaissement des niveaux d'étiage et moyens a provoqué l'assèchement des « boires » et des zones humides, éléments essentiels de l'écosystème fluvial.

Le Plan Interrégional Loire Grandeur Nature (PILGN 2000-2006) s'est donné pour objectif premier à l'amont de Nantes le relèvement de la ligne d'eau d'étiage, en prévoyant plusieurs opérations importantes :

- L'opération expérimentale dite des seuils d'Ingrandes-le Fresne a été mise en œuvre en 2003, avec la construction de deux seuils noyés, que nous avons appelés « épis à radier » offrant chacun une dénivelée de 0.25 m en eaux basses et moyennes. Cet aménagement fait aujourd'hui l'objet de critiques et controverses, principalement liées à son aspect et à la gêne occasionnée pour la navigation.
- Une autre opération expérimentale prévoit le remodelage des épis entre la Pointe et Chalonnes/Loire afin de libérer les sables déposés entre épis pour relever le lit et les niveaux d'étiage, tout en redonnant plus de latitude au fleuve. Cette opération a pris du retard. Elle a été reportée dans le plan « PILGN 2007-2013 » et devrait être engagée à partir de 2009.
- La mise en place de seuils a été également envisagée pour un relèvement des étiages entre Ancenis et Nantes sur la section appelée « bassin de marée ». Ce projet fait débat auprès des acteurs locaux et il n'a pas été possible de trouver une configuration des seuils qui permette à la fois la transparence migratoire et un relèvement significatif des niveaux d'étiage.
- La réalimentation en eau des annexes hydrauliques a pour but de restaurer leurs fonctions hydro-sédimentaires et biologiques.

Le plan actuel (PILGN 2007-2013) a retenu les actions suivantes :

- L'engagement effectif du programme expérimental de remodelage des épis.
- L'engagement d'actions de restauration des annexes hydrauliques.
- La conduite en étroite liaison avec les acteurs locaux d'une démarche de redéfinition des objectifs notamment en ce qui concerne le relèvement des étiages dans le lit mineur afin d'identifier des moyens d'action adaptés et recevables.

Le GIP Loire Estuaire a été chargé d'organiser un travail de concertation sur la définition des objectifs et des moyens. Pour mener à bien cette mission, il a mis en place un groupe de travail technique d'usagers et d'acteurs locaux animé par une compétence externe.

En soutien à cette animation, il nous a demandé une expertise spécifique sur les questions hydro-sédimentaires et morphologiques et une mission d'assistance à Maîtrise d'Ouvrage portant sur la définition des études préalables et des études d'ingénierie nécessaires.

Le présent rapport d'expertise a pour but d'éclairer les discussions du groupe de travail mis en place pour la redéfinition des objectifs. Il comporte quatre chapitres :

- La 1^{er} chapitre décrit le tronçon fluvial des Ponts de Cé à Montjean, les transformations apportées au lit et leurs effets. Puis il s'attache à discuter l'effet des ouvrages de navigation et formule un avis sur le programme expérimental de remodelage des épis.
- Le 2^{ème} chapitre fait de même dans la partie aval de la section fluviale de Montjean à l'aval de Saint Florent ; en particulier il discute les résultats de l'expérience des épis à radier du Fresne.
- Le 3^{ème} chapitre est consacré au tronçon Ancenis–Nantes et analyse les différentes possibilités d'intervention dans le bassin de marée.

Trois annexes complètent ce dossier :

- L'annexe 1 définit les coordonnées Lambert des sommets de cette polygonale
- L'annexe 2 analyse la granulométrie et le transport solide des sédiments de Loire.
- L'annexe 3 présente la formule de transport solide que nous avons utilisée.

Remarques préliminaires

A- Abscisses kilométriques

Pour faciliter le repérage des points et sections de Loire décrits dans ce rapport, nous avons déterminé les coordonnées Lambert d'une polygonale formée de segments d'une longueur de 500 mètres et implantés suivant l'axe du bras navigable. Il nous est apparu en effet que les distances suivant les repérages existants présentaient des écarts notables avec la réalité.

L'origine des abscisses a été fixée dans l'axe du pont des Ponts de Cé. Les abscisses ainsi définies seront accompagnées du sigle km.

B- Régime des débits

Le régime des débits de la Loire n'a pas fait ici l'objet de nouvelles investigations. Nous nous bornerons à rappeler dans le tableau ci dessous les valeurs caractéristiques du régime des débits de la Loire à Montjean figurant dans une de nos précédentes études ¹:

Tableau 1 : débits classés de la Loire à Montjean

Durée de non dépassement	10 jours	30 jours	3 mois	6 mois	9 mois	11 mois
Débit (m ³ /s)	120	165	292	575	1150	2080

C- Références

Les références des études, articles et rapports antérieurs utilisés sont citées en note de bas de page.

Chapitre 1

¹ . Direction Régionale de l'Environnement Centre – Basse Loire à Ingrandes – Relèvement des lignes d'eau d'étiage – Expertise hydraulique – P. Lefort – Juin 1997

1. La Loire des Ponts de Cé à Montjean

1.1. Description du site

Depuis le confluent avec la Maine à la Pointe jusqu'à Montjean, on peut identifier quatre tronçons de la Loire différents par leur morphologie :

- Sur une longueur de 2500 m, le tronçon de la Pointe présente un bras unique rectiligne dans lequel les épis artificiels et les dépôts sableux intercalaires ont dessiné à l'étiage un chenal sinueux pour la navigation.
- Autour du socle rocheux de la chapelle de Béhuard, la Loire se sépare en deux bras sur 3 km : sur cette distance, l'île de Béhuard est formée par le bras étroit de la Guillemette, en général profond quoique localement rocheux, et le bras des Lombardières, naturellement large et peu profond, qui dessine un large arc de cercle autour de l'île. Alors que, dans le passé, le bras de la Guillemette était le bras navigable, en raison de sa profondeur et malgré son étroitesse et ses écueils, il est aujourd'hui partiellement fermé par une « chevrette » et c'est le bras des Lombardières, aménagé en 1986, qui assure maintenant la navigation, essentiellement pour la plaisance et le tourisme. Le bras des Lombardières reçoit en son milieu une fraction du débit du Louet.
- A l'île de Béhuard succède à nouveau sur 4200 m un bras rectiligne et large dans lequel les épis dessinent un chenal modérément sinueux.
- Le quatrième tronçon recouvre en son entier l'île de Chalennes : elle offre jusqu'à Montjean une longueur de 10.5 km et atteint localement une largeur de 1200 m. Le bras navigable, dont l'alimentation est un peu renforcée des débits du Louet et du Layon, est ici le bras sud, collé à la terrasse qui le domine de 30 à 40 m. Le bras nord, sauvage, est fermé à son amont par une longue chevrette aujourd'hui partiellement dégradée appelée chevrette de l'Alleud; il est peu alimenté en étiage et a formé de nombreuses îles.

Les transformations du lit au 20^{ème} siècle et leurs effets

1.2.1. Les travaux d'amélioration de la navigation ²

Le tronçon la Pointe-Montjean a fait l'objet de la 1^{ère} tranche expérimentale des travaux d'amélioration de la navigation, réalisée entre la confluence de la Maine et Nantes ³. Cette première tranche a été engagée en 1906 de la Pointe à Chalennes et prolongée ensuite jusqu'à Montjean avant la 1^{ère} guerre mondiale. Les travaux en aval de Montjean n'ont été entrepris qu'après cette guerre.

² Rapport «Relèvement de la ligne d'eau d'étiage de la Loire entre Nantes et Bouchemaine – avant projet – BCEOM, ANTEA, DHI – Décembre 2003

³ Article Kaufmann – Annales des Ponts et Chaussées ? – Date à préciser

Le but affiché était bien évidemment l'amélioration du tirant d'eau en basses eaux. De ce fait le calage en altitude des aménagements a été réalisé en considérant un étiage de référence, constitué par la ligne d'eau observée en Loire pour la cote zéro à l'échelle de Montjean, ce qui correspondait alors à un débit de 130 m³/s. Cette ligne de référence est à la base du calage altimétrique de tous les ouvrages construits en Loire au début du siècle et même assez récemment.

Pour obtenir sa définition, nous avons admis que cet étiage de référence pouvait être dessiné à partir des cotes aux échelles au débit de 130 m³/s reconstituées par le SHC dans une monographie de 1979. Il serait souhaitable que ce choix soit confronté aux données dont dispose VNF.

Le tableau suivant donne aux échelles de Loire de la Pointe à Montjean, les niveaux de l'étiage de référence (IGN 69) que nous avons admis à partir des données de l'étude SHC⁴. D'autre part nous avons trouvé un étiage de référence daté de 1898 et rattaché au nivellement Bourdaloue et lui avons appliqué une correction de 0.63 m pour obtenir les cotes IGN 69. Les valeurs obtenues sont voisines de celles obtenues à partir de l'étude SHC, soit - 11 cm à +8 cm.

Tableau 2 : étiage de référence 1900 aux échelles de la Pointe à Montjean

Lieu	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
Abscisse KM (km)	7.450	14.756	21.440	30.210
Zéro échelle	13.63	12.60	11.38	9.57
Cote échelle	0.06	-0.23	-0.24	0
Etiage référence SHC	13.69	12.37	11.14	9.57
Pente aval * 1000	0.181	0.184	0.179	-
Etiage référence (plan 1898)	13.61	12.28	11.17	9.65

On retiendra que la pente de l'étiage de référence était entre les quatre stations quasi constante et égale à 0.18 /1000.

L'aménagement type de la décennie 1900 comporte d'abord la concentration dans un bras unique de Loire de la quasi totalité du débit d'étiage en fermant par des chevrettes, seuils calés à 0.60 m au dessus de l'étiage, les bras autres que celui choisi pour la navigation.

Le bras choisi pour assurer la navigation a été rétréci et « chenalisé » : ce terme, souvent utilisé avec une connotation négative ces dernières années pour caractériser indistinctement n'importe quelle intervention humaine en rivière, est ici tout à fait convenable. La largeur de l'écoulement d'étiage est dans le bras navigable légèrement sinueux partout limitée à un maximum de 120 à 150 mètres. La largeur de 150 m est prévue dans les courbes et la largeur de 120 m aux points d'inflexion. Pour cela, les rives du chenal sinueux sont confinées entre deux sortes d'ouvrages :

- Dans les concavités, la rive est fixée par une digue submersible continue et calée à la cote +0.60 ; des merlons ou traverses en enrochements empêchent le contournement de la digue tout en favorisant l'ensablement des terrains.
- Dans les inflexions et les convexités, le chenal est délimité par des épis calés à la cote zéro Montjean en bordure du chenal et ancrés à la rive en retrait à une cote voisine de +1.00 : entre ces épis est également prévu un ensablement par suite du ralentissement des vitesses.

D'après Kaufmann, les dragages ont comporté l'établissement dans la traversée des hauts fonds d'un chenal pilote creusé à 1.50 m sous l'étiage de référence, avec une largeur à la

⁴ Service Hydrologique Centralisateur du bassin de la Loire – Abaissement du lit de la Loire du confluent de la Vienne à Ancenis – Février 1979.

base de 30 m et des talus de fruit 5/1. Les matériaux de curage semblent avoir été régalez entre les épis.

Dans la section la Pointe-Montjean, nous avons dit que deux tronçons ne comportent qu'un seul bras, si l'on fait abstraction du Louet : le tronçon entre la Pointe et le bras de la Guillemette et celui entre la Possonnière et l'Alleud ; dans ces deux tronçons, le nombre et la longueur des ouvrages sont très importants et coûteux.

Dans les deux tronçons à bras multiples, il a été possible de limiter l'importance des ouvrages de chenalisation, voire de les supprimer. Pour ce faire, le Maître d'ouvrage a choisi d'utiliser comme bras navigables :

- le bras rive droite à l'île de Béhuard (bras de la Guillemette).
- le bras rive gauche au sud de l'île de Chalennes.

Pour alimenter le bras sud en étiage, la chevette de l'Alleud a fermé l'entrée du bras de St Georges, à la cote 0.60 m au dessus de l'étiage de Montjean.

1.2.2. Evolution du lit de la Loire de 1900 à 1950

L'étude SHC 1979 déjà citée permet de déterminer quelle a été la variation des niveaux aux échelles de Loire entre 1900 et 1950 : elle est basée d'une part sur le suivi des jaugeages à Montjean à ces dates, et d'autre part sur la corrélation des hauteurs aux différentes échelles avec les débits jaugés à Montjean.

Tableau 3 : variation des niveaux aux échelles de la Pointe à St Florent

Lieu	La Pointe	Possonnière	Chalennes	Montjean
Débit 150 m ³ /s	-0.44	-0.40	-0.28	-0.46
Débit 250 m ³ /s	-0.26	-0.18	-0.10	-0.22
Débit 400 m ³ /s	-0.18	-0.02	+0.04	0
Débit 800 m ³ /s	+0.02	+0.11	+0.11	+0.15

Les valeurs jusqu'à 400 m³/s représentent un bon ordre de grandeur de la variation. Les valeurs à 800 m³/s sont moins sûres, car elles procèdent d'une extrapolation graphique un peu hasardeuse; la surélévation des niveaux à Montjean à 800 m³/s n'est en effet pas confirmée par la comparaison des jaugeages aux fortes crues.

Le moindre abaissement du niveau des basses eaux à Chalennes trouve son explication par l'accroissement du débit dans ce bras, accroissement dû à la construction de la digue de l'Alleud.

Il y a donc eu après travaux un abaissement général des fonds du bras navigable, avec un transfert des matériaux du lit d'étiage vers les plages d'atterrissement entre épis. En raison du rétrécissement du lit d'étiage, l'abaissement des fonds a été supérieur à l'abaissement des niveaux et donc supérieur à 0.45 m.

Dans la section La Pointe-Montjean, l'aménagement de navigation ne semble donc pas avoir perturbé l'équilibre global antérieur; ceci ne veut pas dire qu'il n'a pas modifié le transit sédimentaire, mais seulement que ce transit n'a pas été modifié de façon différente d'un point à l'autre de l'aménagement.

L'abaissement du lit d'étiage a eu pour conséquence une augmentation du débit écoulé sous l'étiage de référence antérieur de 130 m³/s et donc avant tout débordement sur les épis :

Tableau 4

Lieu	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
Etiage référence	13.69	12.37	11.14	9.57
Capacité (m3/s)	218	200	192	210

Un calcul élémentaire permet d'apprécier une valeur par défaut de l'approfondissement moyen du chenal navigable entre épis en 1900. Nous le faisons avec la formule de l'écoulement uniforme, pour les deux largeurs maximum de 150 m et minimum de 120 m, en admettant la pente de 0.18 /1000 et un coefficient de Strickler de 40.

Ne connaissant pas la largeur antérieure, nous admettrons qu'elle n'a pas été changée alors qu'il est évident qu'elle a été diminuée par la chenalisation.

Nous obtenons les hauteurs suivantes :

Largeur (m)	120	150
Capacité avant chenalisation à l'étiage de référence (m3/s)	130	130
Hauteur d'eau moyenne avant chenalisation (m)	1.52	1.33
Capacité après chenalisation (m3/s)	200	200
Hauteur d'eau moyenne après chenalisation (m)	1.97	1.73

On retrouve un approfondissement minimum de 0.40 m à 0.45 m, auquel il convient d'ajouter l'effet non pris en compte du rétrécissement. Cette estimation ne concerne évidemment que les tronçons à bras unique, car nous ignorons quelle était avant la chenalisation la distribution du débit dans les tronçons à deux bras.

Cette analyse nous fait penser que l'opération de remodelage des épis aura sur les niveaux d'eau en étiage un effet de signe contraire et au plus égal à l'abaissement du niveau constaté de 1900 à 1950.

1.2.3. Les transformations du lit après 1950

Les extractions

Les extractions de matériaux conduites après la 2^{ème} guerre mondiale et essentiellement après 1950 vont modifier les niveaux bien davantage que ne l'avaient fait les ouvrages de navigation.

Nous ne disposons pas sur la section la Pointe-Montjean de données chiffrées sur les extractions avant 1980. La mission d'Inspection de J.L. Dambre au titre de la Navigation et de P. Malaval au titre de l'Environnement a dressé un bilan quantifié des prélèvements effectués de 1981 à 1992 entre Nantes et Ancenis : au cours de ces 12 années 7 600 000 tonnes ont été extraites entre La Maine et Montjean, soit pour une densité en place de 1.7 environ 4.5 millions de m³ de matériaux. ⁵ La moitié de ce volume proviendrait de l'extraction effectuée dans le bras de St Georges.

Deux opérations effectuées au cours de cette période semblent incluses dans le bilan ci dessus :

- le curage de 600 000 tonnes de sable dans le bras des Lombardières lors du basculement en 1986 ou 1987 du chenal navigable dans ce bras décrit ci après.
- l'extraction de 180 000 tonnes de sable pour le renforcement de la levée de St Georges.

Le groupement d'entreprises ayant mis en œuvre l'extraction du bras de St Georges a fait réaliser par une équipe pluridisciplinaire coordonnée par F.Ottman, professeur émérite à

⁵ Evaluation des conditions de poursuite de la politique de limitation des extractions de matériaux dans le lit de la Loire du Bec d'Allier à Nantes – J.L. Dambre et P. Malaval – Juillet 1993.

l'Université de Nantes, une analyse des conséquences sur le milieu de 10 ans d'extraction sablière dans le bras de St Georges. ⁶ Nous en extrayons les principales conclusions.

- La présentation souligne à juste titre l'importance de la digue de l'Alleud, mais estime à 1200 m³/s le début de débordement sur cette digue, alors que nous l'estimerons ci après à 600 m³/s.
- Plusieurs ouvrages ont été imposés aux sabliers, notamment des renforcements de protection de berges par enrochements, mais surtout la reconstruction d'un épi aval « destiné à protéger le pont de Montjean des pressions de l'eau qui venant de l'amont devait s'engouffrer dans la fosse d'exploitation et mettre en péril la stabilité du pont ». Une ouverture en rive sud de largeur 50 m permettait le passage des péniches sablières et des dragues.
- La construction d'un « vaste ouvrage en fer à cheval destiné à limiter l'érosion régressive qui aurait pu naître à partir de la marche d'escalier en bout d'exploitation... » était prévue en limite amont (à 5km) de la zone d'extraction autorisée. L'auteur ajoute : «L'extraction ayant été limitée en amont, ces travaux inutiles n'ont pas été exécutés, évitant ainsi de nouveaux enrochements nuisibles à l'environnement ». Cette phrase, parmi d'autres, critiquant au nom de la défense de l'environnement des ouvrages ayant pour objet la correction des nuisances provoquées par l'extraction donne à cette étude la tonalité d'un plaidoyer pro domo et donc peu objectif .
- Le bilan d'exploitation s'établit selon cette étude à 2 674 000 tonnes en 1991 et doit donc en 1992 dépasser les 3 millions de tonnes, soit 1 800 000 m³. Cette exploitation a été concentrée dans une fosse profonde, immédiatement en amont de l'épi aval restauré. Nous ne disposons malheureusement d'aucune bathymétrie récente dans ce bras : il semble néanmoins d'après les photos aériennes que le comblement de cette fosse était (d'après Google Earth) quasi total en 2002, des bancs de sable y apparaissant sur une grande partie de la surface du bassin.

Le basculement du bras navigable dans le bras des Lombardières

Outre le curage déjà cité, cette opération a comporté :

- L'ouverture des chevrettes fermant l'accès au bras des Lombardières et la fermeture partielle du bras de la Guillemette.
- La réalisation d'un chenal et d'épis limitant la largeur localement à 120 m. Par suite de l'abaissement des fonds les épis ont été calés à 0.50 m au dessous de l'étiage théorique de 1900, selon les informations orales recueillies en 2001.

1.2.4. Evolution du lit de la Loire de 1950 à 2007

A l'aide des études effectuées par le SHC, nous avons décrit ci dessus l'évolution des niveaux d'eau de 1900 à 1950, en considérant qu'elle était liée principalement à l'impact des ouvrages de navigation. Mais depuis 1950 ce sont les extractions qui ont provoqué une diminution du stock alluvionnaire et conduit aux abaissements constatés. Nous avons prolongé l'analyse en rapportant les cotes observées aux échelles de la Pointe, la Possonnière, Chalonnnes et Montjean aux débits à Montjean le même jour. Cette méthode conduit à une certaine dispersion, les échelles amont présentant des débits sous estimés à la crue et surestimés à la décrue. Les points correspondant à des variations trop rapides ont pour cette raison été éliminés de la corrélation. Pour l'étude des variations, nous avons choisi des échantillons de mesure aux dates suivantes :

⁶ Sabliers Angevins Réunis -

Années 1966, 1976 et février 1977, 1982, 1988-1990, 1995-1996, 2000, 2006-2007

Les graphiques de cette synthèse sont reportés en fin de rapport ; les résultats, synthétisés dans le tableau de la page suivante, appellent les commentaires suivants :

De 1950 à 1982

C'est à la Pointe que l'abaissement est le plus important, probablement en raison d'extractions locales sur ce site très proche de la ville d'Angers. L'abaissement était croissant avec le débit. Il en était de même pour la pente.

L'abaissement est resté modéré à la Possonnière et Chalennes ; il décroissait avec le débit : on retiendra un abaissement moyen de l'ordre du mètre à 150 m³/s et de 0.50 m à 800 m³/s. Ces chiffres montrent une érosion du seul lit d'étiage entre épis.

A Montjean l'abaissement entre 1950 et 1982 décroît de 1.0 m en basses eaux à 0.80 m à 800 m³/s, mais seulement 0.40 m à 1500 m³/s. La méconnaissance des implantations des extractions et des quantités extraites ne permet pas d'avancer une explication des écarts constatés entre les différentes échelles.

La consultation des graphiques permet de compléter l'observation : on remarque que de 1950 à 1966 l'abaissement est faible à la Possonnière, Chalennes et Montjean et fort à la Pointe.

De 1982 à 1996

Les niveaux à la Pointe baissent à 150 m³/s mais s'élèvent à 800 m³/s ; les pentes entre la Pointe et La Possonnière, qui étaient en 1982 aux différents débits comprises entre 0.10 et 0.17/1000, sont en 1982 remontées entre 0.13 et 0.18/1000. On notera qu'il se peut que la position de l'échelle de la Pointe par rapport aux épis conduise en basses eaux à des écarts entre le niveau du fleuve et le niveau à l'échelle.

La remontée des niveaux au dessus de 500 m³/s peut difficilement s'expliquer par le basculement du bras navigable de la Guillemette aux Lombardières. L'ouverture du bras des Lombardières et les curages qui l'ont accompagnée conduiraient plutôt à un abaissement en étiage. La fermeture de l'entrée du bras de la Guillemette aurait dû surélever les niveaux d'étiage, mais n'a guère influencé les niveaux aux débits plus forts. Il manque ici un calcul d'écoulement maillé qui permettrait de comprendre le rôle de chaque aménagement; les mailles du calcul sur le modèle DHI sont trop lâches pour apporter une réponse à notre interrogation.

Mais il semble que l'arrêt des extractions à la Pointe a permis le dépôt de sable puis un transit que les pentes antérieures à 1982 ne permettaient pas.

En 1995 se produit une brèche dans la digue de l'Alleud que nous qualifierons de chevrette dans ce qui suit. Une première brèche s'était produite en janvier 1985 lors des froids extrêmes de cette période et cette dégradation avait été imputée à des chocs de blocs de glace. Sans nier cette cause, il faut remarquer que cet accident est survenu alors que l'extraction progressait depuis 1981 dans le bras de Saint Georges et qu'il en résultait un abaissement du niveau à débit donné en aval de la chevrette et donc une augmentation de la chute et de la puissance dissipée en hautes eaux. Cette brèche a été réparée en 1990.

Tableau 5

Evolution des niveaux aux échelles de la Pointe à Montjean

Hauteurs aux échelles (m)

Cotes IGN 69 aux échelles

Variation dans le temps

1950				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-0,38	-0,52	-0,40	-0,40
250	0,20	0,00	0,00	0,20
400	0,81	0,52	0,50	0,75
800	1,88	1,42	1,31	1,73
1500				2,62
1982				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-1,20	-1,40	-1,50	-1,35
250	-0,70	-0,65	-0,80	-0,80
400	-0,29	-0,04	-0,08	-0,19
800	0,58	0,88	0,85	0,91
1500	1,90	1,97	1,85	2,20
1996				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-1,42	-1,68	-1,78	-2,10
250	-0,83	-1,10	-1,04	-1,49
400	-0,35	-0,27	-0,30	-0,80
800	0,80	0,80	0,76	0,60
1500	1,96	1,82	1,60	1,95
2007				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-1,26	-1,81	-1,70	-1,90
250	-0,70	-1,28	-1,24	-1,36
400	-0,20	-0,67	-0,69	-0,70
800	0,70	0,46	0,35	0,51
1500	1,96	1,72	1,50	1,92

	Zéro	13,63	12,6	11,38	9,57
1950					
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	
150	13,25	12,08	10,98	9,17	
250	13,83	12,60	11,38	9,77	
400	14,44	13,12	11,88	10,32	
800	15,51	14,02	12,69	11,30	
1500				12,19	
1982					
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	
150	12,43	11,20	9,88	8,22	
250	12,93	11,95	10,58	8,77	
400	13,34	12,56	11,30	9,38	
800	14,21	13,48	12,23	10,48	
1500	15,53	14,57	13,23	11,77	
1996					
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	
150	12,21	10,92	9,60	7,47	
250	12,80	11,50	10,34	8,08	
400	13,28	12,33	11,08	8,77	
800	14,43	13,40	12,14	10,17	
1500	15,59	14,42	12,98	11,52	
2007					
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	
150	12,37	10,79	9,68	7,67	
250	12,93	11,32	10,14	8,21	
400	13,43	11,93	10,69	8,87	
800	14,33	13,06	11,73	10,08	
1500	15,59	14,32	12,88	11,49	

1950/1900				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-0,44	-0,4	-0,28	-0,46
250	-0,26	-0,18	-0,1	-0,22
400	-0,18	-0,02	0,04	0
800	0,02	0,11	0,11	0,15
1500				0,15
1982/1950				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-0,82	-0,88	-1,10	-0,95
250	-0,90	-0,65	-0,80	-1,00
400	-1,10	-0,56	-0,58	-0,94
800	-1,30	-0,54	-0,46	-0,82
1500				-0,42
1996/1982				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	-0,22	-0,28	-0,28	-0,75
250	-0,13	-0,45	-0,24	-0,69
400	-0,06	-0,23	-0,22	-0,61
800	0,22	-0,08	-0,09	-0,31
1500	0,06	-0,15	-0,25	-0,25
2007/1996				
	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
150	0,16	-0,13	0,08	0,20
250	0,13	-0,18	-0,20	0,13
400	0,15	-0,40	-0,39	0,10
800	-0,10	-0,34	-0,41	-0,09
1500	0,00	-0,10	-0,10	-0,03

De 1995 à 2007

Une nouvelle dégradation s'est produite en 1995 et le SMN indique que cette brèche a évolué de façon notable de 1995 à 2002, mais qu'elle est restée stable depuis cette date.

Dès 1995, on peut observer un effet de l'ouverture de la brèche perceptible en raison de la dispersion des points suggérant un détarage. Les cotes de 2000 et plus encore celles de 2007 montrent un abaissement très net des lignes d'eau à la Possonnière et Chalennes, centré entre 200 et 800 m³/s.

A l'extrême étiage, l'abaissement est faible, car la brèche offre peu de profondeur et les déversements y sont alors faibles.

Au delà de 700 à 800 m³/s, le déversement se produit sur l'ensemble de la chevrette et la chute diminue très vite : dès lors le niveau est réglé non plus par la digue mais par le niveau aval. C'est pourquoi l'abaissement entre 1995 et 2007 est faible et de l'ordre de 10 cm, alors qu'il atteint 0.50 m à 600 m³/s.

Un levé de la brèche a été effectué le 21 juin 2001 par le SMN pour un débit de 600 m³/s à Montjean. Les niveaux levés étaient alors :

- 12.19 en amont de la brèche.
- 11.57 en aval de la brèche, ces cotes étant probablement en IGN 69, soit une chute de 0.62 m.
- Une telle dénivelée montre que l'écoulement est ce jour là dénoyé, c'est à dire non influencé ou peu influencé par le niveau aval. En considérant la géométrie de l'ouvrage et un fond à la cote 10, on obtient un débit écoulé dans la brèche de 150 m³/s, ce qui correspond assez bien à la différence de débit pour la cote observée en 2007.

On peut alors faire le raisonnement suivant : la dénivelée entre les niveaux amont de la brèche de l'Alleud en 1996 et 2007 est au moins égale à celle observée aux échelles de la Possonnière et de Chalennes ; c'est vrai à la Possonnière puisque le remous créé par l'obstacle de la chevrette s'atténue lorsque l'on remonte vers l'amont, donc diminue de l'Alleud à la Possonnière. C'est vrai pour Chalennes, quoique moins nettement, puisque intervient de manière indépendante l'apport du Louet entre l'Alleud et Chalennes.

On en déduit qu'en l'absence de brèche la dénivelée avant débordement sur la chevrette était en 1995 et serait aujourd'hui supérieure à 1 m : la chevrette n'est pas capable de supporter un tel déversement. Si on l'avait réparée en 2001, il est tout à fait probable qu'une brèche se serait rouverte depuis cette date.

Il est quasi certain que l'abaissement provoqué par l'érosion régressive et le remplissage de la fosse d'extraction des Sabliers Angevins depuis 1992 a fait baisser les fonds dans le bras de St Georges de telle sorte que les niveaux en aval de la chevrette à débit déversé donné soient abaissés d'environ 0.50 m. Mais nous ne pouvons dire si cette érosion est aujourd'hui ralentie ou stoppée ou si elle doit se poursuivre : dans ce cas nous risquons une aggravation de l'instabilité de la chevrette, entraînant de nouvelles ruptures pouvant conduire à un abaissement supplémentaire de plusieurs décimètres.

Ce risque nous préoccupe de deux points de vue :

- Si actuellement l'abaissement des niveaux à l'amont de la chevrette reste modéré, un nouvel abaissement risque à lui seul d'annihiler tout ou partie de l'exhaussement des niveaux d'étiage (120 à 300 m³/s) attendu du remodelage des épis, et cela jusqu'à la Possonnière en amont et dans le bras de Chalennes jusqu'à une faible distance de Montjean.
- L'abaissement aux débits moyens (300 à 1000 m³/s) peut entraîner une augmentation de l'érosion régressive qui transportera en aval hors des limites de la zone expérimentale les sables qui auront été déposés dans le bras navigable suite au remodelage des épis.

Le problème des conditions aux limites aval de l'aménagement doit donc être considéré attentivement, les abaissements aval qui peuvent résulter de l'état du lit et des ouvrages étant de l'ordre de grandeur de l'effet espéré du remodelage des épis.

1.2.5. Capacité des ouvrages pour l'étiage de référence

Nous avons dit que les ouvrages de navigation ont été calés à partir d'une ligne d'eau de référence basée sur le débit de 130 m³/s observé pour la cote zéro à l'échelle de Montjean dans les années 1900. Le calage des têtes d'épis a été basé sur cette ligne de référence, sauf pour les épis des Lombardières, calés à 0.50 m au dessous de cette ligne. Ceci nous permet de déterminer en principe le débit qui s'écoule lorsque intervient la submersion des têtes d'épis, du moins si celles ci n'ont pas été dégradées ou modifiées.

Tableau 6

Lieu	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean
Abscisse (km)	7.450	14.756	21.440	30.210
Zéro échelle	13.63	12.60	11.38	9.57
Etiage référence	13.69	12.37	11.14	9.57
Capacité 1950 ligne référence (m ³ /s)	218	200	192	210
Capacité 2007 ligne référence	475	575	540	615
Capacité 2007 ligne référence -0.50 m	360	380	380	450
Capacité 2007 ligne référence -1.00 m	200	260	250	320

1.2.6. Analyse spatiale des profondeurs à débit donné

L'un des objectifs de l'amélioration de la navigabilité était la suppression des seuils diminuant le tirant d'eau en étiage. La diminution des largeurs a été le premier moyen, le second était l'association des sinuosités du chenal à un pincement à 120 m de la largeur aux points d'inflexion. Nous avons cherché à analyser comment réagit aujourd'hui le bras navigable à la combinaison des effets de cet aménagement avec les extractions massives qui ont suivi.

Les seuls documents disponibles pour cette analyse datent des années 1995 à 1998, à savoir :

- 27 profils en travers entre la Pointe et Montjean (23 km) levés en novembre 1995 pour les besoins de l'étude prospective. L'espacement est très important, mais les limites du bras navigable sont bien définies.
- 208 profils levés par le SMN en 1998 avec un pas de 50 m environ entre la Pointe et l'Alleud, soit 11.7 km. Cette bathymétrie complète ne couvre malheureusement pas toute la largeur du chenal navigable.

Ces deux données ont été obtenues alors que s'amorçait l'ouverture de la brèche dans la chevrette de l'Alleud, cette ouverture ayant pu provoquer une modification des fonds au fur et à mesure de son agrandissement. Il se peut également que les fonds en amont et autour de l'île de Béhuard n'aient pas été en 1995 totalement stabilisés après le basculement du bras navigable dans le bras des Lombardières.

A ces données nous avons associé les lignes d'eau de 150 à 1500 m³/s déduites des données de 1996 aux échelles, ce qui permet notamment de connaître les tirants d'eau en fonction du débit écoulé.

Les profils de 1995 autorisent la détermination d'un fond moyen pour le chenal d'étiage et bien sûr du fond maximum. Les sondes de 1998 ne le permettent pas, les largeurs du chenal étant mal définies ; nous nous contenterons donc du fond maximum.

Le premier constat que l'on peut faire est la très grande variabilité des profondeurs. Il est alors évident que les paramètres qui déterminent cette profondeur à l'étiage ne sont pas en l'état actuel optimisés. Tout aménagement devra donc rechercher une meilleure homogénéité des profondeurs.

Les profondeurs les plus fortes sont liées à l'écoulement autour des obstacles ponctuels : piles de pont (l'Alleud, Chalonnnes), éperons de berge s'avancant dans le bras vif (amont rive droite de l'île Moreau). Ces profondeurs ponctuelles n'interfèrent pas avec la navigation.

L'incidence de la sinuosité du bras navigable, incidence à laquelle les concepteurs de ces ouvrages ont donné beaucoup d'importance, apparaît seconde lorsqu'elle n'est pas associée à des changements de direction du lit de plein bord.

Les profondeurs les plus faibles sont observées dans le bras des Lombardières. Ce fait est dû à la variation de trois paramètres :

La hauteur des épis : les épis sont ici de moindre hauteur (0.50 m), ce qui dégage une section d'écoulement en eaux moyennes et autorise un moindre creusement du bras navigable.

La largeur du lit de plein bord : l'observation de la variation de la profondeur dans le rétrécissement entre le confluent du Louet et le pont de l'île de Béhuard montre que la profondeur est influencée d'une part par la largeur du bras navigable entre épis et d'autre part par la largeur du lit de plein bord.

La distribution des débits : la raison principale des faibles profondeurs dans le bras des Lombardières est due à son déficit hydraulique. Le débit qui s'écoule dans le bras de la Guillemette reste très important. Un jaugeage a permis en eaux moyennes de lui attribuer 23 % du débit à La Pointe, mais cette donnée unique est insuffisante pour caractériser la distribution du débit entre les bras de la Guillemette et des Lombardières. Pour homogénéiser les profondeurs, on devrait donc avoir une largeur du bras navigable des Lombardières entre épis ou un calage en hauteur des épis qui tienne compte de la distribution du débit : ce n'est pas le cas dans l'aménagement actuel, puisque les épis dans le bras des Lombardières ne rétrécissent pas en général le lit plus qu'en amont et en aval et qu'ils sont calés plus bas qu'en amont et en aval, alors que ce devrait pour un bon équilibre des profondeurs être le contraire. En abaissant les cotes d'épis construits en 1986 dans le bras des Lombardières, le SMN a eu raison de prendre en compte l'abaissement des niveaux à débit donné, mais il a accru les disparités de profondeur qui rendent difficile la navigation en étiage extrême dans ce bras.

Le calage de la profondeur des fonds en étiage est la résultante des mouvements de sable produits par les débits passés supérieurs au débit d'étiage. Sous des niveaux caractérisés par une pente faible et donc des différences de niveau faibles, peu variables à débit donné en fonction du temps, les profondeurs dans chaque bras subissent des variations considérables dans l'espace qui résultent de trois paramètres :

- La distribution des débits entre bras qui intervient du double point de vue hydraulique et morpho-dynamique : une diminution du débit dans un bras diminue la hauteur d'eau, mais aussi la capacité d'auto-curage.
- Les différences de largeur dans un bras navigable entre épis induisent également un effet hydraulique et un effet morpho-dynamique : l'élargissement diminue la hauteur d'écoulement, mais aussi le transport solide à débit donné.
- Les différences entre les sections disponibles aux débits de hautes eaux dans le lit de plein bord dépendent de la largeur du lit et du calage des épis.

Ces différences évoluent certes dans le temps : par exemple un rétrécissement de la largeur du lit de plein bord surcreusera ce lit en hautes eaux et tendra à le remblayer en basses eaux ; les volumes érodés dans ce rétrécissement vont former une barre sableuse dans l'élargissement aval ; cette barre tendra à s'éroder aux débits inférieurs.

Mais les volumes de sable qui permettraient l'adaptation de chaque section au débit écoulé sont trop importants en regard de la durée de chaque débit et du transport solide. La fluctuation des sections en fonction du temps est donc faible en regard de leur variation spatiale : la présence de hauts fonds et de bas fonds est liée à la lenteur des variations dans le temps, qui dépend elle-même de la faiblesse du transport solide des sables.

Mais si les variations de la cote des fonds sont lentes, elles ne sont pas nulles : lorsque le régime hydrologique est très différent du régime médian, une érosion ou un dépôt appréciable peut se produire au droit des singularités courtes, car un transport faible suffit alors à modifier significativement le niveau du fond. La comparaison des fonds sur un seul profil en travers entre deux campagnes de mesure n'est donc pas possible ponctuellement, car les fluctuations des fonds dues à l'adaptation que nous venons de décrire peuvent être du même ordre de grandeur que les variations moyennes sur une décennie. Seule est valable la comparaison sur un bief d'une longueur suffisante pour effacer les fluctuations spatio-temporelles.

La présence de chevrettes barrant le bras navigable est un autre exemple de variation des fonds en fonction du temps autour d'une valeur moyenne ; l'exemple le plus remarquable sur l'ensemble de la Basse Loire est donné par la chevette de l'Alleud, qui détermine la condition limite aval du chantier de remodelage.

Avant 1995, la chevette relevait fortement les niveaux et permettait jusqu'à 600 m³/s l'entonnement de la quasi totalité du débit liquide dans le bras de Chalennes, tout en favorisant les dépôts entre la Possonnière et l'Alleud ; la situation actuelle est avec la brèche de 1995 moins nette, mais l'explication reste valable. En crue, la chevette se noie et la perte de charge qu'elle occasionnait devient nulle ; le débit liquide croît alors beaucoup plus vite dans le bras de St Georges que dans le bras de Chalennes. Dans ce bras, la pente diminue et des dépôts importants se produiront au fond. Pour assurer leur transit en eaux ordinaires, il faudra dans le bras de Chalennes une pente motrice supérieure à la pente amont et aval. On appellera ce processus la « respiration » du lit en présence d'un seuil transversal.

1.2.7. Synthèse

*

On retiendra les conclusions suivantes de ce développement :

- Les faibles profondeurs dans le bras des Lombardières sont liées à la conjonction de trois causes : la différence de 0.50 m dans le calage des épis, la diminution des débits par rapport aux tronçons amont et aval, la conjonction des rétrécissements et élargissements locaux.
- La pérennité de la chevette de l'Alleud est indispensable, aussi bien pour éviter les abaissements qui suivraient sa rupture que pour que nous soyons dans l'avenir capables de mesurer les conséquences de ce chantier expérimental.
- L'analyse des variations spatiales de la profondeur autour d'une valeur moyenne est un moyen de compréhension de la morpho-dynamique locale important, mais des fluctuations liées au régime ne doivent pas être exclues. Cette analyse peut contribuer à l'optimisation des ouvrages, à la condition de l'éclairer par l'explication des causes hydrauliques des variations.

- La connaissance de la distribution des débits entre les bras est un élément important du choix du type et de l'importance des modifications : la réalisation de jaugeages au pont de Béhuard avec appréciation de la contribution du bras amont du Louet devrait être faite tout au long de la décrue du printemps 2009.
- La largeur entre épis reste un levier dans le dimensionnement du projet, mais les élargissements nous semblent devoir être limités et exclus en tout cas dans le bras des Lombardières.

Les propositions du BCEOM seront maintenant examinées à la lumière de ces observations.

Examen de l'étude hydro-sédimentaire

Le chapitre « Avant projet épis » du rapport BCEOM – DHI – ANTEA de décembre 2003 définit le remodelage des épis projeté « dans le but de provoquer le comblement artificiel du lit mineur par les sédiments libérés et par conséquent le relèvement de la ligne d'eau d'étiage ».

Plusieurs solutions ont été envisagées, outre l'état actuel appelé scénario 1 :

- Scénario 2 : abaisser la cote des épis de 0.80 m.
- Scénario 3 : réduire la longueur des épis en portant de 130 m à 180 m la largeur du bras navigable.
- Scénario 4 : combiner l'abaissement précédent à un abaissement de la crête des épis de 0.50 m.
- Scénario 5 : supprimer complètement les épis.

Pour choisir entre ces solutions, le BCEOM s'appuie sur les résultats du modèle numérique hydro-sédimentaire du bras navigable entre la Pointe et le pont de Chalennes construit par DHI et adopte le scénario 4, sans préciser les raisons de ce choix. Nous nous sommes donc reporté aux rapports de l'étude sur modèle numérique et en analysons brièvement le contenu. Le rapport DHI daté de 2003 détaille le modèle hydro-sédimentaire et donne quelques indications chiffrées sur les effets des différents scénarios, mais ne formule pas non plus de conclusion justifiant le scénario retenu.

Le modèle numérique est conçu pour simuler l'écoulement et le transport solide sur un cycle de 5 années au cours duquel sont déterminés les niveaux d'eau et la variation des fonds ; le bras navigable est représenté à l'aide des sondes de 1998 et plus sommairement par un levé 2001 du lit émergé en étiage aux emplacements des épis et des bancs.

Du fait de la représentation du seul bras navigable, la distribution du débit a été pré-déterminée par DHI entre le bras des Lombardières et le bras de Guillemette, le Louet, le bras de Chalennes et le bras de Saint Georges. DHI note que la distribution entre les bras de Guillemette et des Lombardières ne repose que sur une seule mesure à haut débit.

En aval, la distribution est celle que l'on observait avant 1995 et ne prend pas en compte la brèche de la chevrette de l'Alleud. La modification de la distribution des débits qui est intervenue de 1995 à 2002 n'est donc pas prise en compte. Par rapport à l'état actuel, le calcul majore le débit dans le bras de Chalennes et admet une condition de niveau à l'Alleud trop élevée, ce qui influence les résultats obtenus en aval de la Possonnière.

La distribution des débits, qui est un facteur essentiel de l'équilibre des fonds, était donc insuffisamment connue lors de cette étude. Il nous semble indispensable que l'étude du projet se fonde sur des hypothèses de répartition des débits plus pertinentes ; ces mesures devraient porter sur la distribution des débits entre bras des Lombardières et bras de Guillemette et entre bras de Chalonnnes et bras de Saint Georges. Elles sont indispensables d'une part pour le choix des largeurs entre épis, d'autre part pour la compréhension des évolutions lors du suivi expérimental.

Le calage du modèle d'écoulement a été effectué sur la base d'observations aux échelles et à quelques autres points, notamment au pont de l'Alleud. La date de ces observations n'est pas précisée, sauf à Chalonnnes. Il semble qu'il y ait des discordances entre les niveaux de calage donnés sur les graphiques DHI et les courbes hauteur-débit que nous donnons en annexe, mais l'absence de datation ne nous permet pas de préciser la comparaison.

Le calcul de transport solide est basé sur l'hypothèse que seul le bras représenté est capable d'un transport et néglige de ce fait les entrées et sorties de matériau des autres bras.

Le calage morphologique du modèle est basé sur la formule d'Engelund Hansen et sur une estimation du transport solide que nous aurions proposée et dont DHI ne donne pas la référence. Il apparaît que cette estimation a conduit DHI à appliquer un coefficient 0.4 à la formule d'Engelund Hansen. Avec cette hypothèse, DHI calcule que, dans l'état actuel, les niveaux tendent à s'abaisser tout au long du modèle :

- L'abaissement reste faible à la Pointe, mais nous savons que la tendance récente a été un exhaussement.
- L'abaissement calculé à la Possonnière est en revanche conforme à celui observé après 1996, mais nous savons que cette observation s'explique par l'ouverture progressive de la chevette de l'Alleud que le modèle ne prend pas en compte. Il en va de même pour l'abaissement calculé au pont de l'Alleud.

Les calculs de l'impact sont traduits en variation des niveaux pour les variantes 2, 3, 4, en fonction du débit à la Pointe, la Possonnière et au pont de l'Alleud, soit :

- La Pointe : de 0.16 m à 0.35 m en étiage et 0 à -0.10 m en crue.
- La Possonnière : de 0.15 m à 0.36 m en étiage et 0 à -0.04 m en crue.
- L'Alleud : de -0.01 m à -0.06 m en étiage à 0 en crue.

Le calcul du scénario 5, enlèvement total des épis, donne un exhaussement de 0.50 m à la Pointe et de 0.75 m à la Possonnière : en regard de ces chiffres rappelons que les ouvrages de navigation ont abaissé les niveaux d'étiage de 0.44 m à la Pointe et 0.40 m à la Possonnière; les exhaussements calculés sont en valeur absolue supérieurs aux abaissements liés à la construction de ces ouvrages.

Le rapport montre enfin, à l'aide de quelques sections type, que l'exhaussement des fonds est plus fort que l'exhaussement des niveaux, ce qui tend à réduire le tirant d'eau pour la navigation. Ce résultat est logique, puisque l'aménagement initial avait eu les effets inverses. C'est pourquoi VNF a demandé que soit précisée la variation des tirants d'eau.

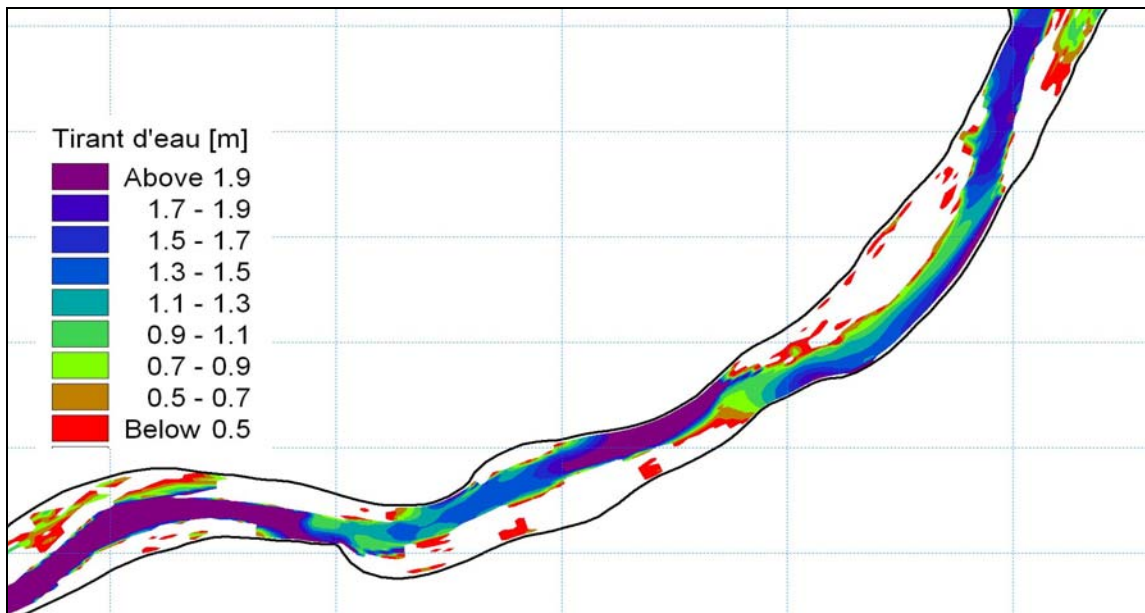
Un deuxième rapport, rédigé en 2008, précise ces tirants d'eau, mais seulement pour le scénario 4 retenu : le principal résultat est donné par des cartes comparant les tirants d'eau dans l'état actuel après 5 années de fonctionnement et dans l'état remodelé. Avec ce mode de comparaison, les approximations du réglage sont probablement secondes par rapport à l'effet des aménagements représentés.

Ces cartes montrent que la diminution du tirant d'eau en étiage est maximum dans les biefs les plus profonds, ce qui n'est pas un problème, les tirants d'eau restant acceptables. Mais elles montrent aussi que la baisse des tirants d'eau reste forte dans le bras des Lombardières.

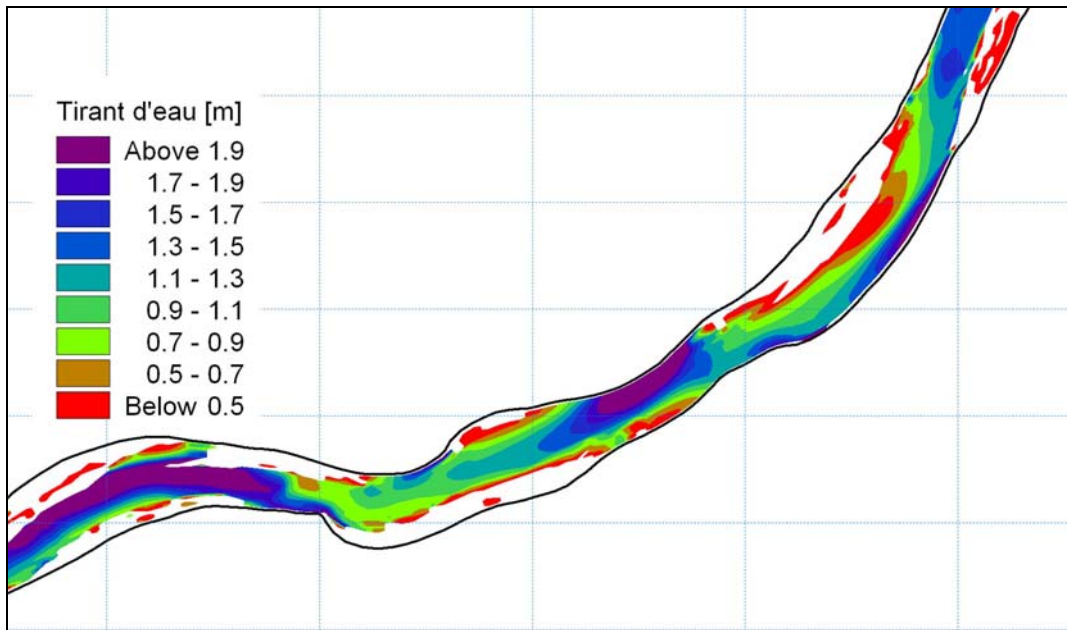
Un zoom de ces cartes limité au bras des Lombardières montre dans les zones où les tirants d'eau observés sont les plus faibles des diminutions de profondeur de 0.20 m à 0.50 m et localement de 0.50 m à 0.70 m.

Les conclusions que l'on peut déduire de cette analyse ne sont guère positives : le calcul de l'enlèvement total des épis donne des valeurs d'exhaussement plus fortes que les abaissements constatés du fait de la construction de ceux-ci, ce qui fait penser que la sensibilité du modèle est trop grande. De ce fait l'exhaussement calculé de 0.35 m est probablement une valeur par excès. Mais surtout elle s'accompagne de baisses de tirants d'eau dans les zones les plus sensibles qui semblent difficilement acceptables.

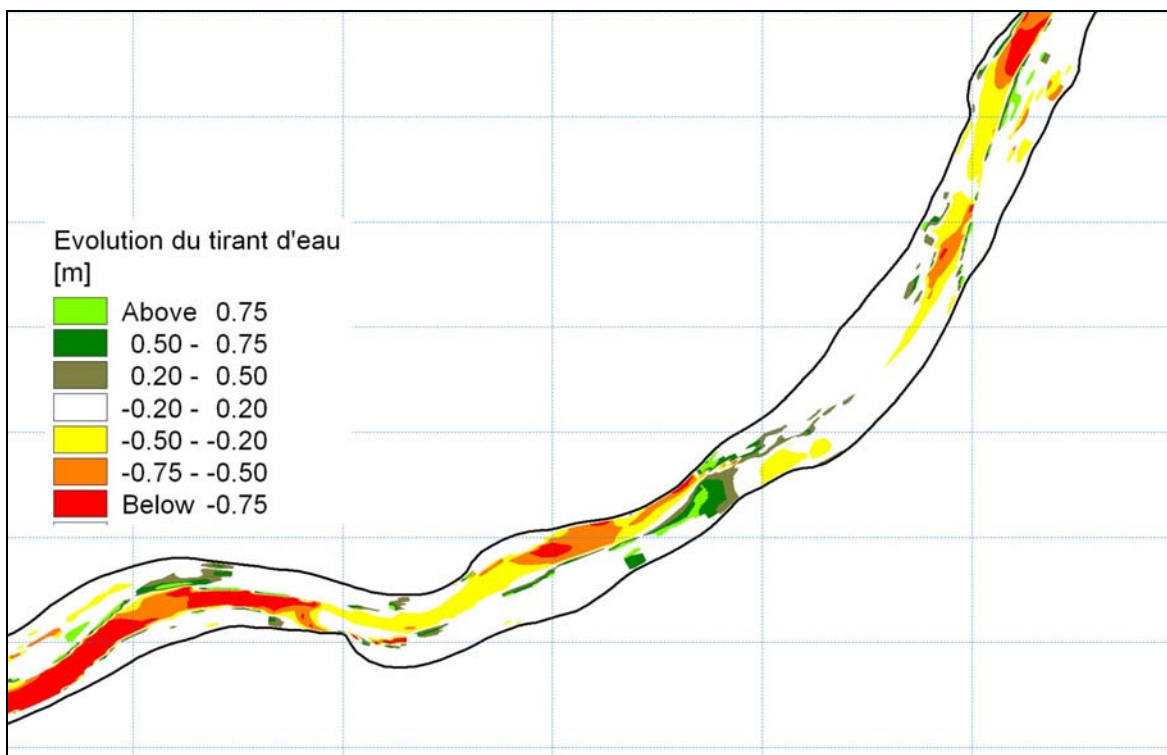
C'est pourquoi, même si l'opération de remodelage a un caractère expérimental qui autorise l'échec, il nous semble que la probabilité de cet échec est trop forte pour que le scénario 4 soit à la base du remodelage projeté.



DHI 2003 : tirants d'eau dans l'état de référence après simulation sur 5 années pour un débit de 220 m³/s (lieu non précisé ; la Pointe ou Montjean ?)



DHI 2003 : tirants d'eau dans l'état aménagé après simulation sur 5 années pour un débit de 220 m³/s (lieu non précisé ; la Pointe ou Montjean ?)



DHI 2003 : variation du tirant d'eau après simulation sur 5 années à 220 m³/s (à la Pointe ou à Montjean) – Variation = état aménagé – état actuel

1.4. Recommandations pour le remodelage des épis

1.4.1. Les objectifs

Rappelons les objectifs qui sont à la base du chantier expérimental de remodelage des épis :

- Relever les lignes d'eau en étiage en favorisant les dépôts par une diminution de l'auto-curage du bras navigable et par l'apport des sables libérés par le recul ou l'abaissement des épis.
- Accroître autant qu'il est possible l'espace de mobilité.
- Admettre une diminution des tirants d'eau là où ils sont les plus élevés, mais ne pas aggraver les conditions de navigation dans les zones où elle est aujourd'hui déjà précaire. L'optimum sera donc d'homogénéiser ces tirants d'eau si cela est possible.

L'accroissement de l'espace de mobilité peut concerner le bras navigable par élargissement du bras et recul des têtes d'épi ; mais il doit principalement prendre en compte l'ensemble du lit de plein bord, en redonnant une mobilité au sable contenu dans l'espace inter-épis : cette mobilité du sable contrecarre la poussée végétale qui rétrécit le lit actif. Le remodelage des épis permettra alors d'élargir le lit actif, ou bande active, de telle sorte qu'il s'étende à l'ensemble du lit de plein bord. Cet objectif nous semble être majeur. Il n'y a donc pas synonymie entre accroissement de l'espace de mobilité et élargissement du bras navigable.

1.4.2. Les paramètres

Nous avons évoqué quatre paramètres qui doivent permettre d'atteindre ou d'approcher ces objectifs :

- **La distribution des débits entre les différents bras** : ce paramètre conditionne largement les profondeurs d'eau en étiage. Nous formulons l'hypothèse d'un maintien de la distribution actuelle, laquelle dépend des dimensions des chevrettes de la Guillemette et de l'Alleud. Au cas où des raisons liées à l'environnement ou aux usages suggéreraient de modifier cette distribution en étiage, il sera nécessaire d'en tenir compte. Nous avons dit que la connaissance de ce paramètre était insuffisante et qu'il convenait de jauger la capacité des différents bras à plusieurs débits de 200 à 1500 m³/s à Montjean.
- **Les lignes d'eau de référence** : il serait souhaitable que ces lignes d'eau soient les plus récentes possible, ce qui servira non seulement à l'élaboration du projet, mais aussi au suivi de l'expérience. Elles seront levées à plusieurs débits et au minimum aux emplacements suivants :
 Echelle amont à St Gemmes
 La Pointe
 Entrée Guillemette
 Pont de Béhuard
 La Possonnière
 Pont de l'Alleud
 Brèche de l'Alleud (amont et aval à partir de l'île de Chalennes par exemple)
 Pont de Chalennes (bras nord et sud)
 Bras de Chalennes vers km 25 BN
 Pont de Montjean.

- **La largeur du lit de plein bord à débit donné** : nous avons souligné que les rétrécissements accroissaient la profondeur et qu'inversement les élargissements la diminuaient ; il est difficile de quantifier l'effet de la largeur du lit de plein bord, mais ce paramètre devra être considéré pour affiner en plus ou en moins les dimensions des épis.
- **Les profondeurs du lit** : c'est un paramètre de contrôle qui doit permettre au projeteur d'infléchir les choix en accentuant ou en diminuant l'importance du remodelage. Un inventaire des profondeurs dans l'état 2008-2009 devra être refait : on pourra adopter comme critère la profondeur maximum sans toutefois tenir compte des affouillements ponctuels aux ponts ou aux avancées majeures de la rive. On pourra aussi considérer la profondeur aux limites d'un chenal balisé de largeur à convenir avec VNF. La distribution de la profondeur prendra en compte l'effet des coudes lorsque les inflexions de la courbure en plan provoquent la formation de seuils, de même que les hauts fonds obtenus à l'aval d'une fosse d'affouillement ponctuel.

1.4.3. Choix de la cote de première submersion des têtes d'épi

Rappelons que le projet 1900 a fixé le début de surverse sur les épis pour un étiage de référence obtenu à la cote zéro à l'échelle de Montjean, soit 130 m³/s; ce choix a conduit à un enfoncement du bras navigable et à une capacité du lit à cette même cote en 1950 de l'ordre de 200 m³/s dans le tronçon expérimental. Cette valeur nous semble être un objectif à atteindre, en tenant compte d'un probable exhaussement des lignes d'eau du fait de l'ensablement. Nous suggérons donc de fixer la ligne d'eau de calage des têtes d'épis théorique à la cote de la ligne actuelle à 200 m³/s majorée de 0.40 m, maximum d'exhaussement envisageable ; cette ligne d'eau correspondra à un débit de 280 m³/s à l'échelle de Montjean.

Nous ne quantifierons pas l'abaissement à donner aux épis, car les quelques cotes dont nous disposons montrent que les cotes actuelles peuvent différer des cotes théoriques du projet 1900 par suite de dégradations ou de renforcement des ouvrages. Nous donnons donc à titre indicatif les valeurs de la ligne d'eau 2007 aux échelles à 280 m³/s en rappelant la nécessité de l'actualiser et de l'affiner par des levés sur des points intermédiaires.

Tableau 7

Lieu	La Pointe	Possonnière	Chalennes	Montjean
Cote étiage référence 1900 = Z_0	13.69	12.37	11.14	9.57
Hauteur échelle 2007 à 280 m ³ /s	-0.63	-1.14	-1.13	-1.20 *
Cote NGF 2007 à 280 m ³ /s = Z_1	13.00	11.46	10.25	8.37
Ecart = $Z_1 - Z_0$	-0.69	-0.91	-0.89	-1.20

* Barème DIREN 2007 à Montjean

1.4.4. Choix de la largeur du bras navigable entre épis

Nous avons montré que la dérivation du bras de la Guillemette rendait l'élargissement du chenal navigable dans le bras des Lombardières incompatible avec le maintien d'une navigabilité minimale ; en conséquence, tant que cet usage ne sera pas abandonné, il n'est pas possible d'élargir ce bras.

De part et d'autre du bras des Lombardières la largeur du bras navigable sera proportionnelle au débit écoulé dans le bras. La largeur dans le bras des Lombardières à l'amont du Louet est de 120 m. Nous proposons donc de fixer la largeur L par la règle de trois :

$$L = 120 * Q_{\text{bras}} / Q_{\text{Lombardières}}$$

La distribution étant variable en fonction du débit total, quel débit (à Montjean) considérer pour appliquer cette règle ? Ce ne peut être un débit trop faible, car le lit ne réagit alors que très lentement à ces débits ; ce ne peut être un débit de crue, car l'écoulement sur les épis prend trop d'importance pour que le débit total soit un bon critère. On pourrait envisager de retenir un débit de 600 m³/s. Ce débit correspondait en 2001 à une surverse sur la chevrette de l'Alleud limitée à la brèche ouverte en 1995.

Appliquée à la distribution des débits admise par DHI, cette règle conduirait à des largeurs de :

- 156 m entre Maine et Guillemette.
- 120 m entre Guillemette et Louet.
- 128 m entre Louet et Possonnière.
- 165 m entre Possonnière et chevrette de l'Alleud.

La largeur qui sera calculée à partir de la distribution actuelle des débits devra être discutée et amendée en fonction de l'observation des profondeurs : elle pourra être augmentée là où les profondeurs d'eau sont actuellement les plus grandes et diminuée là où elles sont actuellement trop faibles.

1.4.5. Géométrie des épis

D'après Kaufmann, la dénivelée adoptée entre l'ancrage de l'épi et sa tête était de 1 m, ce qui donnait à l'ouvrage une pente transversalement au bras navigable de 0.003 à 0.005. Nous proposons de diminuer de moitié ces pentes, c'est à dire de donner à l'épi une dénivelée totale de 0.50 m au lieu de 1 m, ce qui accroîtra les débits spécifiques déversés sur les épis aux points les plus éloignés des têtes d'épi : cette disposition permettra d'accroître la mobilité sur la plus grande largeur possible entre les épis.

On objectera que cette disposition peut conduire à l'érosion du franc bord trop proche des points où le déversement est augmenté. Il faudra rappeler alors que l'excès de précaution dans le calage initial des épis, conjugué bien sûr à l'enfoncement du chenal navigable suite aux extractions, a conduit jusqu'à présent à une sédimentation excessive du lit entre francs bords et permis la végétalisation, et parfois la conquête de surfaces anciennement dévolues à la mobilité de la Loire. L'expérimentation ayant pour objet de retrouver des espaces de mobilité, il convient de diminuer le plus possible la fonction de protection assurée de fait par les épis. Le maintien de leur cote actuelle ne sera envisagé que sur une courte longueur, par exemple 20 m, près des anciens francs bords. Ce choix nous paraît être justifié par le caractère expérimental de l'opération. Il faudra expliquer : qui ne tente rien ne prouve rien non plus.

De la même manière que pour le bras navigable, la longueur minimum d'épis à traiter sera telle que la somme du bras navigable et de la longueur traitée soit proportionnelle au débit : le débit à considérer sera alors un débit de crue ordinaire, soit par exemple 200 m³/s.

1.4.6. Conclusion

Nous avons cherché à établir une démarche pour un dimensionnement adapté aux caractéristiques de ce tronçon de Loire. On aura compris que la logique de la démarche est plus importante que les chiffrages annoncés. Il s'agit en quelque sorte de savoir ce que l'on fait, grâce à la mise en ordre des critères du choix. Il sera alors plus facile de suivre le déroulement de l'expérimentation et d'en tirer les leçons.

Il reste que la Loire ne peut être vue seulement à partir de ces critères généraux et qu'il sera nécessaire de ne pas négliger les particularités locales ou les contraintes et usages à considérer. Tout en formulant un avis sur certaines dispositions de l'AVP du BCEOM, nous examinons ci après quelques uns de ces points particuliers.

1.5. Remarques et suggestions sur les propositions de l'AVP

Nous repérons les implantations d'une part en recourant à notre repérage kilométrique de l'axe du bras navigable, d'autre part en utilisant la dénomination des épis faite par le BCEOM, enfin en citant les paragraphes du rapport d'AVP que nous commentons.

1.5.1. La Pointe – PK 7.000 à 9.500

Rive droite - zone 4 - § 4.2.4

La conservation des épis RD1 à RD6 est conseillée par le BCEOM d'une part en raison de la présence d'espèces protégées, d'autre part en raison du faible volume de sable. Nous pensons que le rétrécissement auquel conduit la conservation de ces épis diminuera le courant de part et d'autre des épis aval RD7 et RD8 et rendra peu performant l'abaissement de ces épis. Nous suggérons en outre de supprimer ou araser la digue longitudinale entre les épis RD 3 et RD6.

Le BCEOM a prévu le recul, sur 50 m, des épis RD 7 à RD 10, mais maintient en l'état les parties non supprimées « pour des raisons de protection de l'environnement ». Nous pensons que seul l'épi RD9 aura besoin d'être légèrement raccourci et préconisons l'abaissement d'une grande partie de la longueur de ces épis. Nous ne comprenons pas la justification avancée en ce qui concerne la protection de l'environnement.

Les épis RD11 à RD13 très courts peuvent être conservés. L'épi RD 14 est la chevrette du bras de Guillemette et son calage n'est pas modifié, mais la distribution du débit entre les bras de Guillemette et des Lombardières devra faire l'objet d'un suivi.

Rive gauche - zone 5 - § 4.2.5

Les épis du banc de convexité situés en aval du confluent RG1 à RG6 devraient être seulement abaissés. On pourra se demander si leur reconstruction après abaissement est nécessaire : la photo aérienne montre que la convexité tend à maintenir un banc de sable à une cote élevée ; mais la photo seule est insuffisante pour apporter une réponse à cette interrogation.

Rive gauche – zones 6 et 7 - § 4.2.6

A partir de l'épi RD7 jusqu'à l'épi 24, ce sont les épis de rive gauche qui seront éventuellement raccourcis si la largeur choisie pour le chenal l'exige. Comme le BCEOM, nous suggérons la suppression de la digue longitudinale joignant les épis RG 17 à RG 20.

1.5.2. Bras des Lombardières – PK 9.500 à 14.500

La valeur de l'abaissement des têtes d'épi entre la Pointe et la Possonnière par rapport à la ligne de référence 1900 dite zéro Montjean est probablement comprise entre 0.70 m et 0.90 m. Si les levés confirment que les épis construits en 1986 sont calés à 0.50 m sous cette ligne de référence, les valeurs de l'abaissement seront dans le bras des Lombardières comprises entre 0.20 m et 0.40 m. Toutefois la diminution de la pente des épis accroîtra l'abaissement en approchant de la rive.

L'application de la règle définie précédemment devra dans le bras des Lombardières faire l'objet de plusieurs exceptions :

- au droit des Lombardières
- au droit de la Ciretterie
- le long de l'île Mureau.

Au droit des Lombardières, entre le confluent du Louet et l'aval du pont de Béhuard, la largeur du lit de plein bord est réduite. La vitesse en crue est anormalement élevée, ce qui tend à surcreuser le lit entre les abscisses 11.4 et 12.4 (km) et à former un haut fond en aval du rétrécissement. Ces singularités qui se forment lors des crues ne parviennent pas à s'effacer lors des décrues, le transport solide étant alors trop faible. Il est donc souhaitable de diminuer les vitesses en crue en accroissant la section, soit en augmentant les largeurs entre épi et rive soit en abaissant le corps jusqu'à la cote observée pour un débit de 150 m³/s à Montjean : on pourra ainsi reculer les têtes de l'épi RD 21 et de l'épi suivant non numéroté par BCEOM, à moins que des usages riverains ne l'interdisent.

Boire de la Ciretterie : en aval du pont de Béhuard, le traitement des épis devra prendre en compte l'amélioration de la connexion de la boire de la Ciretterie étudiée par ailleurs. Cette contrainte et le constat de la faiblesse de l'abaissement projeté des épis nous suggèrent une variante esquissée et reproduite ci après : l'abaissement des épis RG 26 à RG 29 ne serait pas réalisé à partir de la tête de l'épi (côté chenal navigable) mais seulement au plus près de la rive et sur une cinquantaine de mètres de largeur (à préciser). Les épis seraient donc sur cette largeur plus abaissés que suivant la règle générale, mais continueraient à contrôler l'écoulement du petit bras. Pour ne pas diminuer le débit du bras navigable en cas d'étiage sévère, le nouveau bras ainsi tracé contre la rive ne devrait pas être alimenté en deçà d'un débit à convenir, par exemple 130 ou 150 m³/s à Montjean.

On peut ainsi espérer le maintien d'un petit débit devant l'entrée de la Boire de la Ciretterie pendant la majeure partie de l'année.

Les épis de rive gauche RG 26 à RG 29 sont conservés sans modification du bord du bras navigable jusqu'à 50 m environ de la rive gauche. Au delà et donc sur 50 m, leur abaissement forme une succession de petits seuils calés au dessus du niveau à 130 m³/s à Montjean. La cote et la largeur des seuils seront déterminées de façon à obtenir les sections équivalentes à celles déterminées par la règle générale que nous avons proposée et à optimiser l'alimentation de la boire de la Ciretterie.

Cette variante devrait permettre un équilibre morpho-dynamique très proche de celui défini, tout en testant la possibilité d'une gestion plus diversifiée des bancs. L'esquisse proposée est très simple, mais doit être critiquée, si possible à l'aide d'un calcul d'écoulement.

Il reste que cette variante doit être considérée comme une expérience. Aussi la multiplication des précautions n'est pas une bonne chose : il ne sert à rien que l'expérience soit un succès si les coûts sont trop élevés pour qu'elle soit renouvelée et étendue à d'autres biefs de Loire.



Rouge : épis conservés en l'état ou ajoutés
 Jaune : épis abaissés

Remarque : le curage entre épis abaissés sera fonction des cotes actuelles des atterrissements dans l'emprise du chenal futur. Il n'est pas souhaitable qu'il soit complet ; un chenal pilote de largeur réduite peut suffire. Les matériaux de curage seront déposés en Loire.

Ile Mureau et port de la Possonnière

L'accès au port de la Possonnière doit être amélioré. Pour cela, et comme le propose le BCEOM, nous préconisons le recul des épis RD 26 à RD 29 (mais pas l'épi RD 25 qui laisse une largeur suffisante). Le recul devra être limité, de préférence de l'ordre de 30 m. C'est surtout sur l'épi longitudinal RD 29 que l'on jouera en l'alignant sur les têtes des épis 26 à 28, de façon à envoyer le courant vif sur la jetée du port. Le surcreusement devant la jetée appellera alors un renforcement de sa protection.

1.5.3. De la Possonnière à l'Alleud (PK 14.500 à 19.000)

Il n'y a pas lieu de raccourcir les épis de rive gauche RG 31 à RG 39 face au port de la Possonnière : la largeur du chenal sera suffisante en amont avec le recul des épis de l'île Mureau et elle l'est déjà dans l'état actuel au droit du port.

Le remodelage des épis n'aura pas seulement pour but le relèvement des étiages ; il devra également contribuer à restaurer la largeur du lit de pleins bords sur la rive droite entre la Possonnière et l'Alleud. Cette largeur tend à se restreindre fortement, car l'alluvionnement entre épis est aujourd'hui suffisamment avancé pour permettre le développement de la végétation. Or la poussée végétale favorise de nouveaux exhaussements jusqu'à obtention d'un niveau autorisant la conquête de ces terrains par l'homme et un recul irréversible du domaine fluvial.

Il faut souligner que la diminution de la largeur du lit de plein bord est à la fois l'effet de l'enfoncement du lit dû à la présence des épis et la cause d'un maintien et parfois d'une

accentuation de ce surcreusement. En présence d'un alluvionnement aussi développé, il faudra s'interroger aussi sur ses conséquences sur le niveau des plus fortes crues.

La remise en mouvement et l'abaissement des atterrissements de rive droite conduit à reporter sur cette seule rive l'élargissement du chenal et à l'accompagner d'un abaissement du corps des épis sur la majeure partie de leur longueur. Le recul et l'abaissement seront accompagnés par la suppression des digues longitudinales, sauf sur 100 m ou 150 m en aval de la jetée du port, où cette digue sera renforcée si nécessaire.

Rappelons que la chevrette de l'Alleud devra être confortée afin de garantir une condition de niveau-débit stable à l'aval de ce chantier expérimental : une dégradation importante accélérerait certes l'érosion des atterrissements de rive droite entre la Possonnière et l'Alleud, mais elle abaisserait aussi les fonds et les étiages dans cette zone, au profit du bras de Chalennes. La fermeture pure et simple de la brèche est incompatible avec la tenue des parties anciennes de la chevrette : elle semble compatible avec le maintien de tirants d'eau suffisants dans le bras de Chalennes et elle est bénéfique pour la qualité de l'eau du bras de Saint Georges.

Une modification de la forme d'entrée de la chevrette en amont du pont de l'Alleud sera étudiée en relation avec le recul et l'abaissement des épis de rive droite.

Rappelons enfin la nécessité d'un suivi des effets du remodelage en dehors de limites de l'aménagement, soit depuis les Ponts de Cé en amont et jusqu'à Montjean en aval.

Chapitre 2

2. La Loire de Montjean à Ancenis

Ce chapitre décrit tout d'abord sommairement la morphologie du site et des ouvrages de navigation. Puis il retrace l'évolution des niveaux au cours du 20^{ème} siècle. Enfin il analyse l'effet des ouvrages expérimentaux appelés seuils à échancrure et construits dans le bras nord de l'île Meslet en 2002-2003.

Nous avons fixé à Ancenis la limite aval du tronçon étudié dans ce chapitre : au début du 20^{ème} siècle, le régime de la Loire était jusqu'à cette ville complètement fluvial, c'est à dire non soumis à l'influence de la marée; il en va différemment aujourd'hui, avec le creusement du bassin de marée dans la première moitié du siècle puis les extractions pendant la deuxième moitié.

2.1. Description morphologique du site et des ouvrages de navigation

Depuis Montjean jusqu'à Ancenis, on peut identifier quatre tronçons de la Loire :

- De Montjean (km 30) à la limite des communes d'Ingrandes et du Fresne (km 36), la Loire présente sur une longueur de 6 km un bras unique dont la largeur active varie de 400 à 500 m. Les têtes d'épis dessinent un chenal navigable sinueux de 130 à 150 m de largeur. Entre Montjean et Ingrandes, la boire de Champtocé est un ancien et important bras de Loire, non connecté en amont si ce n'est en crue débordante. Cette boire est aujourd'hui mal connectée en aval au lit principal en raison de l'abaissement des niveaux tout au long du 20^{ème} siècle.
- Du Fresne à Montrelais (km 39), la Loire se sépare en deux bras autour de l'île Meslet sur une longueur d'environ 3 km .
Le bras Sud ou bras de Cul de Bœuf s'amorce à partir de la rive gauche convexe, ce qui a toujours favorisé une tendance à l'ensablement. De plus les épis avancés sur le banc de convexité rive gauche contrarient son alimentation liquide. Sa largeur est en moyenne de 250 m.
A l'inverse, le bras Nord alimenté par un écoulement à l'extrados du coude d'Ingrandes conserve de bonnes profondeurs : c'est donc le bras navigable. Sa largeur varie : égale à 250 m à l'entrée, elle se rétrécit à 150 m au droit du lieu-dit les Granges (PK 37), augmente à nouveau à 250 m pour retrouver le bras de Cul de Bœuf avec une largeur de 165 m. Ces variations de largeur ont conduit à rétrécir par des épis les sections les plus larges du bras navigable jusqu'à 110 m et à laisser la largeur initiale dans les sections les plus étroites.

- De Montrelais à Saint Florent (km 44), l'île Batailleuse sépare à nouveau deux bras de Loire entre les km 39.8 et 44.5. C'est alors le bras Sud qui est le bras navigable, bien que le bras Nord présente un aménagement qui en offre toutes les caractéristiques, à savoir : largeur entre épis de 150 m, sinuosité et digues longitudinales dans les concavités.
Seule la chevrette amont marque bien la volonté du Maître d'ouvrage de l'époque de reporter la navigation sur le bras Sud ; ce bras Sud offre une largeur moyenne de 80 m, variant entre 60 et 120 m. On ne trouve d'épis que dans les élargissements à l'entrée et à la sortie du bras. La présence d'affleurements rocheux à Saint Florent rend aujourd'hui la navigation localement difficile.
- De Saint Florent à Ancenis (km 57), les caractères de la Loire ne différaient pas de ceux du tronçon amont jusqu'à ce que le creusement du bassin de marée et les extractions massives conduisent à remonter en amont d'Ancenis l'influence de la marée. De part et d'autre d'un bras unique de 3.5 km entre les km 46.5 et 50 les îles sont nombreuses : en amont, île Moquart sur 2 km à Varades et en aval près d'Ancenis île Briand, île Kerguelen, île Boire Rousse, île aux Moines et île Delage. Certaines de ces îles sont présentes dans une même section, ce qui divise localement l'écoulement en trois bras. Les bras secondaires sont tous fermés à leur amont par des chevrettes calées initialement à la cote de l'étiage de référence.

2.2. Evolution des niveaux de 1900 à 2007

2.2.1. Analyse de l'état 1900

Nous ne reprendrons pas la description du système épis-chevrettes, identique dans son principe à celui du tronçon amont. Comme pour le tronçon précédent, le calage des ouvrages de navigation a été basé sur l'étiage de référence correspondant au début du siècle au débit écoulé pour la cote zéro à l'échelle de Montjean, soit 130 m³/s.

Nous donnons dans le tableau suivant les niveaux de cet étiage de référence 1900 qui devait correspondre alors à un débit de 130 m³/s :

Tableau 8 : étiage de référence 1900 aux échelles de Chalonnes à Ancenis

Lieu	Chalonnes	Montjean	Ingrandes	St Florent	Ancenis
Abscisse (km)	21.440	30.210	35.134	43.607	56.674
Zéro échelle	11.38	9.57	9.01	7.73	5.51
Cote échelle	-0.24	0	0.08	0.05	0.10
Etiage référence	11.14	9.57	9.09	7.78	5.61
Pente aval x 1000	0.179	0.097	0.155	0.166	-

On remarque que la pente à l'étiage varie peu, sauf dans le court bief Montjean-Ingrandes; la faible pente à l'étiage est ici liée à l'existence d'un seul bras, alors que les autres tronçons sont à bras multiples ou mixtes : on retiendra la valeur moyenne de 0.15 /1000.

2.2.2. Evolution du lit de la Loire de 1900 à 1950

Au cours de cette période, deux sortes d'interventions ont contribué à l'abaissement des niveaux d'étiage :

- La construction des épis et chevrettes de navigation après la 1^{ère} guerre mondiale.

- Après cette même guerre, le creusement en aval d'Ancenis du « bassin de marée », le volume extrait ayant été estimé à 25 millions de m³.⁷

A partir des graphiques de l'étude SHC déjà citée, on peut déterminer jusqu'à 400 m³/s et avec réserves au delà, la valeur des variations des hauteurs aux échelles à débit donné.

Tableau 9 : variation des hauteurs de Chalonnnes à Ancenis : 1900 à 1950

Lieu	Chalonnnes	Montjean	Ingrandes	Saint Florent	Ancenis
Débit 150 m ³ /s	-0.28	-0.46	-	-0.73	-0.94
Débit 250 m ³ /s	-0.10	-0.22	-	-0.50	-0.70
Débit 400 m ³ /s	+0.04	0	*	-0.25	-0.47
Débit 800 m ³ /s	+0.11	+0.15	*	-	0

Nous n'avons pas reproduit les valeurs estimées à Ingrandes, la courbe publiée nous semblant erronée : selon l'étude SHC, l'abaissement à 150 m³/s est de 0.90 m, soit le double de l'abaissement à Montjean, ce qui correspond à un doublement de la pente entre ces deux échelles. En outre on remarque que, après avoir subi un abaissement peu crédible en 1950, les niveaux à Ingrandes s'exhaussent de 1950 à 1960, à l'inverse des stations qui l'encadrent. Pour lever cette incertitude, il suffira de retrouver les hauteurs à l'échelle d'Ingrandes sur l'année 1950 et de les placer en regard des débits journaliers à Montjean.

Les abaissments que nous validons croissent d'amont en aval. On a ici l'addition des deux effets : la construction des épis et chevrettes pour la navigation et l'érosion régressive due au creusement du bassin de marée en aval d'Ancenis dans les années 30. En prenant en compte les données du tronçon amont, il est tentant d'estimer que la part de l'abaissement due aux ouvrages de navigation est de 0.45 m à l'étiage et nulle à 400 m³/s, tandis que l'abaissement dû à l'érosion régressive ne dépend que très peu du débit : on en déduit qu'il aurait été en 1950 nul à Montjean, de l'ordre de 0.25 à Saint Florent et de 0.50 m à Ancenis ; toutefois, cette explication n'est pas certaine, car il est possible que l'incidence des épis ait été en aval de Saint Florent un peu plus importante que dans le tronçon amont, en raison d'une emprise des épis entre Saint Florent et Ancenis plus importante qu'en amont de Montjean.

Comme nous l'avons noté pour l'amont, on rappellera que l'abaissement des fonds a été supérieur à l'abaissement des niveaux en raison du rétrécissement du chenal.

Si nous admettons que les têtes d'épis ont été calées à l'étiage de référence (zéro Montjean), nous pouvons déterminer, sauf à Ingrandes, quelle était approximativement la capacité du bras navigable en 1950.

Tableau 10 – capacité en 1950 sous l'étiage de référence 1900

Lieu	Chalonnnes	Montjean	Ingrandes	St Florent	Ancenis
Etiage de référence	11.14	9.57	9.09	7.78	5.61
Capacité (m ³ /s)	192	210	-	250	320

⁷ C. Migniot P. Le Hir - APEEL Rapport de synthèse : hydro-sédimentaire – 1984-1994

2.2.3. Evolution du lit de 1950 à 2007

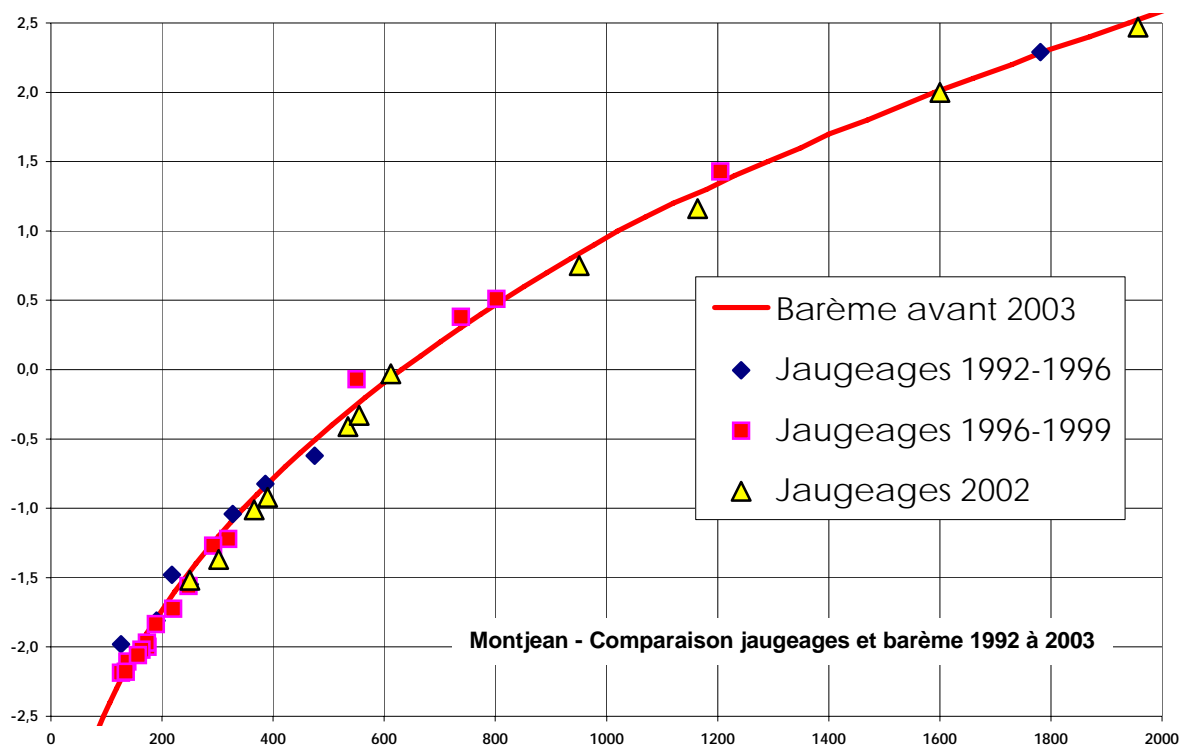
Les forts abaissements constatés au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle sont dus principalement à l'érosion régressive provoquée par l'intensification des extractions dans le bassin de marée entre Ancenis et Nantes de 1950 à 2000. Mais on ne trouve dans les rapports antérieurs que peu de précisions sur ces actions.

Pour effectuer cette analyse, nous avons complété les analyses effectuées lors de l'expertise hydraulique effectuée en juin 1997, laquelle définit les principes de l'expérimentation des épis à radier du Fresne. Les figures reportées en fin de rapport donnent les niveaux observés à Montjean, Ingrandes et St Florent, en fonction du débit journalier à Montjean.

Niveaux à Montjean

Nous avons d'abord ajouté aux données traitées en 1997 les jaugeages effectués au cours des années 1945-1950 et l'estimation de la loi hauteur débit pour l'étiage 1900 présentée par le SHC en 1979. Ces données montrent que l'abaissement en 1945-1950 était dû à l'effet des épis de navigation comme nous l'avons noté en amont de Montjean.

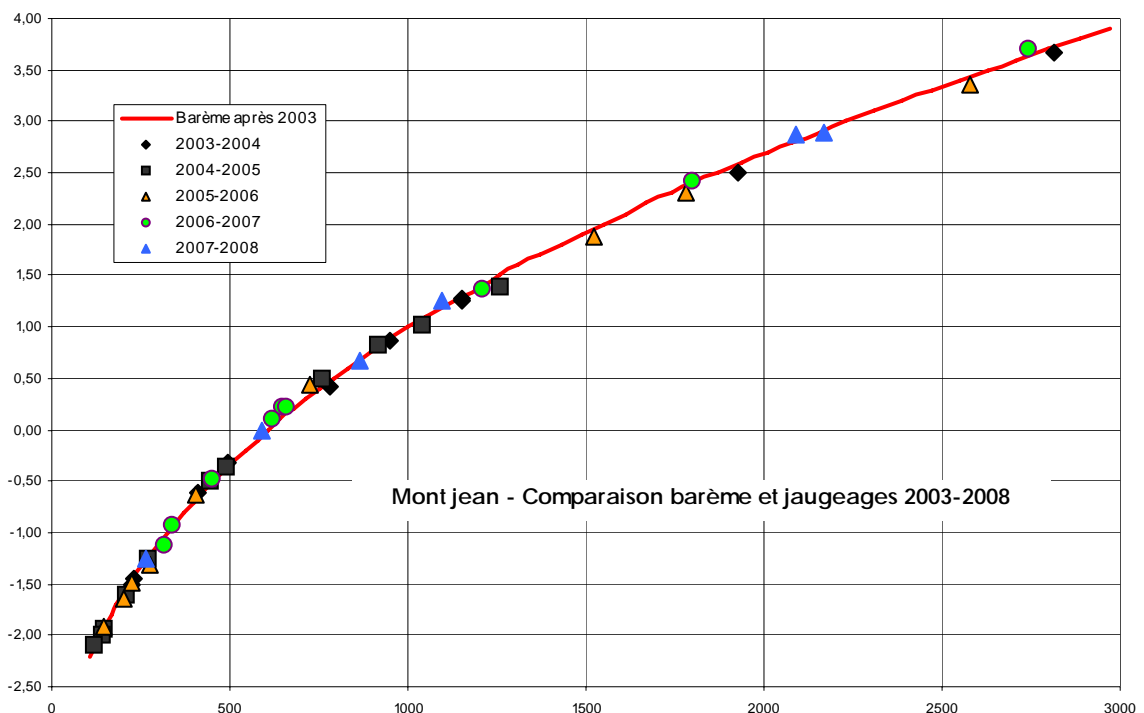
Comme la connaissance précise des débits obtenus à Montjean est essentielle pour déterminer l'impact sur une courte période des épis à radier du Fresne, la DIREN, suite à notre demande, nous a communiqué les barèmes de débit avant et après la construction des épis et la nomenclature des jaugeages utilisés pour construire ces barèmes. Nous avons ainsi deux barèmes, l'un avant et l'autre après 2003. Au vu des jaugeages, la DIREN a en effet jugé possible l'établissement d'un seul barème sur la période 1992-2003. Nous avons superposé les jaugeages et le barème 1992-2003 sur le graphique ci dessous. On voit que, si la courbe passe bien au milieu des points, la datation des données révèle un abaissement des hauteurs à débit donné ; cet abaissement est faible, mais non négligeable pour notre problème et peut fausser l'analyse de l'évolution des niveaux avant et après construction des épis à radier.



Les jaugeages antérieurs à 2000 se situent plutôt au dessus du barème, tandis que les jaugeages 2002 se situent au dessous, l'écart pouvant atteindre 20 cm. Il y a donc eu un lent abaissement des niveaux à Montjean au cours de la période 1992-2002.

Pour remédier à cette difficulté, nous abandonnerons, pour analyser l'impact des épis du Fresne, la méthode par corrélation avec les débits journaliers et nous n'utiliserons pour cette comparaison que les hauteurs et débits mesurés concomitamment lors des jaugeages.

Pour la période 2004-2008 postérieure à la mise en service des épis, nous avons également superposé le barème et les jaugeages : la comparaison ne révèle aucune dérive et offre une qualité remarquable en regard des jaugeages ; le tracé des relations hauteur débit par corrélation des hauteurs observés avec les débits journaliers reste possible pour cette période.



L'exploitation des débits des barèmes en 1996 et 2007 sur le graphique général montre que les hauteurs à débit donné sont :

- majorées en 2007 jusqu' à 500 m³/s,
- minorées en 2007 au delà de 600 m³/s.

L'écart entre les deux périodes diminue lorsque le débit augmente.

L'analyse approfondie de l'impact des épis à radier sur l'évolution des niveaux et des fonds est présentée au paragraphe 2.3.

Niveaux à Ingrandes

Cette analyse est moins développée que la précédente, en raison de l'incertitude sur le calage de l'échelle d'Ingrandes en 1900 et en 1950.

Entre 1976 et 1996, l'évolution des niveaux est à Ingrandes très semblable à celle observée à Montjean, ce qui s'explique par la faible distance et donc la faible dénivelée.

Entre 1996 et 2007, le relèvement des niveaux est plus élevé en basses eaux, environ 0.40 m à Ingrandes et la moitié à Montjean. On constate également un abaissement des niveaux aux débits supérieurs à 600 m³/s. L'atténuation du remous vers l'amont et la tendance à l'abaissement aux forts débits font penser que les fonds ne se sont pas ensablés

à l'amont des épis à radier : mais la comparaison des fonds reste nécessaire pour apprécier l'impact de ces épis.

Niveaux à St Florent

A partir des corrélations, nous avons représenté sur le graphique les couples de valeurs hauteur débit de 1950 à 2007. A première vue, nous constatons que les niveaux à débit donné ont encore baissé entre 1996 et 2007, sauf en deçà de 200 m³/s, où ils sont restés stables. L'écart atteint environ 20 cm ; mais il est possible qu'une partie de l'écart soit due à la dispersion des jaugeages du barème 1996-2003 décrite ci dessus, notamment entre 600 et 1200 m³/s. On peut alors dire qu'aucune tendance au relèvement des fonds ne se manifeste à Saint Florent, mais que la vitesse d'abaissement est ralentie, de l'ordre 1 à 2cm/an et seulement autour de 800 m³/s.

Niveaux à Ancenis

Lors de l'expertise de juin 1997, nous avons estimé que les niveaux à l'étiage de 150 m³/s avaient baissé surtout avant 1982, atteignant une valeur de 2.50 m à cette date et que l'évolution s'était ensuite ralentie. Ce constat reste vrai en 2007, mais nous avons entre temps modifié notre méthode de comparaison, en raison de l'incidence de plus en plus sensible de la marée en ce point. La comparaison des niveaux doit tenir compte de l'incidence de la marée et donc être établie à partir des données marégraphiques.

Pour cette raison, l'analyse de la station d'Ancenis sera détaillée de 1995 à 2007 au chapitre 3 en même temps que pour les autres marégraphes situés en aval.

2.3. Analyse de l'expérimentation des épis à radier

2.3.1. Rappel des buts et principes de l'expérimentation

L'abaissement des niveaux de la Loire a posé à Ingrandes dans les années 1990 le problème du relèvement de l'étiage pour l'alimentation de la boire de Champtocé. Parallèlement, l'étude prospective de la Loire estuarienne s'est attachée à déterminer l'impact de diverses actions concourant au soutien et au relèvement des étiages.

Dans ce contexte, l'expertise qui nous a été confiée en 1997 a proposé la mise en œuvre d'ouvrages expérimentaux appelés « épis à radier ». On remarquera que la dénomination d'épi à radier a été remplacée avec le temps par le terme de « seuil à échancrure » ; nous suggérons d'abandonner ce terme qui privilégie la fonction seuil, alors que la fonction de base est celle d'un épi.

Le but premier de ces ouvrages, projetés à la limite des communes d'Ingrandes et du Fresne, était d'obtenir un relèvement des niveaux d'étiage au débouché de la Boire de Champtocé. Mais l'analyse qui justifiait notre proposition offrait un caractère général à partir d'un diagnostic qu'il n'est pas inutile de rappeler :

La combinaison des effets des épis de navigation et des extractions de matériau en basse Loire a conduit à des enfoncements des niveaux d'étiage spectaculaires pour un fleuve de faible pente. Mais on remarque tout aussitôt que l'abaissement des niveaux décroît fortement lorsque le débit augmente.

L'extraction des matériaux a vu ses effets localisés par la présence des épis de navigation : ceux ci ont dans une large mesure limité l'enfoncement des plages, au détriment de l'enfoncement du niveau d'étiage.

Il est alors nécessaire de s'interroger sur l'évolution morphologique du lit de la Loire.

Les épis de navigation n'accentuent-ils pas l'effet des extractions ? En contenant l'érosion des bras non navigables, ont-ils accentué l'érosion des bras navigables ?

Inversement, l'érosion des bras navigables ne peut-elle pas provoquer une moindre mobilité des alluvions composant les bras non navigables ? Ne risque-t-on pas pour les bras les plus mal alimentés une atrophie conduisant à une remontée relative du niveau des crues ?

Malheureusement les données bathymétriques dont nous avons disposé ne permettent pas d'expliquer suffisamment le comportement des bras non navigables et des plages placées à l'abri des épis. Nous ne savons pas sûrement si ces plages sont restées stables ou si elles se sont un peu abaissées.

Mais, de toute façon, notre constat démontre que le problème de l'évolution des fonds ne peut être traité sous le seul angle de l'évolution d'un fond moyen, comme le font les modèles et calculs unidimensionnels de transport solide. C'est l'ensemble du profil en travers et l'évolution de son modelé qui doit être étudié.

Pour relever le niveau d'étiage, l'aménagement de la section répondra à deux objectifs :

- *Rechercher les moyens de remobiliser les matériaux des bancs et des bras non navigables pour assurer le relèvement des étiages.*
- *Accélérer le dépôt des apports solides amont, de manière à accélérer le relèvement recherché.*

Rappelons aussi les principes d'action envisagés alors pour favoriser la remontée des niveaux et des fonds dans le bras navigable :

- a. *Abaisser la cote des épis restés trop élevés en regard de l'abaissement des lignes d'eau, de façon à remettre en mouvement les matériaux situés à l'ombre des épis.*
- b. *Augmenter la largeur du chenal navigable, mais seulement dans les zones où le problème du tirant d'eau de navigation ne se pose pas.*
- c. *Admettre des érosions de berge, dans les zones où cette érosion ne crée pas de nuisance majeure.*
- d. *Corriger les effets nuisibles des épis de navigation par la mise en œuvre d'épis à radier.*
- e. *Creuser des chenaux pilotes et déposer les matériaux dragués dans le bras navigable, pour amorcer l'érosion des bras ensablés.*

Les épis à radier ont pour fonction première la création d'une perte de charge relevant les niveaux à l'amont : cette perte de charge résulte de l'accroissement des vitesses provoqué par l'effet du rétrécissement entre les épis placés en vis à vis. La cote du lit entre épis est celle du lit naturel peu ou non modifié en altitude, mais revêtu en enrochements pour empêcher l'érosion due à la sur vitesse.

La perte de charge est proportionnelle au **carré de la différence des vitesses** dans le rétrécissement et en aval ⁸; on dit alors que l'écoulement est noyé par l'aval, c'est à dire influencé par l'aval. La perte de charge est donc d'autant plus forte et la remontée de l'étiage en amont d'autant plus forte que la vitesse est grande dans le rétrécissement.

Pour un débit donné écoulé dans le bras, la vitesse sur l'épi à radier est fonction du niveau aval et de la géométrie du radier et des épis. Mais trois contraintes déterminent la vitesse maximum dans le rétrécissement :

- La contrainte piscicole concernant principalement la remontée des migrateurs.

⁸ Nous raisonnons ici dans une fourchette de dénivelées amont aval modeste, ce qui exclut le cas de l'écoulement dénoyé, c'est à dire déterminé par le seul niveau amont.

- La contrainte de navigation, vitesse maximum à ne pas dépasser pour les embarcations les moins motorisées; cette contrainte n'intervient que jusqu'aux PHEN (plus hautes eaux navigables).
- La contrainte d'inondation : elle ne joue que pour les fortes crues, pour un débit normalement déduit des PPRI (plan de prévention du risque inondation) : l'ouvrage ne doit pas aggraver le risque inondation.

Seule la contrainte de navigation a vraiment été considérée, car elle est apparue la plus contraignante. La contrainte inondation a été considérée de manière qualitative en limitant la hauteur des épis, mais en fait n'existe pas dans le cas présent, comme on le verra plus loin.

La vitesse maximum a été fixée à 2.50 m/s par le Service Maritime et de Navigation ; nous en avons déduit qu'un ensemble épis-radier créerait une perte de charge de 0.25 m.

La réalisation d'un ou plusieurs épis à radier ne constituait qu'une partie d'un aménagement progressif : cet aménagement doit normalement être poursuivi, notamment avec l'arasement ou le recul des épis. Pour que l'interprétation du suivi de l'aménagement conduise à des résultats probants et dénués d'ambiguïté, il a été suggéré de ne réaliser dans un premier temps que les épis à radier.

2.3.2. Réalisation des ouvrages

Deux épis à radier en série ont été implantés l'un à l'entrée de l'île Meslet, l'autre à 500 m en aval. Les travaux se sont étalés sur deux saisons, de juillet à octobre 2002 et de juin à octobre 2003. Mais le fonctionnement des ouvrages a soulevé des critiques et posé plusieurs problèmes.

Les critiques

La première critique concerne l'apparence de l'ouvrage : dans le but de donner un caractère réversible à l'expérimentation, le Maître d'ouvrage a préconisé une couverture en matériau composite à la place des enrochements classiquement utilisés en Loire. Ce choix est assez catastrophique au niveau de l'esthétique ; des épis en enrochements se seraient beaucoup plus facilement intégrés au paysage.

Ajoutons que ce choix est en contradiction avec la nécessité de prévoir des modifications de la géométrie de la brèche en fonction des observations effectuées. L'une des clés de la restauration du lit de la Loire est la progressivité des interventions et cet aspect a été oublié lors de la construction des épis à radier. Enfin il apparaît aujourd'hui que le revêtement est fragile et qu'un renforcement sera nécessaire : nous pensons qu'une décision de conservation de l'ouvrage devra être associée à la mise en oeuvre d'enrochements classiques sur le corps des épis.

La deuxième critique concerne la remontée des bateaux faiblement motorisés. Des essais ont été effectués avec plusieurs embarcations le 22 octobre 2003 juste après l'achèvement de l'ouvrage.

Pour un débit de 230 m³/s, il a été mesuré sur le seuil aval une vitesse de 2.2 m/s et sur le seuil amont 2.6 m/s. La remontée contre courant n'a pas posé de problème pour l'épi aval ; en revanche le passage a pour certains bateaux été difficile, voire impossible pour un seul bateau, faiblement motorisé.

Cette expérimentation appelle plusieurs remarques : on observe que la vitesse limite a été en moyenne observée, mais que les deux seuils présentent une différence de comportement : il aurait été assez facile de corriger ce résultat en rechargeant légèrement l'épi aval, mais la structure des épis rend cette action difficile.

A ce stade de notre réflexion, il faut remarquer que le choix de la vitesse de fonctionnement sur un épi à radier ou sur tout ouvrage assurant la même fonction ne peut être que le résultat d'un compromis entre l'efficacité recherchée pour cet ouvrage et la contrainte qui en résulte pour la navigation et la remontée des migrateurs. Refuser le compromis, comme il est souvent constaté lors de la contestation des projets présentant un impact environnemental ne peut que conduire à l'inaction.

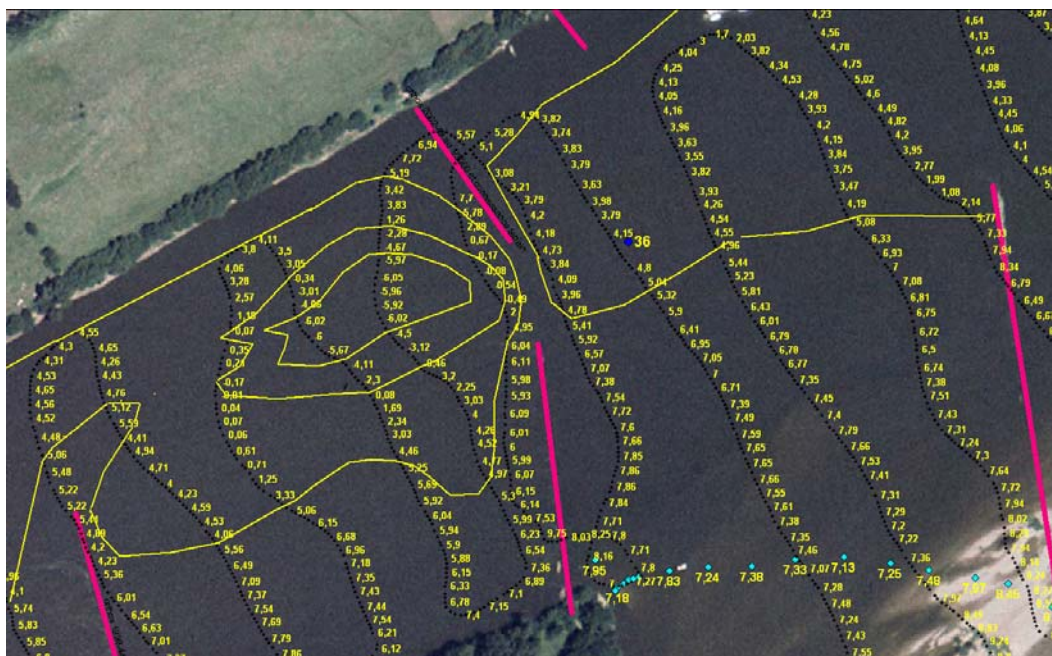
Les problèmes

L'érosion de la rive gauche sur l'île Meslet le long de l'ouvrage est intervenue dès la mise en service. Elle résultait de l'absence de la protection de berge dont nous avons dit la nécessité lors de notre expertise : « *Sur les berges, on réalisera une protection de part et d'autre de l'épi dans le but d'éviter la dégradation des ancrages.* »

Nous avons également prévu la formation d'une fosse d'affouillement en aval des épis, dans les termes suivants : « *La formation d'une fosse d'affouillement en aval dans l'axe du chenal est prévisible et il ne faut pas l'empêcher, mais seulement éviter l'érosion de la bêche aval qu'elle peut entraîner. On évitera cette érosion en mettant en place une réserve en aval de la bêche constituée de matériaux 100-300 mm. Cette réserve offrira un volume de 5 m³ [au mètre linéaire] avec une épaisseur de 1 m et une longueur de 5 m. Cette réserve sera placée sur une largeur de 80 m dans l'axe du chenal.* »

Ce moyen ou un autre équivalent a-t-il été mis en œuvre ? L'examen des plans d'exécution ou de recolement pourrait le montrer.

La fosse d'affouillement constatée dès la mise en service de l'ouvrage n'est pas située dans l'axe, mais décalée vers la rive droite ; cette tendance à la dissymétrie des jets à la sortie d'une contraction de l'écoulement est fréquente, mais elle a été accentuée ici par le délai de réalisation de l'épi amont, qui a permis le creusement du lit en rive droite, l'épi n'étant pas construit sur cette rive au cours de l'hiver 2002-2003.



Fosse d'affouillement à l'aval de l'épi à radier amont en février 2006

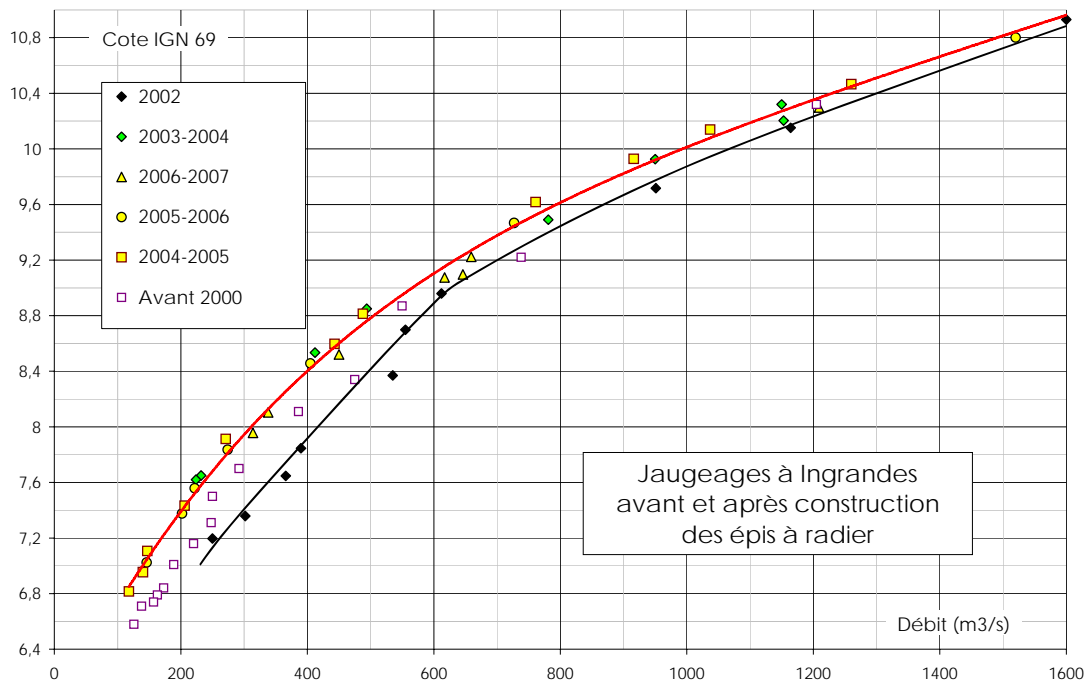
Un cubage approximatif des fosses constatées montre que le volume déplacé par le creusement de la fosse était d'environ 120 000 à 150 000 m³ en février 2006 ; la profondeur maximum de la fosse était d'environ 10 m, soit : -6.0 IGN 69.

Un relevé effectué, semble-t-il, en août 2005 montre une cote maximum limitée à -3.0 IGN 69 ; cette profondeur est moindre, mais elle est observée plus près du radier de l'ouvrage et donc plutôt plus dangereuse pour sa stabilité.

2.3.3. Evolution des niveaux de part et d'autre des épis à radier

2.3.3.1. Niveaux aux stations

Comme nous l'avons annoncé précédemment, nous préciserons l'incidence des épis à radier en partant d'un état de référence déterminé par les jaugeages effectués en 2002 juste avant le début des travaux. Les données postérieures à la mise en service s'échelonnent de novembre 2003 à 2008 et donnent donc une image de l'évolution des niveaux qui complète le suivi, celui-ci ayant été arrêté à la fin 2006.

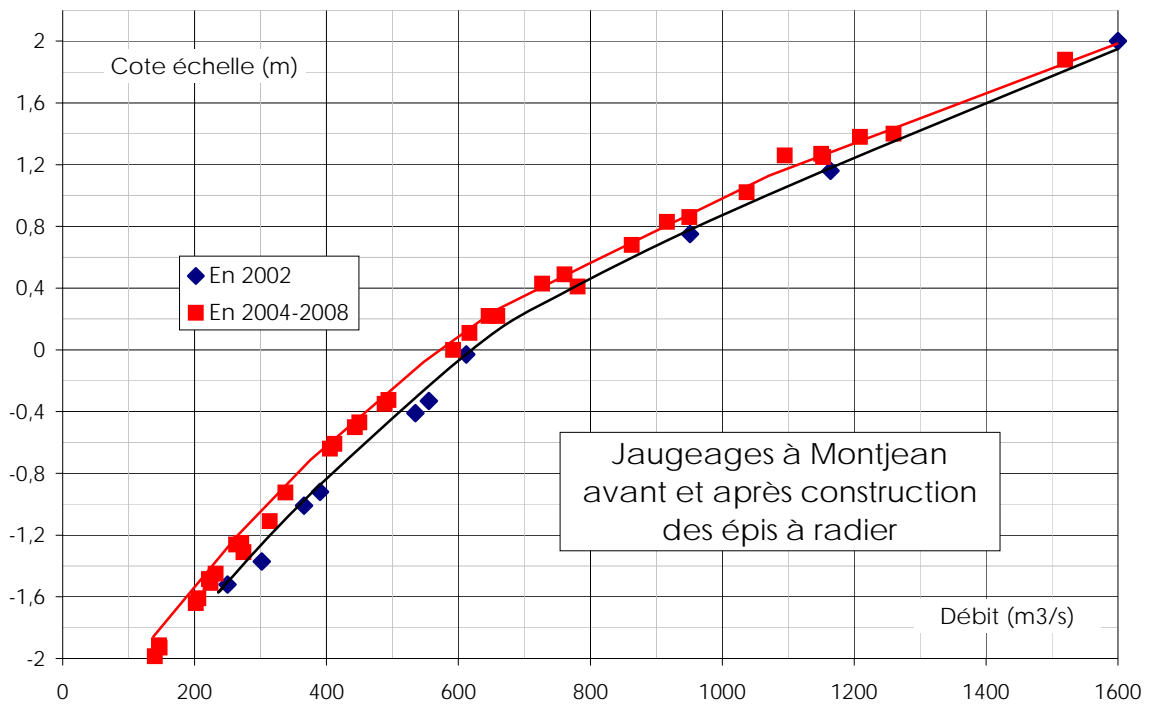


Nous donnons sur le graphique ci dessus les valeurs des débits jaugeés et les cotes concomitantes à Ingrandes en 2002 d'une part et de 2004 à 2008 d'autre part.

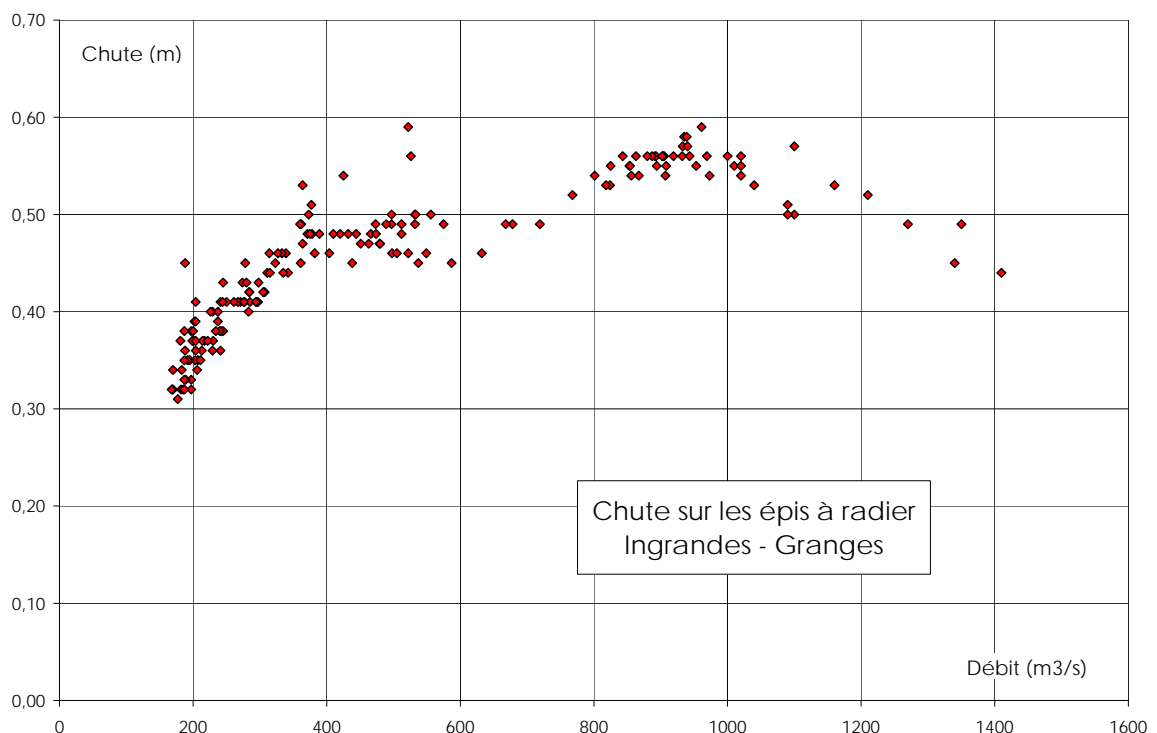
On observe ainsi que l'effet des épis à radier sur les niveaux à Ingrandes est bien de l'ordre de 0.50 m en étiage. L'effet s'atténue à partir de 300 m³/s, en raison de l'alimentation du bras de Cul de Bœuf ; en 2002 il apparaît que cette alimentation du bras ne débutait qu'au delà de 500 m³/s.

L'incidence sur les niveaux décroît ensuite ; elle n'est plus que de 5 cm à 1600 m³/s ; c'est pourquoi, du fait de l'abaissement intervenu avant la construction des épis, on observe de 1996 à 2007 plutôt un abaissement des niveaux en amont aux forts débits.

Le même graphique est présenté pour l'échelle de Montjean ; la tendance est la même, mais le remous (surélévation) n'est que de 20 cm en basses eaux. En revanche, il s'atténue moins en hautes eaux, ce qui peut être dû à la moindre variation de la section à ce régime, mais aussi à une modification de la géométrie du lit entre Ingrandes et Montjean.



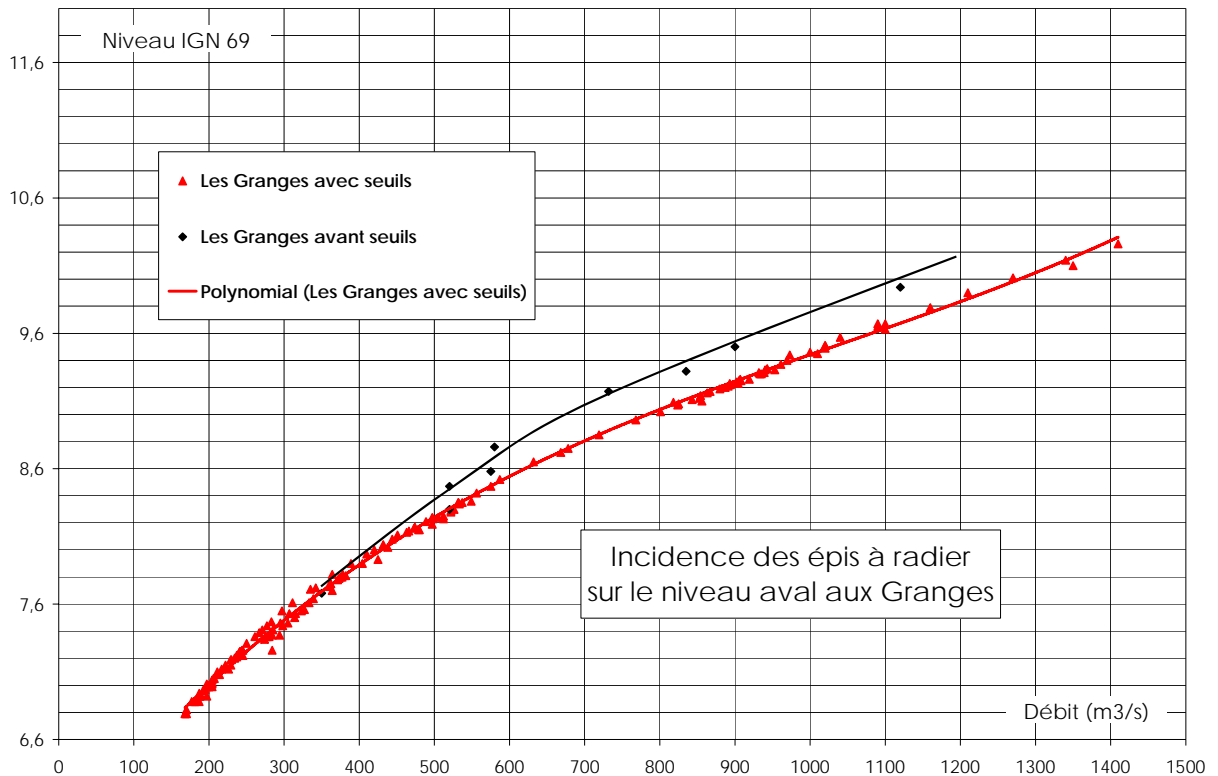
L'implantation d'un limnigraphe aux Granges en aval des épis à radier, n'a été faite qu'après la mise en service de ces épis. Elle permet de prendre la mesure de la dénivelée de part et d'autre de ces épis, en notant toutefois qu'une fraction de cette dénivelée correspond à la pente de l'écoulement « naturel ».



D'autre part, il faut associer à ce graphique le constat de la variation des niveaux à débit donné dans le bras nord ; cette variation peut être due à la modification des fonds, mais elle

est déterminée principalement par la perte de débit provoquée par la « suralimentation » du bras de Cul de Bœuf. Le graphique suivant décrit cette variation.

Cette analyse est effectuée en comparant les hauteurs relevées manuellement aux Granges avant la construction des épis et les relevés du limnigraphe. Les débits pris en compte sont avant la construction calculés à partir des jaugeages 2002, tandis que les débits postérieurs résultent du barème DIREN 2004-2008.



On remarque que la variation est faible ou nulle en basses eaux, jusqu'à ce que commence l'alimentation du bras de Cul de Boeuf ; vers 800 m³/s, l'abaissement plafonne à 35 cm. Il faut remarquer que les niveaux n'ont été lus aux Granges que jusqu'à septembre 2004, soit moins d'un an après la mise en service de l'ouvrage. Il serait nécessaire de connaître aujourd'hui l'évolution des cotes.

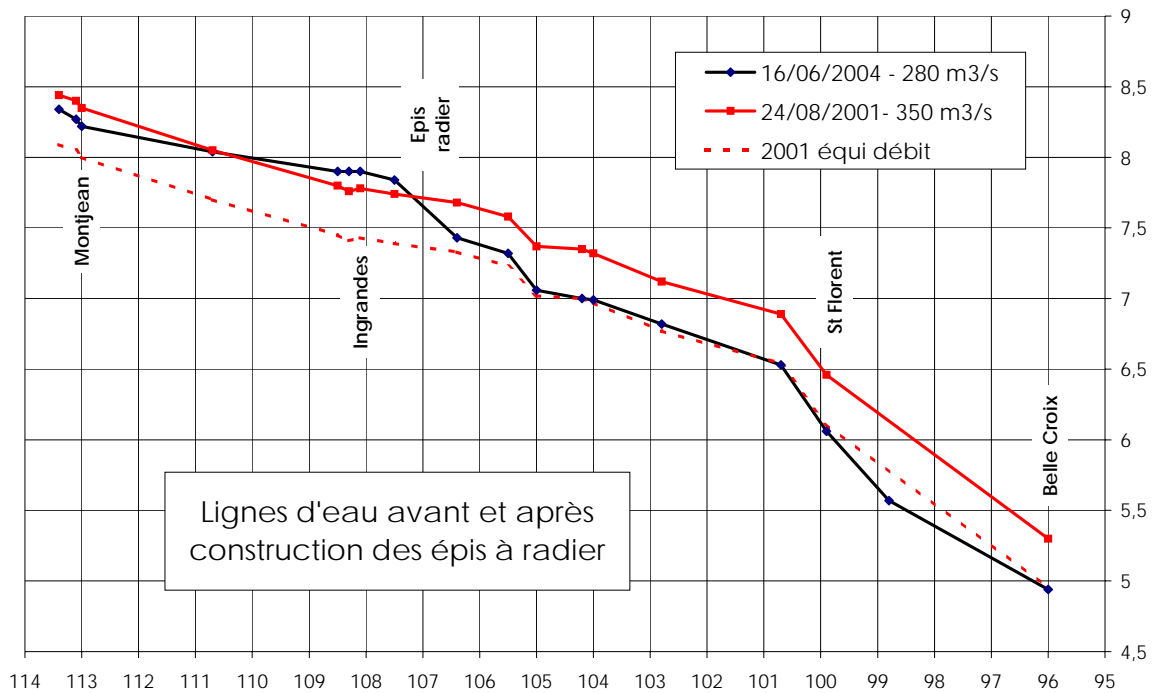
2.3.3.2. Analyse du profil en long de la ligne d'eau

De nombreuses lignes d'eau ont été observées de Montjean à Belle Croix en aval de Saint Florent ; ces mesures sont intéressantes pour nous si nous pouvons comparer des lignes d'eau à des débits très voisins. Ce n'est malheureusement pas le cas : toutes les lignes d'eau antérieures à la mise en service sont observées au dessus de 300 m³/s et toutes les mesures postérieures sont observées en deçà de 300 m³/s.

Nous ne disposons en fait que de deux lignes d'eau, l'une datée du 24 août 2001 pour un débit estimé de 308 m³/s à partir du barème DIREN, l'autre datée du 16 juin 2004 pour un débit de 280 m³/s estimé à partir du barème 2003-2008. Nous devons donc corriger le débit de 2001 à partir des jaugeages effectués alors, ce qui donne une valeur de 350 m³/s environ.

Sur le graphique ci après, nous avons représenté les lignes d'eau observées le long du chenal navigable. Pour visualiser l'effet des épis à radier, nous avons décalé la ligne d'eau 2001 d'une hauteur constante (trait pointillé) de façon à obtenir une ligne d'eau à cette époque

proche de celle qui aurait été observée à 280 m³/s. On visualise ainsi approximativement l'effet de l'ouvrage en étiage.



De ce profil, nous déduisons que, un an après la mise en service des épis à radier, il n'y a pas eu en basses eaux de modification notable de la ligne d'eau en aval de l'île Meslet. En amont de l'île Meslet le remous de 0.50 m décroît progressivement : il ne semble pas qu'il y ait eu de sédimentation en amont susceptible de prolonger vers l'amont la surélévation.

2.3.3.3. Distribution des débits entre bras nord et bras sud

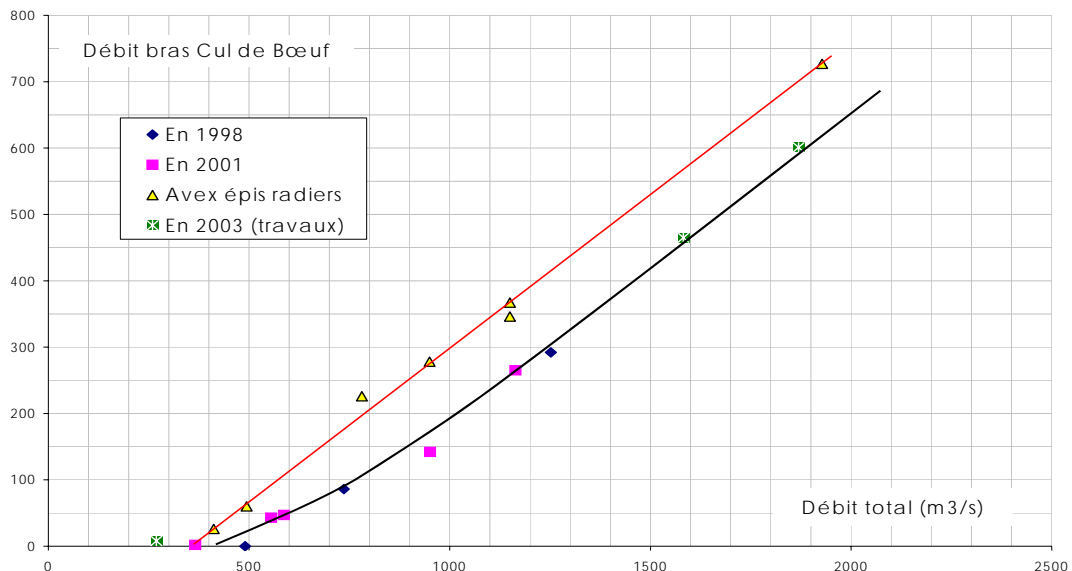
Nous reproduisons ci dessous le tableau de répartition des débits obtenu à partir des jaugeages effectués au cours du suivi. Les valeurs en rouge marquées d'un astérisque sont des valeurs calculées.

Tableau de synthèse des données disponibles depuis 1998

Date	Cote (m) à l'échelle de Montjean-sur-Loire	Répartition des débits (m ³ /s)					
		Montjean-sur-Loire	Ingrandes	Ile Meslet		Ile Batailleuse	
				Bras navigable nord	Bras de Cul-de-Bœuf	Bras navigable sud	Bras rive droite
12/03/1998	0,57	783	736	650	86*	355	380
08/04/1998	1,56	1250	1252	960	292	740	710
04/06/1998	-0,43	490	490	490*	0*		
19/08/1998	-2,22	126	126	126*	0*	107*	19*
15/06/2001	-0,11	614	587	540	47*		242
29/01/2002	0,73	908	951	809	142*	421	530
11/03/2002	1,18	1110	1164	927	265	479	687
11/04/2002	-0,34	525	555	512	43*	287	239
21/06/2002	-1,06	334	366	365	2*	233	140
25/06/2002	-1,32	278	302	302*	0*	201	101*
17/07/2002	-1,53	237	250	250*	0*	181	69*
14/01/2003	2,35	1820	1869	1256	601	674	1174
29/01/2003	1,89	1530	1582	1124	465	599	965
17/06/2003	-1,27	289	269	261	8*	197	72*
02/09/2003	-1,94	168	160	160	0*	134	26*
25/11/2003	-0,61	446	412	386	26*	249	162
04/12/2003	1,23	1140	1150	786	367*	477	676
08/12/2003	2,46	1950	1928	1231	727	682	1230
23/03/2004	1,29	1160	1150	804	346*	483	688
30/03/2004	0,86	960	950	672	278*	425	524
18/05/2004	0,35	768	781	555	226*	366	415*
27/05/2004	-0,32	533	494	434	60*	284	211

Nous constatons que les jaugeages n'ont été effectués sur le site de l'expérimentation que jusqu'en mai 2004, soit seulement 7 mois après la mise en service des épis.

Un seul jaugeage a été réalisé dans le bras de Cul de Bœuf un mois après la mise en service au débit total de 1950 m³/s ; les autres débits dans ce bras sont obtenus par soustraction et donc imprécis pour les faibles valeurs.



N

Nous ne pouvons donc tirer de conclusion en ce qui concerne l'évolution avec le temps de la capacité du bras de Cul de Bœuf. Une série de jaugeages dans la fourchette 250-1500 m³/s devrait donc être rapidement réalisée afin d'affiner l'analyse de l'impact des épis à radier.

2.3.4. Evolution des fonds : première analyse

L'analyse de l'évolution des fonds a été réalisée en deux temps :

- Nous rappellerons tout d'abord une première analyse présentée dans la version provisoire du rapport de mai 2009.
- Le paragraphe suivant présentera une deuxième analyse complémentaire de la première, rédigée à partir des données et interprétations qui nous ont été transmises fin septembre 2009.

La première analyse a été effectuée à partir de données incomplètes, profils en travers ou bathymétries partielles :

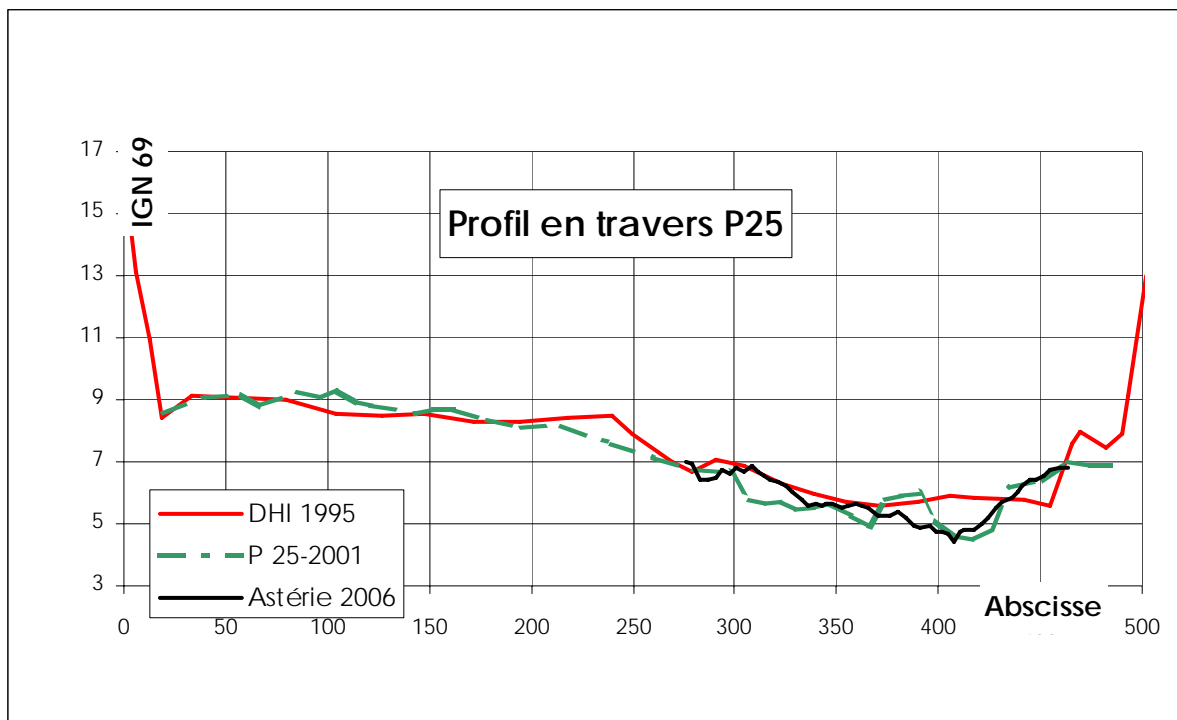
- La seule bathymétrie générale en présence des épis exploitée alors a été réalisée en février 2004, soit 3 mois seulement après leur mise en service. Cette bathymétrie a été en outre limitée en amont au pont d'Ingrandes.
- Les données obtenues après 2004 se limitaient à un levé de 2006 sur le bras navigable entre Ingrandes et la sortie de l'île Meslet et à deux levés de profils en travers effectués par Astérie, également en 2006.

Ces maigres données ont permis toutefois les observations suivantes :

2.3.4.1 Entre Ingrandes et Montjean

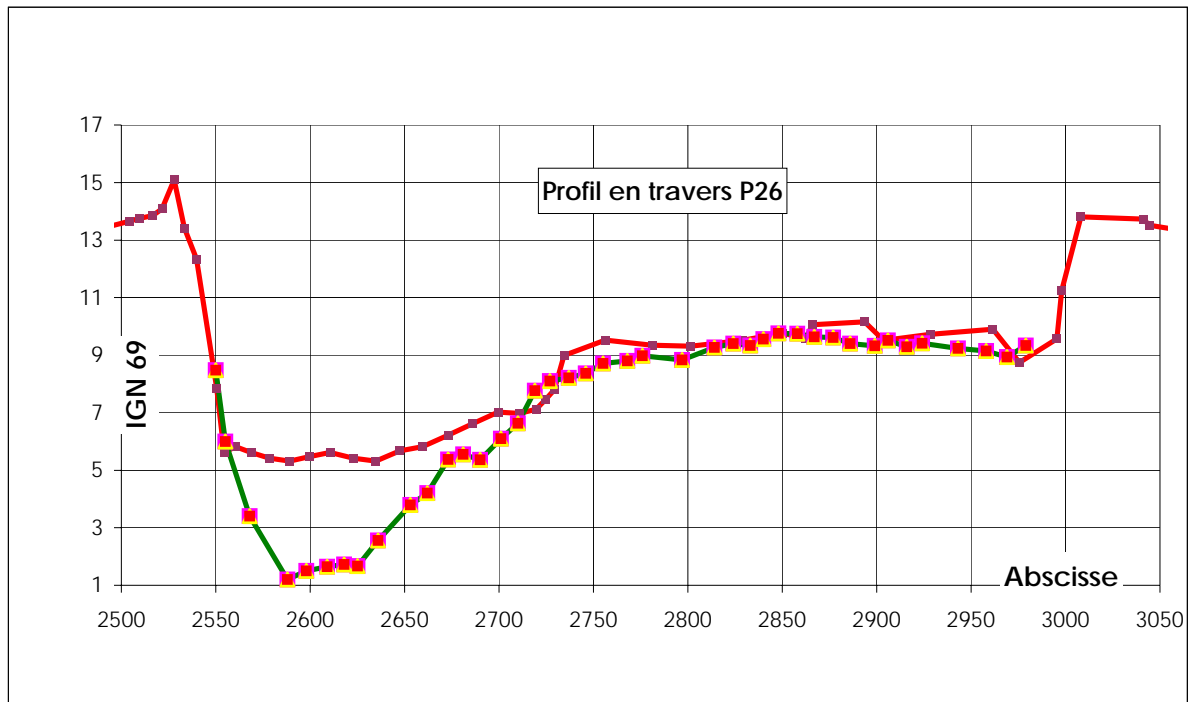
Au profil 25 (km 31.62) à 1400 en aval du pont de Montjean, sur l'implantation du profil DHI 1995, nous disposons des sondes 2001 et du profil 2006 (Astérie).

On remarque que le fond du chenal s'est abaissé d'environ 0.4 m entre 1995 et 2001 ; le levé Astérie de 2006 montre une très faible tendance à l'exhaussement.



Nous n'avons pas exploité le profil 1998 Hydro-expert, les coordonnées n'étant pas fiables. On remarque que la granulométrie du lit était en 1998 plus grossière qu'en 2006, ce qui peut s'expliquer par le tri granulométrique causé par le déficit de l'apport consécutif à

l'exploitation de la sablière de St Georges ; ce déficit serait la cause de la tendance à l'incision. A l'inverse la finesse des sables prélevés en 2006 peut correspondre à un nouvel apport superficiel.



Avec le profil DHI 1995 suivant P26 (km 33), à 1400 m du précédent, nous n'avons pas de mesure postérieure à la mise en service, mais nous avons un exemple de la difficulté de l'interprétation de l'évolution du fond.

De 1995 à 2001, le lit s'est approfondi de 4 m et la section a augmenté à niveau donné de 275 m². Une petite partie de cet approfondissement peut être due à l'incision notée en amont, mais la cause principale ou plutôt les causes principales sont tout autres. La première cause est l'écart des débits lors du levé : faible et précédé par l'étiage d'été en 1995, le débit en sortie de l'hiver est supérieur à 2000 m³/s lors du levé de mai 2001.

La deuxième cause est la présence de la « mouille » en rive gauche et sa fixation au droit d'une avancée de 60 à 70 m de la levée de rive gauche ; cette fosse est fluctuante : elle se creuse lorsque le débit croît et se bouche lorsqu'il décroît.

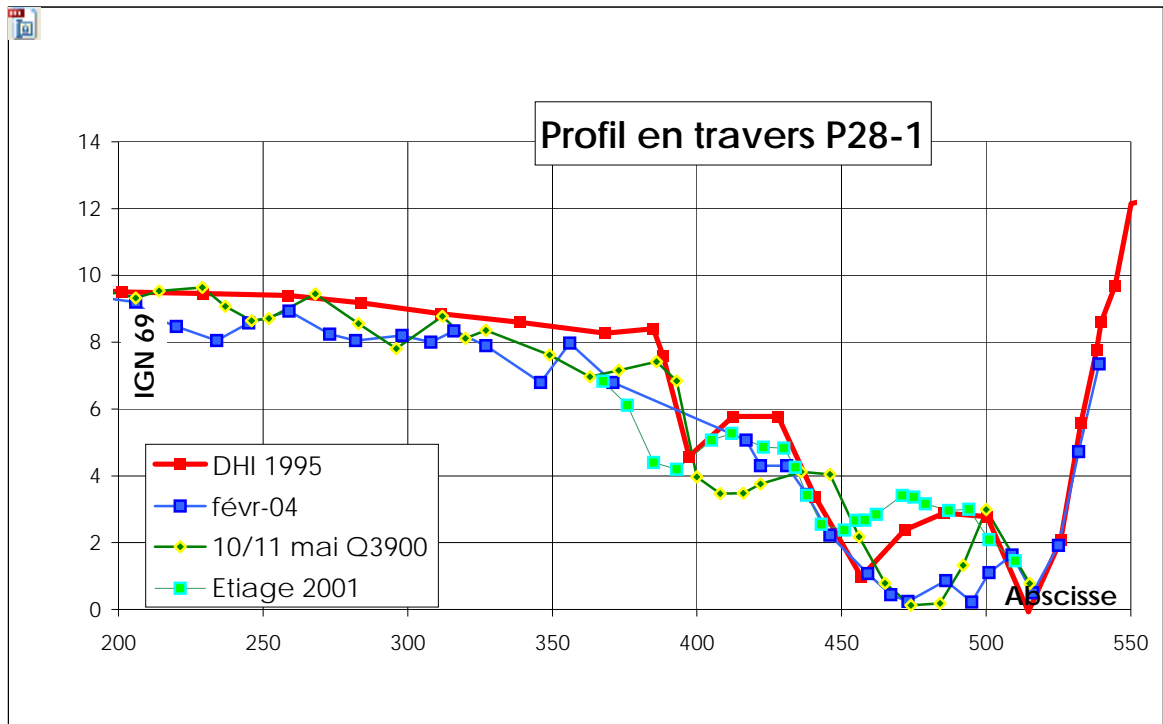
Ce cas extrême illustre la difficulté d'apprécier l'évolution des variations modérées des fonds de Loire ; la variation temporelle des fonds est due à la fois au déplacement des bancs et à l'action des singularités fixes telles que ponts, épis, défluences. L'observation des points singuliers et la prise en compte des variations de débit permettent d'éviter les erreurs de comparaison des profils en travers, notamment dans les mouilles.

Ceci étant, nous observons que de 1995 à 2001, le fond au profil 27 (km 33.722) a baissé de la même quantité qu'au profil 25, ce qui correspond à un abaissement du fond moyen de 0.40 m.

Nous avons ainsi des preuves concordantes de l'abaissement du lit entre Montjean et Ingrandes avant 2003. L'information sur l'évolution des fonds après 2003 est en revanche trop ponctuelle et le levé d'une nouvelle bathymétrie s'impose.

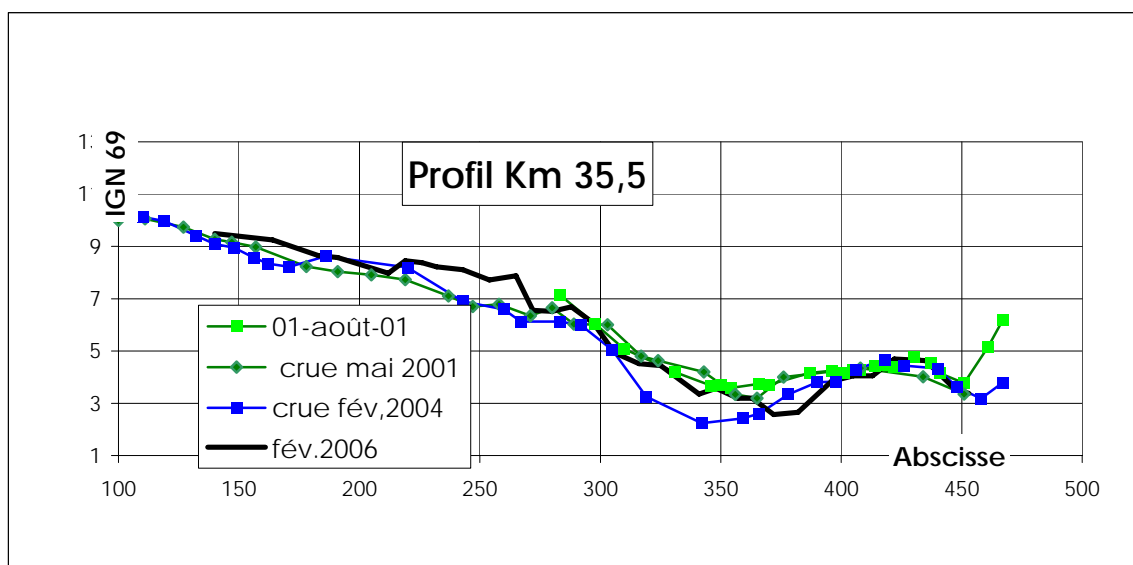
2.3.4.2 En aval d'Ingrandes : bras navigable

Situé en aval du pont d'Ingrandes, le profil 28-1 (km 34.985) donne un exemple de l'incidence du point singulier que constitue le pont.



En mai 2001 et février 2004, les obstacles constitués par le quai et les appuis ont créé des turbulences qui tendent à creuser irrégulièrement le lit. En revanche les basses eaux ont formé un atterrissage temporaire dont la géométrie est fonction des dépôts accumulés pendant les crues en amont du pont. L'évolution des fonds liée à la variation des débits est ici supérieure aux évolutions attendues de la réalisation des épis à radier.

Au km 35,5, nous avons comparé les sections de 2001 (mai et août), le levé lors de la crue de février 2004 et le levé de février 2006.



Les fonds sont les plus bas en 2004 et les plus élevés sont observés en 2001, aussi bien en étiage qu'en crue. Le chenal navigable est en 2006 plus profond qu'en 2001 et a fortiori en 2004, ce qui pourrait provenir d'un accroissement du débit écoulé dans le bras de Cul de

Bœuf. Le banc de rive gauche entre épis est plus élevé en 2006 qu'auparavant, et donc globalement la section 2006 n'est pas plus basse que la section 2001. On peut penser que les points bas du bras de Cul de Bœuf sont plus bas et que les dépôts sur la convexité s'en trouvent majorés. Mais ces données ne peuvent suffire à le prouver.

2.3.4.3. Bras nord aval seuils

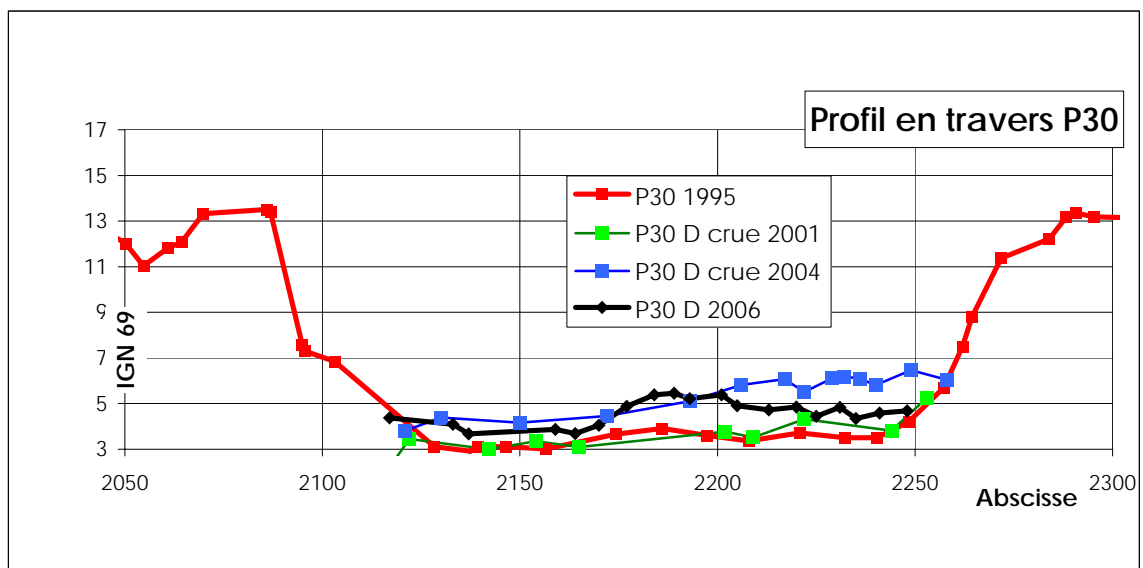
Les facteurs qui peuvent influencer l'évolution des fonds sont nombreux : tout d'abord les débits sont diminués, débit liquide d'abord, mais aussi peut être débit solide, la géométrie de la défluence maintenant l'alimentation préférentielle en sable du bras de Cul de Bœuf.

Mais aussi la pente est réduite, en raison de la diminution du débit sans que pour autant le niveau baisse à la pointe aval de l'île Meslet.

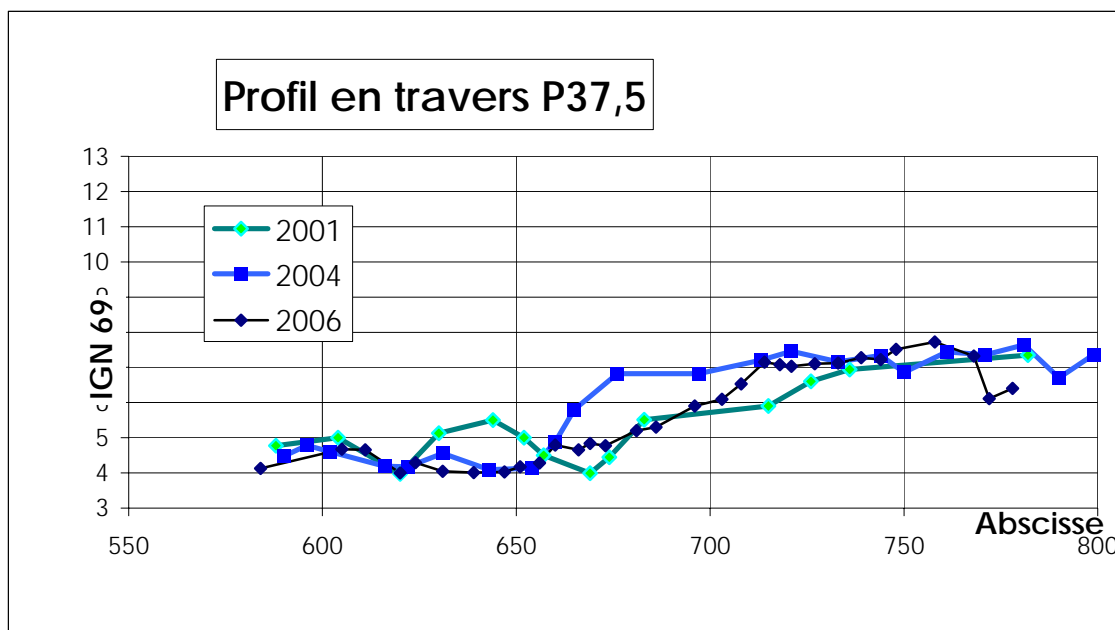
La formation des fosses d'affouillement en aval des épis à radier peut peser lourd dans l'équilibre des fonds : il est probable qu'une seule crue a suffi pour emporter les 100 000 à 150 000 m³ de sable provenant de la fosse d'affouillement ; mais cet apport ne s'est produit qu'une seule fois et les variations de volume qui se produisent entre l'étiage et la crue ne représentent qu'une fraction du volume total de la fosse.

La comparaison des fonds en aval des fosses aux différentes dates a été faite à quatre profils en travers.

Au profil P30 (km 37.084), situé à 500 m de l'épi aval, les fonds 1995 et 2001 sont sensiblement identiques. En février 2004, le lit s'est ensablé sur 1 à 2 m, soit une diminution de section à niveau donné de l'ordre de 200 m². Entre 2004 et 2006, le lit se creuse à nouveau. Cet abaissement est lié au caractère transitoire de l'onde de sable provenant de la fosse d'affouillement.

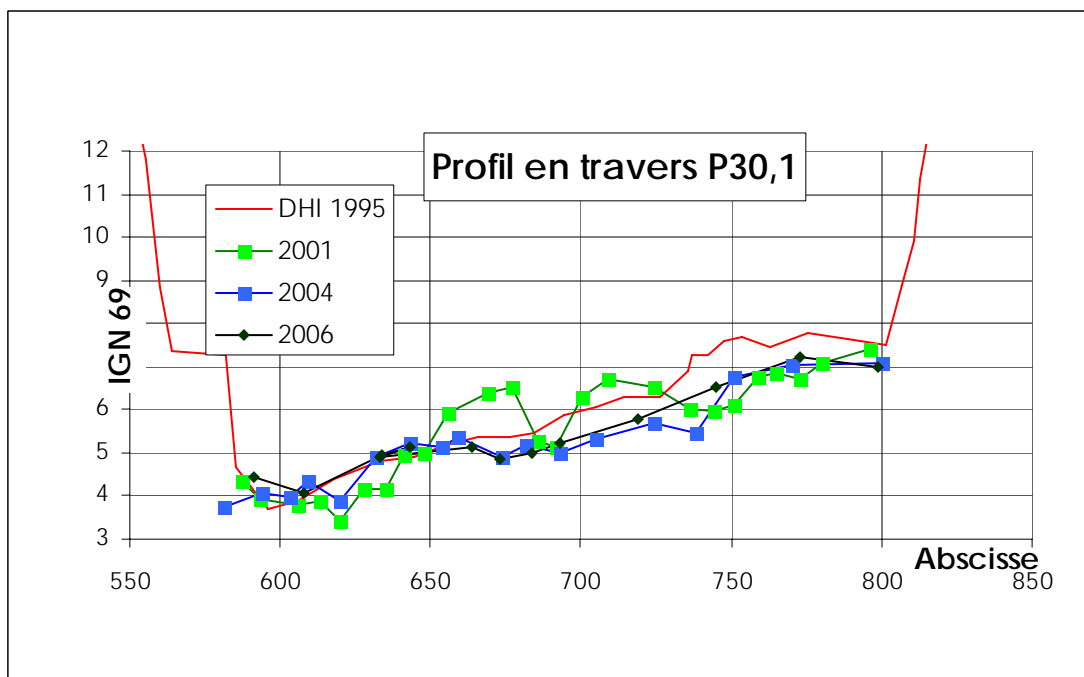


Les prélèvements granulométriques réalisés par Hydro-expert en 1998 et Astérie en 2006 donnent ici les diamètres les plus élevés mesurés sur le tronçon d'étude, soit respectivement : d₅₀ de 1.6 mm et 1.8 mm, d₉₀ de 10 et 12.7 mm. Ce grossissement nous semble lié au remaniement des couches profondes lors de l'incision du bras nord ; la formation de la fosse d'affouillement a légèrement accentué ce caractère, avec la mise en mouvement de couches profondes, plus grossières en Loire que les couches superficielles. Le dépôt en aval de ces gros sables et gravillons s'accompagne du tri granulométrique des matériaux les plus petits.



Au Km 37.5, on n'observe pas de fortes variations des bas fonds entre 2001 et 2004 ; seul le banc de rive droite est exhaussé en février 2004.

La majeure partie de cet exhaussement est effacée en 2006.

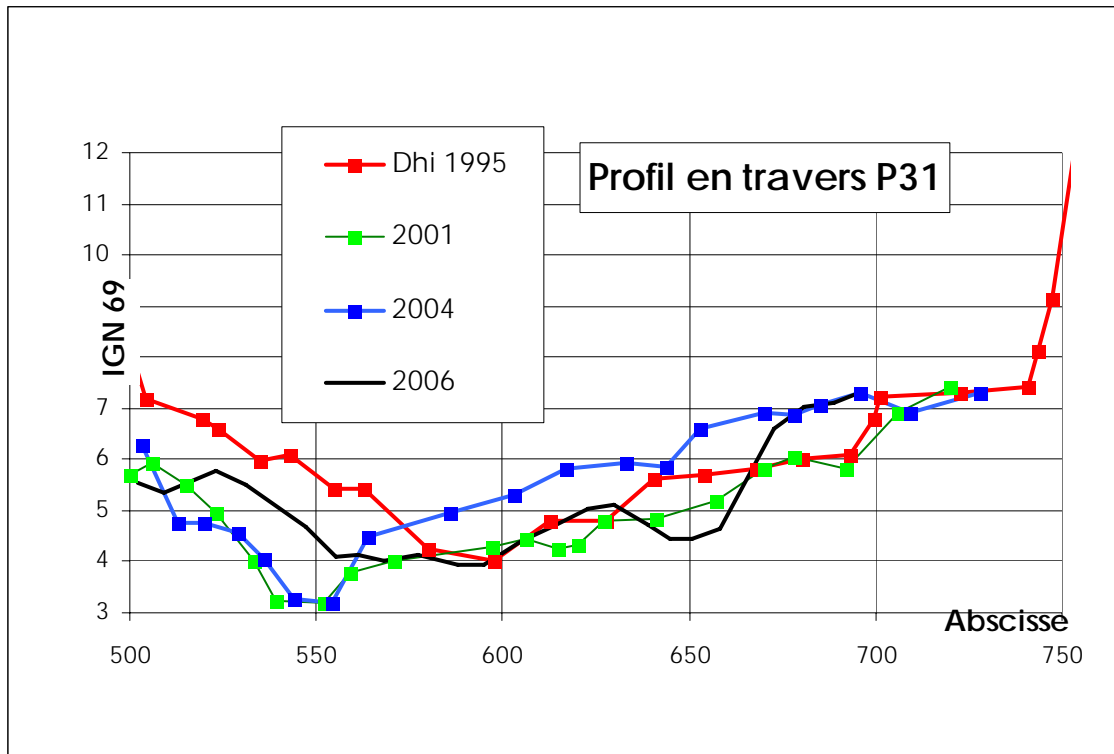


La variation des fonds au profil 30-1 (km 37.856) est difficile à interpréter, en raison des fortes irrégularités du fond relevées en 2001. Les bas fonds ont peu évolué de 1995 à 2006, tandis que le banc de rive droite s'est abaissé de 0.50 m entre 1995 et 2006.

Enfin le profil 31 (km 38.000) présente de 1995 à 2001 une incision de 1 à 2 m en rive gauche, le banc de rive droite restant stable. Une recharge de ce banc de rive droite s'effectue en février 2004 et disparaît en 2006 au profit d'un léger exhaussement de la rive gauche. Au final, la cote moyenne de la section 2006 se cale entre la cote de 1995 et celle de 2001.

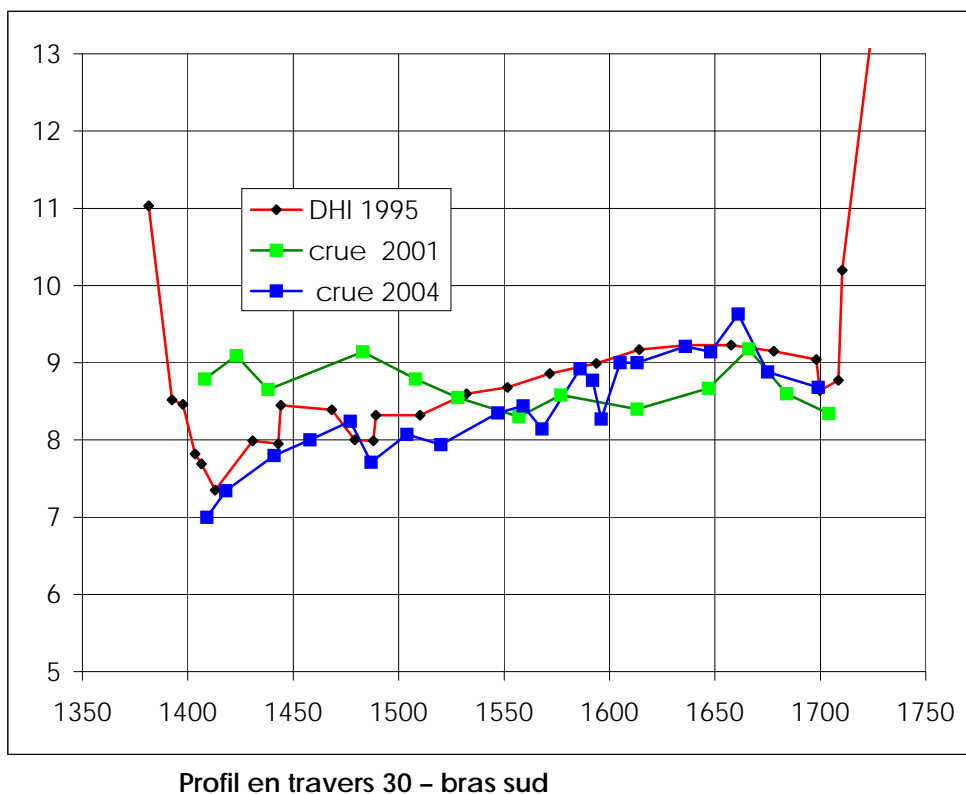
En résumé, le bras nord était donc en lent abaissement avant la construction des épis ; il a subi une forte variation à la mise en service, liée à la formation des fosses d'affouillement en

aval des épis à radier et à la progression de « l'onde solide » vers l'aval. Cet effet n'avait pas disparu complètement en 2006, mais la tendance à moyen terme (10 ans) est à un exhaussement modéré des fonds.



2.3.4.5. En aval d'Ingrandes : bras de Cul de Bœuf

Le levé de février 2004 est trop proche de la mise en service pour permettre d'avancer un avis ; une légère tendance à l'abaissement apparaît, mais ne peut être sérieusement affichée, notamment compte tenu du caractère atypique de la crue de l'hiver 2003-2004.



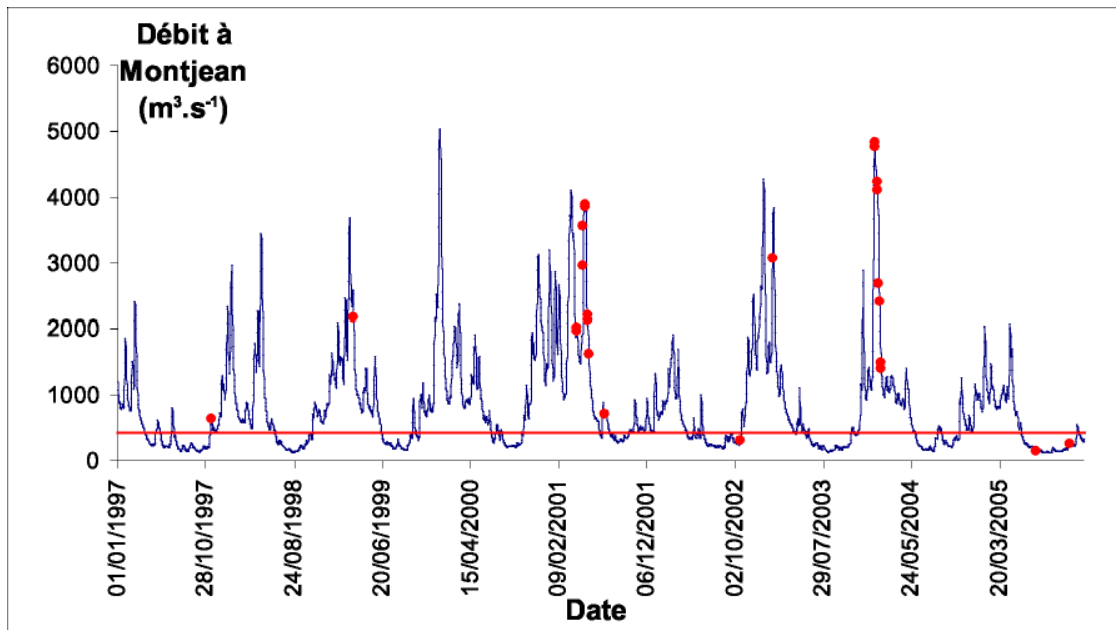
Profil en travers 30 - bras sud

Une bathymétrie de ce bras est indispensable pour formuler un avis sur l'évolution consécutive à la construction des épis à radier sur le bras nord.

2.3.5. Analyse d'octobre 2009

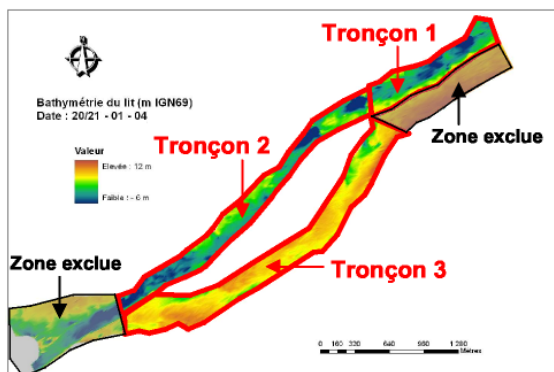
2.3.5.1. Les campagnes bathymétriques

S. Rodrigues et J.N. Gauthier ont effectué en 2006 une analyse de l'évolution des fonds à partir des levés bathymétriques et des mesure des chaînes implantées dans le bras sud avant la mise en place des épis (1997-2003) et après deux années d'observation (2004-2006); un rapport de P. Jugé rend compte de la campagne d'observation des chaînes en 2005-2006.



Les données bathymétriques disponibles concernent la période 1997-2005 ; sur le graphique ci dessus, extrait du premier rapport, les dates des campagnes bathymétriques ont été repérées par des points rouges. On remarque que les bathymétries ont été effectuées à des débits très variables ; nous verrons au paragraphe suivant que cette variabilité brouille le diagnostic de l'effet propre des épis à radier.

Les auteurs soulignent que les données « souffrent d'un certain nombre d'incertitudes relatives à leur stratégie d'acquisition (répartition spatiale et fréquence des levés), leur traitement après acquisition (certains levés fournis semblent renfermer des valeurs erronées) et leur traçabilité ».



Un bilan des variations de volume des fonds a été établi en différenciant les trois zones figurées ci contre, à savoir entre le pont d'Ingrandes et l'île Meslet, et les bras nord et sud le long de l'île Meslet.

Il faut remarquer qu'entre le pont d'Ingrandes et l'île Meslet les bancs de rive gauche entre épis sont exclus de la comparaison.

De même les surfaces du bras nord et du bras sud au droit de l'île Meslet diffèrent d'un relevé à l'autre, notamment pour le relevé de 2005, ce qui rend la comparaison incertaine. Les tableaux de la page suivante reproduisent les résultats.

Nous avons ajouté aux données du tableau la valeur du débit à Montjean à la fin de chacune des séquences. On voit que la plupart des mesures sont effectuées en crue; 11 sur 13 dans le tronçon 1 amont et dans le bras sud, 11 sur 12 dans le bras nord. La dernière mesure en 2005 a été faite en deçà du module sur les trois tronçons, ce qui altère sa comparaison avec les précédentes, comme le discuterons plus loin.

2.3.5.2. Résultats

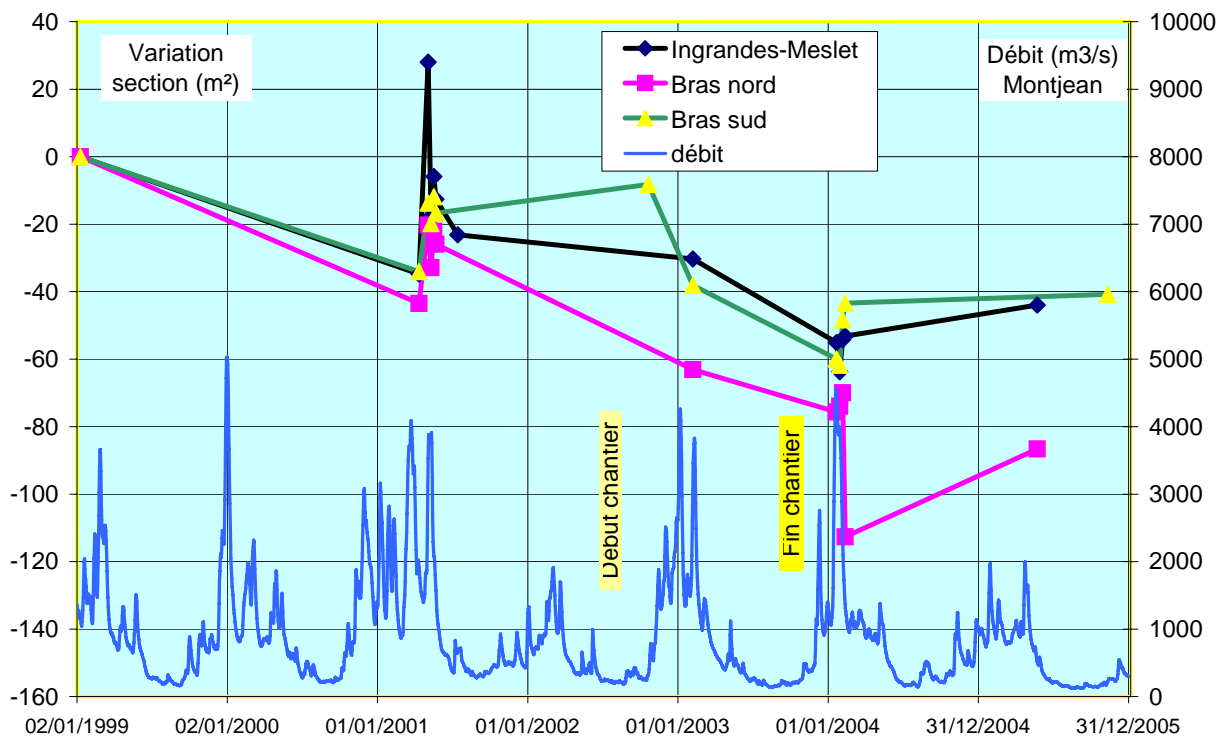
Le graphique ci dessous montre la variation de la section moyenne de chacun des tronçons à partir de l'ensembles relevés de 1999 à 2005.

On constate à première vue une tendance générale à l'abaissement qui est forte avant la mise en service, environ 0.40 m, donc égale dans les trois tronçons.

La tendance est beaucoup moins nette après mise en service des épis à radier et est particulièrement faible à l'amont de l'île Meslet et dans le bras sud.

Seul le bras nord semble avoir subi un abaissement notable après la mise en service des épis : très important lors de la crue de 2004, cet abaissement semble s'être atténué en 2005, probablement en raison du comblement partiel des fosses d'affouillement en aval des nouveaux épis.

La forte variabilité des fonds appelle une discussion approfondie de ces résultats que nous présentons maintenant.



Tronçon 1 : chenal navigable RD, entre pont et seuils					
Dates des campagnes	Débit (fin séquence)	Surface	Dépôt	Erosion	Bilan
1998 à 1999	> 2000	163809	46560	41205	5355
1999 à 11 12 04 01	1970	163809	37555	75820	-38265
11 12 04 01 à 03 04 05 01	2910	163809	94087	25025	69062
03 04 05 01 à 10 11 05 01	3860	163809	28292	78543	-50251
10 11 05 01 à 17 18 05 01	2080	163809	52111	39097	13013
17 18 05 01 à 23 05 01	1570	163809	41398	48811	-7413
23 05 01 à juillet 01 (suivi fin)	< 800	163809	43185	54813	-11628
juillet01 (suivi fin) à 06 02 03	3070	163809	50208	58095	-7887
06 02 03 à 20 21 01 04	4480	163809	47175	74384	-27209
20 21 01 04 à 28 29 01 04	3990	163809	40216	49787	-9570
28 29 01 04 à 04 05 02 04	2810	163809	49460	38925	10534
04 05 02 04 à 10 11 02 04	1370	163809	41191	40047	1144
10 11 02 04 à 23 05 2005	516	163809	62030	51934	10095

Tronçon 2 : bras nord île Meslet					
Campagnes comparées	Débit (fin séquence)	Surface	Dépôt	Erosion	Bilan
1998 à 1999	> 2000	434817	210574	70007	140567
1999 à 11 12 04 01	1970	559209	131478	246777	-115299
11 12 04 01 à 03 04 05 01	2910	559209	196956	135444	61512
03 04 05 01 à 10 11 05 01	3860	559209	124138	157585	-33448
10 11 05 01 à 17 18 05 01	2080	559209	162258	133648	28610
17 18 05 01 à 23 05 01	1570	559209	136449	146695	-10246
23 05 01 à 06 02 03	3070	559209	201759	300158	-98398
06 02 03 à 20 21 01 04	4480	559209	263644	296922	-33278
20 21 1 04 28 29 01 04	3990	559209	164826	160265	4561
28 29 01 04 à 04 05 02 04	2810	559209	138128	127593	10535
04 05 02 04 à 10 11 02 04	1370	559209	134038	247100	-113062
10 11 02 04 à 23 05 2005	516	484103	268009	199038	68971

Tronçon 3 : bras sud île Meslet					
Campagnes comparées	Débit (fin séquence)	Surface	Dépôt	Erosion	Bilan
1997 à 1999	> 2000	808897	215499	253382	-37883
1999 à 11 12 04 01	1970	824453	181283	288637	-107354
11 12 04 01 à 03 04 05 01	2910	825185	152928	88914	64014
03 04 05 01 à 10 11 05 01	3860	820636	88022	107120	-19099
10 11 05 01 à 17 18 05 01	2080	828971	111710	86646	25064
17 18 05 01 à 23 05 01	1570	828140	77783	93134	-15350
23 05 01 à 21 10 02	315	730801	122957	96126	26830
21 10 02 à 06 02 03	3070	731387	87626	181702	-94076
06 02 03 à 20 21 01 04	4480	828788	136093	205061	-68968
20 21 01 04 à 28 29 01 04 :	3990	828788	119170	125015	-5845
28 29 01 04 à 04 05 02 04 :	2810	828993	139295	96693	42602
04 05 02 04 à 10 11 02 04 :	1370	720425	101201	85852	15349
10 11 02 04 à Nov 2005	< 270	624620	198427	190011	8416

2.3.5.3. Discussion

Nous remarquons d'abord l'importance de la variation de volume sur une seule crue dans un délai très court sur la zone 1 amont de l'île Meslet en 2001, alors que les épis à radier n'étaient pas construits. On a mesuré lors de cette crue du printemps un exhaussement du chenal de 69 000 m³ en trois semaines, suivi d'un abaissement de 50 000 m³ en 1 semaine; il est tentant d'attribuer d'aussi brutales variations de sens contraire à l'incertitude de la mesure ou à l'exclusion des bancs rive gauche de la comparaison. Mais il se peut également que ce mécanisme dépôt-érosion résulte de la variation du débit en crue : lorsque varie le

débit, la discontinuité morphologique créée par la division en deux bras autour de l'île Meslet crée un remous « hydraulique » en amont, variation de niveau qui, suivant son signe positif ou négatif, ralentit ou accélère l'écoulement : le ralentissement des vitesses en amont du défluent provoquera un dépôt de tout ou partie des apports de sable ; à l'inverse, en aval de ce défluent on aura un creusement par suite du déficit résultant du dépôt amont. Lorsque le creusement en aval sera suffisant, les fonds baisseront à nouveau et le transport solide deviendra plus régulier de part et d'autre du défluent, jusqu'à la décrue suivante. Ce mécanisme de respiration des fonds s'accompagne du développement de longues dunes qui progressent vers l'aval et sont en quelque sorte la mémoire des changements de débit passés.

Nous citons dans ce rapport quelques exemples de zones de respiration sur d'autres sites : au chapitre 1 le rétrécissement du pont de Savennières, dans ce chapitre 2 l'avancée de la digue rive gauche à Clairvoyant entre Montjean et Ingrandes, au chapitre 3 le rétrécissement du lit en amont du pont de Mauves.

Sur le site de l'île Meslet les transitions morphologiques générant des zones de respiration des fonds lors des variations de débit ne se limitent pas à l'amont de l'île ; on citera :

- Le bras sud à l'approche du confluent aval de l'île tend à se combler en forte crue en raison de la grande largeur et à se recreuser à la décrue. La construction des épis à radier accroît le creusement de ce chenal à l'approche du confluent : à débit total égal, le débit dans le bras sud sera plus élevé, alors que le niveau au confluent sera inchangé ; l'augmentation de la vitesse provoquera un surcreusement du fond de la partie terminale du bras sud.
- Le rétrécissement de la section en aval de l'épi à radier N°2 près de l'échelle des Granges est la cause d'un abaissement des fonds en forte crue, aussi bien avant qu'après la construction des épis à radier ; à la décrue, le sable se dépose dans les zones surcreusées à la crue.
- Après la construction des épis, l'effet des fosses d'affouillement observées en aval des épis se conjugue à l'effet du rétrécissement. On notera d'ailleurs qu'une fosse est apparue dès février 2003 au droit de l'épi amont en cours de construction. Lors des crues, ces fosses se creusent proportionnellement à la puissance dissipée sur les épis et se remblaient à la décrue.
- Ces fosses vont créer une respiration des fonds à leur aval : l'affouillement de la fosse en crue produit un dépôt en aval ; ce dépôt tend à se résorber lorsque en décrue et aux débits ordinaires les fosses tendent à se combler. On voit que les effets des fosses d'affouillement et du rétrécissement sont de signe contraire.
- Pour être complet, il faut dire que les épis anciens contribuent aussi, mais dans une moindre mesure, à la respiration des fonds ; les fonds se surcreusent devant les têtes d'épi lorsque croît le débit, en développant en aval une petite dune ; ces fonds se bouchent partiellement lors que le débit décroît.

Le mécanisme de respiration que nous venons de décrire ne doit pas être confondu avec le mécanisme de propagation des grèves associé au glissement des méandres. Ce glissement, a été décrit par Y. Babonaux en 1970, mais il a fait l'objet de nombreuses discussions dans le passé, certains niant son existence. Il contribue également à compliquer l'interprétation des causes de l'évolution des fonds. En fait les deux phénomènes existent en Loire : les transitions morphologiques génératrices de la respiration des fonds constituent une cause de la « stationnarité » des bancs, car elles « cassent » la progression des grèves. Ces transitions sont en Loire nombreuses : confluent et défluent créés par les îles, inflexions majeures des bras, rétrécissements ou élargissements et bien sûr ouvrages de toute nature.

Notre analyse montre que la comparaison des fonds, déjà difficile en soi, est faussée par la respiration des fonds observée lors de la variation des débits. Une amélioration appréciable de l'interprétation serait obtenue en ne comparant que des mesures effectuées lors de l'étiage d'été, car la décrue de printemps offre une séquence hydrologique analogue d'une année à l'autre. L'amplitude des respirations serait moindre avec des mesures en étiage, ce qui permettrait de mieux isoler l'incidence propre des épis à radier sur l'évolution des fonds.

2.3.5.4 Analyse des résultats en étiage

Deux situations d'étiage peuvent être comparées à partir du tableau des mesures cité plus haut : sur le bras sud entre octobre 2002 et novembre 2005, à l'amont de l'île entre juillet 2001 et mai 2005.

Bras sud (tronçon 3)

La séquence octobre 2002 - novembre 2005 sur le tronçon 3 peut donner une bonne appréciation de l'incidence des épis. Mais les surfaces couvertes par la bathymétrie diffèrent d'un relevé à l'autre, ce qui oblige à rester prudent dans l'analyse.

On observe entre ces deux relevés une diminution du volume de sable de 102 000 m³, soit un approfondissement moyen de la section de 32 m². Or l'observation des cartes bathymétriques montre que l'abaissement s'est surtout développé près du confluent aval de l'île et cette observation confirme la théorie: le calcul théorique montre en effet que le simple jeu de l'augmentation de 100 m³/s dans le bras sud doit conduire à un abaissement de 75 m² dans la partie aval de ce bras. L'abaissement des fonds ne concernerait alors que la partie aval du bras sud et l'amont n'aurait pas subi d'abaissement appréciable. Il serait donc intéressant de reprendre la comparaison section par section : de 2002 à 2005, ou à une bathymétrie d'étiage d'été plus récente s'il en existe.

Ingrandes - île Meslet (tronçon 1)

Rappelons que la comparaison des volumes en étiage qui peut être faite dans ce tronçon de juillet 2001 à mai 2005 ne concerne que le chenal navigable : on y observe une diminution du volume de sable de 15 000 m³, ce qui est peu significatif. Mais on aurait pu ici s'attendre à un exhaussement des fonds.

Il est intéressant de rapprocher ce résultat de notre première analyse au PK 35.5 au milieu de ce tronçon : *« Les fonds sont les plus bas en 2004 et les plus élevés sont observés en 2001, aussi bien en étiage qu'en crue. Le chenal navigable est en 2006 plus profond qu'en 2001 et a fortiori en 2004, ce qui pourrait provenir d'un accroissement du débit écoulé dans le bras de Cul de Bœuf. Le banc de rive gauche entre épis est plus élevé en 2006 qu'auparavant, et donc globalement la section 2006 n'est pas plus basse que la section 2001. On peut penser que les points bas du bras de Cul de Bœuf sont plus bas et que les dépôts sur la convexité s'en trouvent majorés. Mais ces données ne peuvent suffire à le prouver. »*

On déduit de ce rapprochement que le tronçon à l'amont de l'île Meslet n'a pas subi de variation significative avec la mise en place des épis à radier. Cette déduction est essentielle, car elle montre que le rôle de ces ouvrages sur la remontée des fonds en amont est nul ou négligeable.

On remarque alors que la faiblesse de l'évolution sur le tronçon 1 amont de l'île Meslet est en bon accord avec la faiblesse de l'évolution de la partie amont du bras sud. Cette quasi stabilité peut faire penser que les débits morphogènes sont plus élevés que ce que nous avons pensé lors de la conception des épis à radier; l'analyse du transport solide que nous présentons en annexe 2 montre que le débit assurant 50 % du transport est de 1550 m³/s. A ce débit, nous avons vu que la surélévation due aux épis était à Ingrandes inférieure à 0.10 m

(§ 2.3.3.1). L'incidence hydraulique étant faible, on ne doit pas s'étonner que l'incidence morphologique le soit aussi.

Il reste qu'aux débits ordinaires la pente dans le bras sud est majorée par rapport à l'état antérieur : la mobilité du bras doit donc au total être accrue ; si les fonds ne se creusent pas, ceci signifie que l'accroissement de mobilité est compensé par un accroissement de l'apport solide dans le bras sud : la configuration en plan de l'entrée du bras permet effectivement une forte alimentation en sable à partir du banc de convexité rive gauche.

2.3.6. Bilan de l'expérimentation

Trois points de vue sont à considérer pour ce bilan : l'incidence en regard des usages, l'impact hydraulique, l'impact morphologique.

2.3.6.1. Incidence en regard des usages

L'impact majeur concerne la navigabilité : la vitesse dans l'échancrure est-elle jugée excessive ou peut-on l'accepter ? Il faut avoir présent à l'esprit que l'incidence de la vitesse sur la dénivelée est très forte ; une réduction à 2 m/s altérerait déjà considérablement l'efficacité de l'ouvrage.

On a noté en outre la forte sensibilité de la chute à de petites variations des conditions du fonctionnement ou de la géométrie. Il est indispensable de prévoir un suivi du fonctionnement et une possibilité d'adaptation de la géométrie de l'échancrure à la variation des conditions aux limites.

Il est possible que l'accroissement du débit dans le bras de Cul de Bœuf ait un peu corrigé les vitesses sur l'épi à radier amont ; des mesures de vitesse dans les échancrures permettraient de s'en rendre compte.

L'inadaptation du matériau de couverture des épis aux évolutions ultérieures suffirait à renoncer à ce mode de construction. Sa fragilité et plus encore l'atteinte occasionnée au paysage conduiront, si les épis sont maintenus, à revenir aux enrochements.

2.3.6.2. Incidence hydraulique

L'efficacité hydraulique est conforme à notre attente. Il semble au vu des niveaux les plus récents à Ingrandes que le relèvement des niveaux d'étiage a peu évolué de 1994 à 1997.

Il serait souhaitable de mieux connaître la répartition des débits entre les deux bras dans la gamme des débits 250-800 m³/s.

On remarquera l'atténuation progressive de la surélévation lorsque croît le débit. Elle conduit à observer à partir de 2000 m³/s des niveaux en 2007 inférieurs aux niveaux de 1995.

2.3.6.3. Incidence morphologique

Ce point constitue le point faible du suivi.

La mobilité de la Loire, avant comme après la construction des épis à radier, s'est avérée plus forte que ce que nous pensions. Cette mobilité spatiale et temporelle masque les incidences et complique l'interprétation. Mais ce constat permet aussi de dire que les épis à radier n'ont pas bouleversé l'équilibre moyen du fleuve : la principale raison de cette stabilité est probablement la faiblesse de l'incidence hydraulique aux débits morphogènes dominants.

Une bathymétrie générale s'étendant au minimum de Montjean à l'amont de l'île Batailleuse permettra de préciser le diagnostic : un traitement par MNT peut être à la base de la comparaison, mais il faut s'assurer de la superposition en plan des contours pas toujours évidents et parfois imprécis.

En conclusion, devant la complexité des incidences, nous avons suggéré le suivi expérimental comme étant le moyen le plus sûr d'apprécier l'incidence des ouvrages établis sur un seul bras de Loire sur l'équilibre morphologique. Les circonstances n'ont pas permis d'obtenir une réponse complète, mais il est encore temps de la rechercher.

Chapitre 3

La Loire d'Ancenis à Nantes

3.1. Généralités

Ce 3^{ème} chapitre est consacré au tronçon Ancenis–Nantes et analyse les différentes possibilités d'intervention dans le « bassin de marée ».

La morphologie de la Loire entre Ancenis et Nantes n'est pas différente de celle observée en amont, notamment l'alternance entre bras unique et bras multiples. Mais il est fréquent d'observer trois bras en parallèle ; en outre les bras secondaires sont de dimension fort variable et certains d'entre eux sont en cours de colmatage.

On y retrouve les épis de navigation construits après 1920, mais aussi de nombreuses chevrettes barrant les extrémités des bras secondaires pour les débits d'étiage.

Le creusement du lit par prélèvement de sable a exondé ces ouvrages à des débits de plus en plus élevés et cela dès avant la 2^{ème} guerre mondiale. Nous n'avons pas disposé de la chronologie des quantités extraites et de leur localisation. Nous savons seulement que les abaissements ont commencé après la guerre de 14-18 avec le creusement du « bassin de marée » dans un but d'accroissement des volumes oscillants et se sont accélérés après la guerre de 39-45, notamment lors de la décennie 1970.

La marée a joué un rôle croissant au fur et à mesure de ce creusement du lit : celui-ci a étendu vers l'amont et accentué l'amplitude du marnage, la zone de marnage dépassant aujourd'hui Ancenis.

Il est probable que ces prélèvements induisent encore aujourd'hui des instabilités : il peut s'agir d'une « érosion régressive » (remontant vers l'amont) plus ou moins étendue à partir d'un tronçon aval surcreusé ou d'une « érosion progressive » (progressant vers l'aval) sur un tronçon resté intact, qui aurait été interdit aux sabliers (abords des ponts) ou ignoré par eux en raison de difficultés d'exploitation. L'instabilité peut aussi résulter d'un comblement inachevé de fosses d'extraction situées à l'écart des forts charriages.

La condition de niveau à la limite aval que nous situons au bassin d'évitage à la confluence des bras de la Madeleine et de Pirmil (Trentemoult) joue un rôle majeur : la comparaison entre l'étiage de référence adopté par le Service de la Loire sur les plans de 1898 et l'étiage de 1995 montre que la pente de la Loire en basse mer s'est accrue au cours du 20^{ème} siècle : si on observe que l'essentiel du transport des sédiments sableux s'effectue en amont de Nantes à basse mer, tout se passe comme si du point de vue de la morphologie amont l'estuaire était pour les eaux moyennes remonté jusqu'à Nantes.

Le dragage de l'estuaire a, malgré les extractions amont, été un facteur d'érosion régressive en amont de Nantes; l'est-il encore, ou observe-t-on un exhaussement des fonds depuis l'arrêt des extractions en amont de Trentemoult et cet exhaussement suffit-il à bloquer l'érosion ?

Nous décrirons tout d'abord la morphologie actuelle du site et des ouvrages de navigation. Nous chercherons ensuite à retracer l'évolution des niveaux et des fonds dans le temps, en

nous attachant surtout aux 10 dernières années : la connaissance du sens et de l'ampleur des évolutions au cours de cette période nous permettra de proposer un diagnostic sur l'évolution prochaine des niveaux et des fonds.

Nous discuterons ensuite les différentes possibilités d'intervention du point de vue de leur efficacité et de leur impact sur le milieu naturel et sur les usages du fleuve.

3.2. Description morphologique du site et des ouvrages de navigation

Les données numériques concernant les pentes sont celles de 1995-1996.

3.2.1. Ancenis à Oudon - km 58 à 65

Après un court tronçon à bras unique de 400 m de largeur en aval du pont, le lit se divise en trois bras, le bras central étroit étant le bras navigable.

Les pentes d'écoulement dans ce tronçon évoluent peu en fonction du débit :

Débit (m ³ /s)	150	250	400	800	1500
Pente (m/km)	0.20	0.23	0.26	0.26	0.22

Cette variation est liée à la présence des chevrettes concentrant les débits moyens dans le bras navigable.

La largeur cumulée des bras est en moyenne de 400 m, un peu inférieure à celle que l'on peut déduire des plans au 1/5000 de 1898.

L'examen de la photo aérienne montre des tendances à la fixation des bancs par la végétation (buissons et prairies) en plusieurs points :

- Bras des Brevets (sud de l'île Coton)
- Bras sud de l'île du Buisson (la Pierre du Drain sur cartes IGN)
- Partie aval de l'île Neuve des deux côtés de l'île
- Banc rive droite épis à l'amont du pont d'Oudon.

En revanche une tendance à l'érosion de la berge de l'île Macrière en rive droite du bras navigable est observable sur la photo aérienne entre les km 60.5 et 61.5, à la hauteur de l'île du Buisson précédemment citée.

3.2.2. Oudon à Mauves - km 65 à 75

La boire Chapoin prolongée par la boire d'Anjou en rive gauche et la boire du Cellier plus courte en rive droite ont des capacités limitées, ce qui donne à la Loire sur le tronçon une morphologie proche de celle d'un lit unique. Le chenal navigable s'est ici profondément encaissé en même temps que s'amplifiait l'alluvionnement entre épis.

Le tronçon de 2500 m entre la restitution de la boire d'Anjou et le pont de Mauves est fortement rétréci par l'action des épis de rive gauche ; ces épis ont exhausé les fonds dans leur intervalle jusqu'à ce que la rareté de l'inondation autorise un développement végétal dense ; cette végétation permet aujourd'hui le dépôt des fines lors des pleines mers de vives eaux pour un débit moyen. La zone végétalisée couvre une largeur jusqu'à 250 m, soit la moitié de la largeur du lit actif au début du 20^{ème} siècle. Il est probable que l'exhaussement va se poursuivre jusqu'à atteindre la cote des terrains de rive ; il faudra donc que l'étude d'inondabilité détermine s'il existe un risque d'inondation accru du fait de ce rétrécissement.

La combinaison de l'approfondissement du chenal et de l'alluvionnement latéral est la cause d'une forte variation de la pente de l'écoulement sur le tronçon Oudon – Mauves. On a ainsi entre deux marégraphes les pentes suivantes en basse mer coefficient 80 en fonction du débit :

Débit (m ³ /s)	150	250	400	800	1500
---------------------------	-----	-----	-----	-----	------

Pente (m/km)	0.033	0.050	0.074	0.138	0.170
--------------	-------	-------	-------	-------	-------

Il est normal que la pente en basse mer augmente d'amont en aval dans la partie fluvio-maritime, du moins en vives eaux. De même elle croît avec le débit ; mais dans le bief Oudon-Mauves, cette tendance a été très accentuée par l'action combinée des épis de navigation et des extractions. Le sable apporté de l'amont au jusant se déposera dans ce tronçon pour les débits faibles à moyens et ne sera repris que lors des crues au delà de 1000 m³/s.

3.2.3. Mauves à Bellevue – km 75 à 85

Ce tronçon comporte deux bras principaux : le bras navigable est le bras sud. Le bras nord a été barré par des chevrettes aujourd'hui partiellement détruites. L'île Ripoche à Mauves et l'île Demonty à l'amont de Thouaré sont séparées de la rive droite par un troisième bras fortement colmaté.

Le tableau montre en fonction du débit les valeurs des pentes en 1995-1996 en basse mer entre les marégraphes de Mauves, Thouaré et Bellevue.

Débit (m ³ /s)	150	250	400	800	1500
Pente Mauves-Thouaré (m/km)	0.192	0.180	0.196	0.185	0.150
Pente Thouaré-Bellevue (m/km)	0.184	0.211	0.219	0.285	0.327
Pente Mauves- Bellevue (m/km)	0.187	0.193	0.205	0.229	0.229

La pente moyenne en basse mer est toujours très supérieure à la pente amont, ce qui pourrait développer une tendance à l'érosion, si le relèvement du niveau provoqué par la marée ne freinait pas le transport.

En amont de Thouaré, le bras navigable est relativement étroit. L'observation de la photo aérienne montre que la berge de l'île Arroux, en rive droite de ce bras, est dénudée face à la Chebuette (km 78 à 79) et présente des signes d'érosion contemporaine : ce fait n'est pas suffisant pour prouver une érosion des fonds, mais est l'indice d'une activité morphodynamique notable. La comparaison du profil DHI au km 78.5 et du plan de 1898 montre en outre que la largeur du bras navigable s'est accrue, de 130 à 170 m.

En aval de Thouaré le bras navigable est plus large, ce qui a conduit à implanter des épis en rive droite le long de l'île Chesnay : l'alluvionnement résultant entre épis s'est traduit par une mise hors d'eau et la végétalisation d'une bande de terrain de 0 à 80 m de largeur.

Le bras nord a fortement évolué au cours du 20^{ème} siècle en amont comme en aval de Thouaré : il s'agit surtout d'un rétrécissement du lit actif au profit d'atterrissements latéraux à des cotes élevées, probablement recouverts par les limons et végétalisés. Le rétrécissement est général, à l'exception d'un court tronçon autour du km 77.5, où la largeur en 1898 ne dépassait pas 200 m. Ailleurs, le rétrécissement est le plus souvent compris entre 100 et 200 m.

Sur l'ensemble du tronçon Mauves –Bellevue, la largeur moyenne du lit actif est en sommant les deux bras de 390 m environ, inférieure de 100 m environ à la largeur de 1898.

La réponse de la Loire à l'action des épis et chevrettes et à l'érosion régressive induite par les dragages aval est de même nature que celle que nous avons observée en amont de Mauves, à ceci près qu'elle concerne deux bras et localement trois au lieu d'un seul.

A Bellevue la jonction des deux bras se faisait au début du 20^{ème} siècle sur des fonds sableux; la réalisation d'épis en rive gauche et les dragages ont mis à jour le plateau rocheux qui a rendu la navigation de plus en plus difficile en basses eaux. La dégradation et le recul de ces épis de rive gauche a permis de retrouver des bas fonds et donc des tirants d'eau

satisfaisants. Mais cette évolution a certainement accentué l'érosion régressive dans le tronçon que nous venons de décrire.

Sogreah a défini en 1992 un aménagement prolongeant le plateau rocheux naturel par un comblement partiel des fonds creusés en rive gauche entre 1973 et 1990. Le relèvement ainsi obtenu était de 1 m au dessus de l'étiage de 150 m³/s en vives eaux de coefficient 95. Il était nul ou négligeable à 2500 m³/s.

A l'issue de l'étude prospective, BCEOM et DHI ont proposé en 2003 un seuil à échancrure centrale avec les largeurs suivantes en fonction de la cote :

- 78.5 m à -2.5 IGN 69
- 87 m à -1.3 IGN 69
- 230 m environ à 0.50 IGN 69
- le reste de la section à cette même cote 0.50 m jusqu'aux berges.

L'étude précise dans un tableau le fonctionnement de l'ouvrage pour 3 débits ; nous résumons ces résultats à basse mer :

Débit (m ³ /s)	Cote aval IGN 69	Cote amont IGN 69	Vitesse échancrure
210	-1.09	-0.03	3.8
1340	1.10	1.36	2.8
3500	4.42	4.45	2.0

Selon ce calcul, les vitesses sont trop fortes dans l'échancrure en deçà de 1500 m³/s, ce qui interdit la navigation et la remontée des migrateurs en basses mers en eaux moyennes et vives eaux.

L'ouvrage est un seuil d'étiage et aura donc peu d'effet sur la retenue des sédiments sableux. Enfin le plateau rocheux est mal utilisé et la tenue des enrochements du déversoir sur fond dur et lisse problématique.

3.2.4. Bellevue à Trentemoult – km 85 à 94

On doit distinguer deux tronçons :

- L'amont entre les ponts de Bellevue et de la Vendée : km 85 à 89.
- L'aval formé des deux bras majeurs de la Madeleine et de Pirmil, entre le pont de la Vendée et le bassin d'évitage (km 94.300); un troisième bras nord doublait le bras de la Madeleine entre Saint Félix (km 90.750) et le pont Anne de Bretagne (km 92.750).

Amont pont de la Vendée

Sur la majeure partie de sa longueur ce tronçon comporte deux bras : le bras navigable au nord et au sud le Gourdeau.

Les plans cotés de 1898 et 1951 apportent des indications précieuses sur la géométrie du lit et des ouvrages.

Le bras navigable offrait une largeur de 360 à 450 m en 1898 et 1951. La largeur est aujourd'hui très irrégulière entre 280 m et 450 m. Le plan de 1951 donne un calage des épis de navigation, en distinguant la cote des enrochements et celle des pieux en bois, tantôt l'une et l'autre et tantôt seulement celle des pieux : les enrochements sont calés entre 3.7 et 4.4 cote marine, soit environ 0.7 et 1.4 IGN 69. La largeur du bras navigable est d'environ 200 m.

Aujourd'hui les fonds sont calés entre -6 et -3 IGN 69. Ces dernières valeurs sont observées en amont du pont de la Vendée, ce qui conduit à observer des hauts fonds en basses mers de vives eaux; nous verrons qu'il n'en a pas toujours été ainsi.

Le Gourdeau offrait en 1898 et 1951 une largeur de 100 à 180 m ; cette largeur a peu diminué aujourd'hui. Il a été barré par une chevette calée selon le plan de 1951 à la cote 1.60 IGN 69. Les fonds sont calés entre les cotes -2 et zéro IGN 69 en 1996.

Aval pont de la Vendée

Les deux bras, de la Madeleine et de Pirmil, ont subi de profondes transformations au cours des précédentes décennies, du fait des dragages qui semblent avoir conduit aux plus grandes profondeurs des lits en 1972, comme on le verra plus loin.

La largeur du bras de la Madeleine varie dans la traversée de Nantes ; elle est de 200m en amont de Saint Félix, point de « défluence » de l'ancien bras ; la cote des fonds est alors en moyenne de -4.5 IGN 69, si l'on ne tient pas compte des sur-profondeurs induites par certains ponts.

Entre Saint Félix et le pont d'Anne de Bretagne, la largeur n'est que de 150 m, ce qui conduit à un surcreusement des fonds à la cote -6.5 IGN 69 et -9.0 en aval.

En aval du pont d'Anne de Bretagne, la largeur augmente à nouveau, jusqu'à 200 m et les fonds se relèvent à la cote moyenne de -6 IGN 69.

La largeur du bras de Pirmil est plus régulière que celle du bras de la Madeleine : 250 m en amont à un peu moins de 200 m en aval ; du fait de ce rétrécissement, la pente du fond est le double de la pente de la ligne d'eau à basse mer.

3.3. Analyse de l'évolution des niveaux et des fonds

3.3.1. Méthodes d'étude

La connaissance de l'évolution des niveaux et des fonds de la Loire dans la section Ancenis-Nantes est un des aspects les plus importants de notre expertise, car il conditionne la réponse à la question suivante : est-il possible d'assurer la restauration des niveaux en Loire sans recourir à des moyens artificiels de remontée des niveaux ?

Mais cette connaissance est difficile : c'est seulement depuis une quinzaine d'années que les fonds ne sont pas dans la section Ancenis-Nantes l'objet de prélèvements massifs. Nous avons donc considéré que la période représentative d'évolutions moins perturbées ne pouvait excéder une dizaine d'années, soit 1996-2007 : on verra que les fluctuations liées aux modifications spatiales de largeur peuvent alors représenter une fraction notable de la variation des fonds, ce qui rend incertain ce mode de comparaison.

Comparaison des niveaux

La comparaison par les niveaux ne peut être approchée de la même manière qu'en amont, quand l'incidence de la marée est nulle. La relation entre les niveaux et le débit ne peut être approchée qu'en isolant le paramètre marée, c'est à dire d'une part en ne considérant qu'une fourchette étroite de coefficients, d'autre part en ne considérant que la cote de basse mer, la moins dépendante de la condition aval ; mais ce procédé n'est pas tout à fait satisfaisant, car le coefficient de marée ne rend compte que de la marée astronomique et ignore l'effet de la pression atmosphérique, du vent et des marées antérieures. Tenir compte de ces phénomènes conduirait à réduire à quelques valeurs le champ des données exploitables et nous ne l'avons pas envisagé.

Nous avons d'abord isolé deux séquences de mesures : 1995-1996 et 2006-2007 ; mais l'importance des lacunes en 1995 nous a conduit à ajouter l'année 1997. La comparaison porte donc sur une période de 10 ans. Dans ces deux séquences, nous avons isolé les marées de coefficient 78 à 82 et déterminé pour ces événements le débit à partir du débit journalier à Montjean décalé d'une durée de 10 heures environ, ce qui constitue une bonne approximation sauf lors de montée rapide assez rare.

Comparaison des fonds

Nous avons choisi les mêmes séquences en considérant d'une part les profils en travers levés à l'automne 1995 pour les besoins de l'étude prospective et d'autre part la bathymétrie de 2006. Cette bathymétrie est malheureusement limitée en amont au pont de Mauves et ne concerne que le chenal de navigation, sauf dans la traversée de Nantes où elle s'étend sur les deux bras.

Pour expliquer une contradiction entre le levé des niveaux et le levé des fonds, nous avons en outre exploité localement un levé de 1992 entre Mauves et Thouaré.

3.3.2. Evolution des niveaux de 1997 à 2007

Avant de décrire l'évolution constatée, il faut avoir présent à l'esprit que la comparaison des niveaux ne doit pas être interprétée comme l'effet d'une variation des fonds à l'endroit de la mesure du niveau : elle représente le « remous », c'est à dire l'addition des effets de la variation des sections aval, ces effets décroissant avec la distance. Le remous s'étend d'autant plus loin en amont que le débit ou la hauteur d'eau sont élevés : on peut ainsi observer à un marégraphe une surélévation en hautes eaux imperceptible en étiage et à l'inverse obtenir des surélévations à l'étiage, mais pas en hautes eaux.

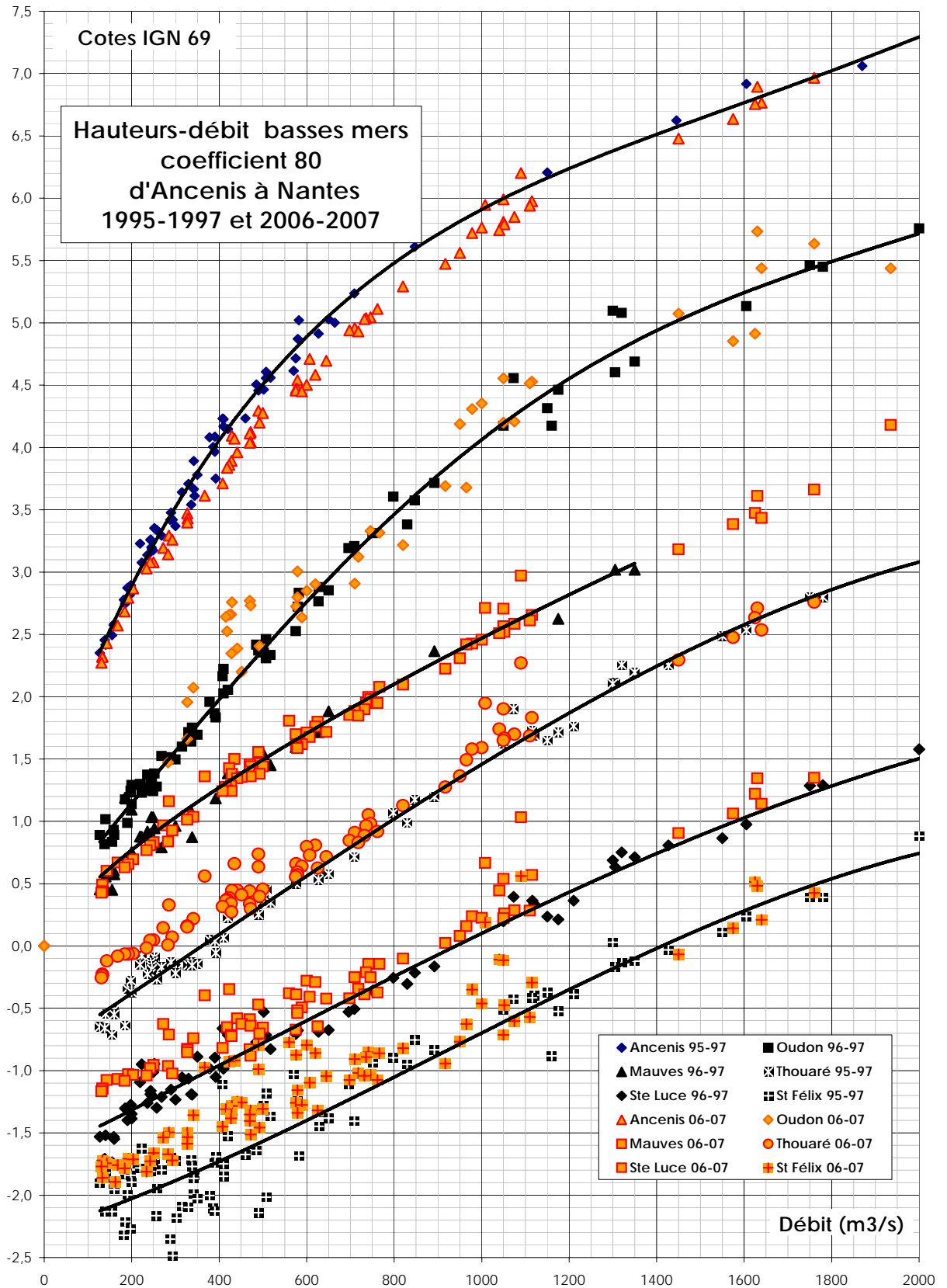
Les résultats de l'analyse comparée 1997-2006 sont figurés page suivante sur un seul graphique regroupant les marégraphes d'Ancenis, Oudon, Mauves, Thouaré, Bellevue et Saint Félix. Les résultats doivent être commentés de l'aval vers l'amont, en raison de l'incidence de l'aval sur l'amont.

La première observation concerne la dispersion des points : celle ci est décroissante d'aval en amont, les variations de l'amplitude des basses mers étant la cause principale de la dispersion des points. La surélévation la plus remarquable par rapport à la valeur normale est observée à 1090 m³/s le 12 décembre 2006 : 0.80 m à Saint Félix, 0.60 m à Bellevue, 0.50 m à Thouaré, 0.30 m à Mauves, 0.15 m à Ancenis (pas de mesure à Oudon ce jour là) : il serait souhaitable de connaître les conditions météorologiques lors de cet événement, la marée de ce jour n'ayant pas dépassé 1.75 m en basse mer à Saint Nazaire.

Aux trois stations aval, St Félix, Bellevue, Thouaré les niveaux en eaux ordinaires se sont nettement exhaussés de 1997 à 2007, respectivement de 0.40, 0.30, 0.20 m environ, mais cet exhaussement décroît avec le débit et devient incertain au delà de 1500 m³/s.

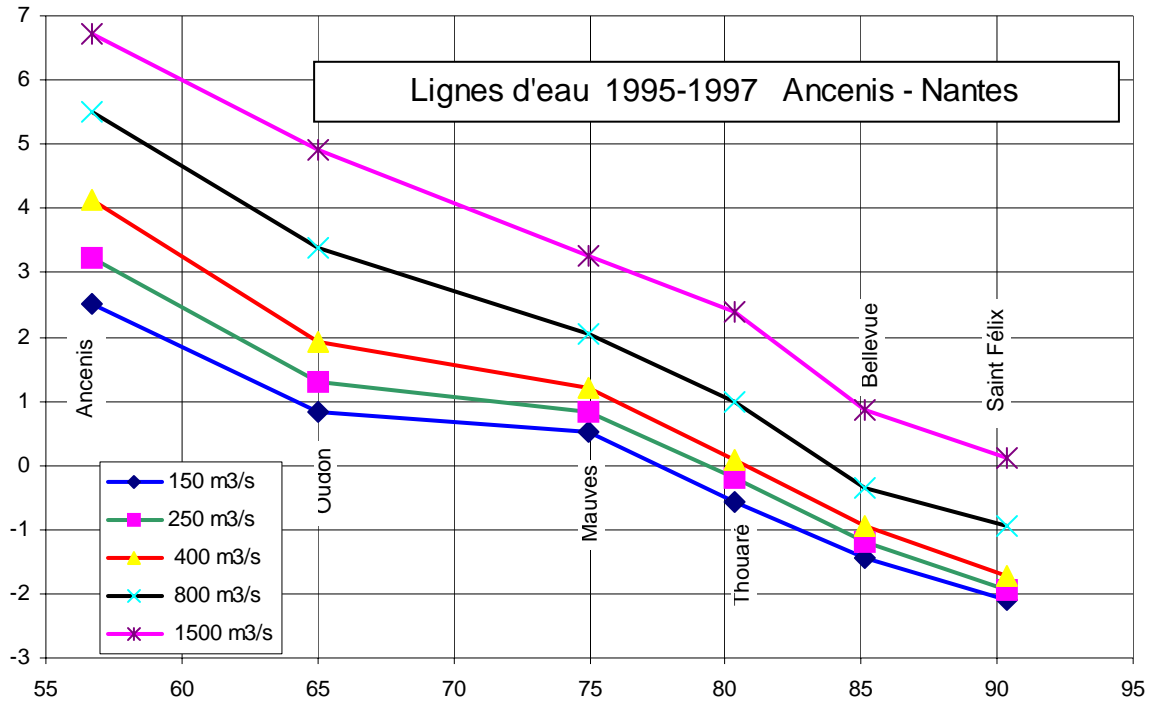
Aucune variation appréciable ne peut être décelée au marégraphe de Mauves, les valeurs élevées entre 100 et 500 m³/s nous paraissant douteuses.

L'échelle d'Oudon n'a pas été lue pendant l'étiage 2006 et l'étiage 2007 n'a pas comporté de faibles débits. Le niveau semble stable à 300 m³/s Au delà la forte dispersion ne permet pas de conclure. A Ancenis, l'étiage est resté stable, mais un abaissement de 0 à 30 cm est visible entre 300 et 1600 m³/s.



Pour faciliter l'interprétation de ce résultat, nous reproduisons ci après le profil en long des lignes d'eau moyennes en 1995-1997 aux débits de 150, 250, 400, 800, 1500 m³/s.

Ce graphique illustre les variations de pente de la ligne d'eau entre les marégraphes.



3.3.3. Evolution des fonds de 1995 à 2007 à l'aval de Bellevue

Les tableaux donnent, depuis Bellevue jusqu'au bassin d'évitage, la variation de 1995 à 2006-2007 des sections et des volumes.

Bellevue - défluece

Profil	75	76-1	77-2	78	79-02	80-02		
Abscisse	83.563	85.165	86.410	87.430	88.390	88.817		
Variation section (m ²)	63	127	130	154	246	81		
Variation volume (m ³)	152031	159934	144730	192073	70022	43867		

Dépôt : 762657 m³

Bras de la Madeleine

Profil	81-03	82-2	83-2	84-2	85-2	86	87-2	Aval
Abscisse	89.125	90.270	90.970	91.555	92.020	92.850	94.000	94.300
Variation section (m ²)	203	107	81	58	63	-80	79	79
Variation volume (m ³)	177666	65862	6823	1205	-6951	-596	23667	

Dépôt : 267676 m³

Bras de Pirmil

Profil	Amont	80-01	81-02	81-1	82-1	83-1	84-1	85-11	87-1
Abscisse	0	0.100	0.378	0.501	1.028	2.211	2.835	3.485	4.927
Variation section (m ²)	11	11	133	203	-7	28	-29	148	55
Variation volume (m ³)	536	19953	20675	61434	11245	-242	38763	146651	31568

Dépôt : 330583 m³

On estime ainsi à 1 360 000 m³ le volume déposé en un peu moins de 11 ans entre Bellevue et le bassin d'évitage ; cette valeur est un ordre de grandeur, la densité des profils n'étant pas suffisante pour une estimation précise. Le dépôt moyen annuel serait ainsi de 125000 m³, soit 200000 tonnes avec une densité de 1.6.

Il y a donc concordance entre l'élévation du niveau des eaux ordinaires en basse mer et le dépôt constaté : la diminution de la pente en aval de Bellevue en basse mer explique ce dépôt.

3.3.4. Evolution des fonds de 1995 à 2006 entre Mauves et Bellevue

La bathymétrie de 2006 a permis de prolonger la comparaison jusqu'à proximité du pont de Mauves, mais seulement dans le bras navigable. Cette comparaison est présentée dans le tableau suivant :

Profil	Amont	68	69	70	70-1	71
Abscisse (km)	75.2	75.71	77.065	78.55	79.091	79.5
Variation section (m ²)	0	-181	-91	-48	-22	-13
Variation volume (m ³)	-45737	-184473	-103049	-19000	-7142	11902

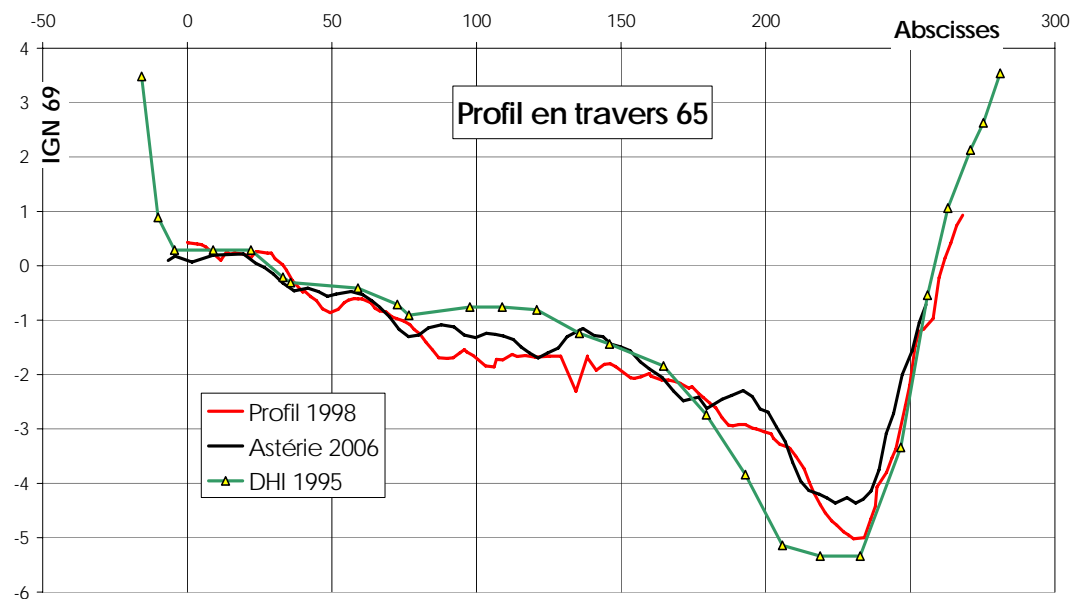
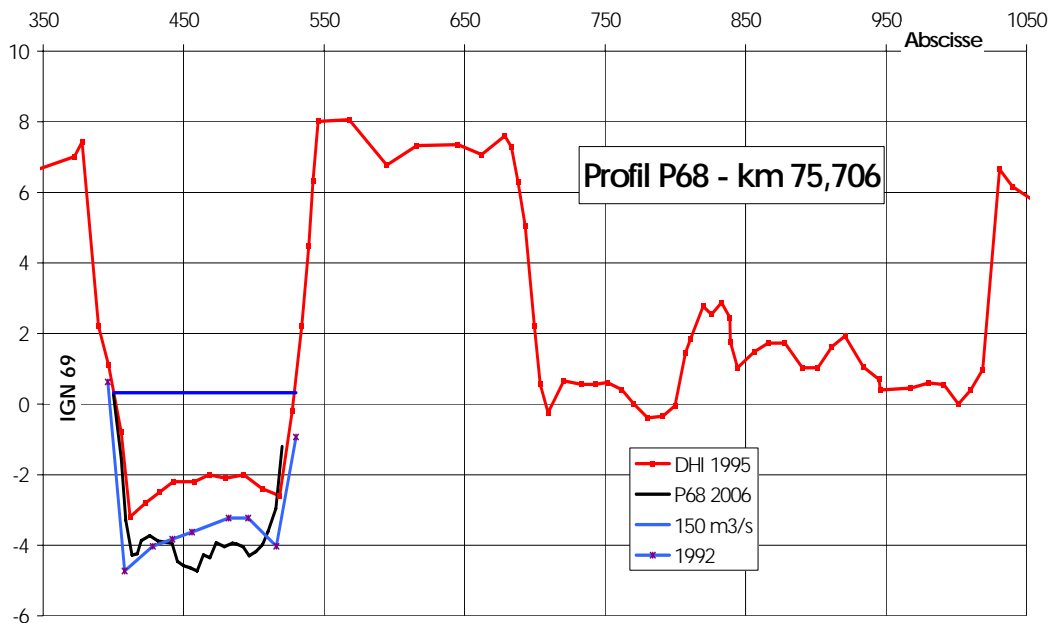
Profil	71-1	72-1	73	74	74-1	75
Abscisse (km)	79.858	80.311	81.500	82.900	83.080	83.653
Variation section (m ²)	79	20	-142	-2	-54	-63
Variation volume (m ³)	22472	-72634	-101217	-5065	2545	

Volume érodé : 500 000 m³

A première vue, cette érosion peut s'expliquer par la valeur élevée de la pente; mais cette explication est contredite par la variation des niveaux : les niveaux de basses mers se sont exhaussés de 1996 à 2006 à Thouaré et sont restés stables à Mauves. On pense alors à une atténuation progressive de l'exhaussement aval.

Mais il reste que l'importance du volume érodé interpelle : car elle tendrait à montrer que l'incision reste forte et que de nouveaux abaisssements peuvent être redoutés. La relative contradiction entre exhaussement ou stabilité des niveaux et érosion du lit méritait d'être examinée de plus près. Trois remarques vont nous permettre de relativiser l'importance de l'érosion.

1. Nous disposons dans nos archives d'une bathymétrie de 1992 en aval de Mauves ; nous avons reporté sur les profils DHI 1995 ces profils entre Mauves et Thouaré : ils révèlent en 1992 des fonds plus bas que les fonds 1995 et voisins des profils 2006, comme le montre le profil 68 ci joint du bras navigable. La variation constatée de 1995 à 2006 doit donc être expliquée par une fluctuation des fonds plus que par une tendance continue.
2. La cause de cette fluctuation apparaît alors assez évidente; c'est la variation du régime hydrologique : en 1994-1995, le nombre et la puissance des crues ont déterminé un transport solide exceptionnel. En amont de Mauves, ce transport a été accentué par le rétrécissement du lit que nous avons décrit précédemment et le lit s'est érodé ; le tronçon en aval n'ayant pas aux forts débits la même capacité de transport en raison de la présence des bras secondaires, les matériaux se sont déposés dans le bras navigable. Les débits ordinaires ont progressivement érodé ce dépôt au cours des années suivantes.



3. Si notre théorie est exacte, on devra constater que le lit est dans le rétrécissement de Mauves plus profond en 1995 qu'en 2006. Les profils 65 levés par Hydro-expert en 1998 et par Astérie en 2006 (voir graphique) permettent la comparaison et montrent effectivement que le lit à ce profil est plus profond en 1995 qu'en 1998 et 2006.

Ces remarques concordantes permettent donc de relativiser l'importance des volumes érodés : il s'agit pour une large part de volumes déposés en aval de Mauves lors des années exceptionnelles 1994-1995 et l'érosion n'est peut être que la moitié ou le quart du volume calculé.

3.3.5. Synthèse des observations

L'exhaussement des niveaux entre Bellevue et Trentemoult est corroboré par la forte diminution de la pente en basse mer de part et d'autre du pont de Bellevue, par l'élévation des niveaux et enfin par le constat de l'élévation des fonds.

Nous avons estimé à 200000 tonnes de sable le volume déposé annuellement entre Bellevue et Trentemoult.

L'existence de ce dépôt conduit à s'interroger sur l'évolution en aval ; mais Sogreah nous a indiqué que la comparaison effectuée parallèlement ne donnait pas de résultat fiable : elle montre un abaissement des fonds alors que l'on aurait pu s'attendre à la prolongation en aval du dépôt amont. Il apparaît que les dernières bathymétries effectuées en 2008 ont recherché les surfaces sableuses alors que les mesures antérieures peuvent correspondre à une couverture de vase.

Mais nous avons vu aussi que les différences dans le régime des crues avant levé bathymétrique introduisent des fluctuations qui faussent le diagnostic : les crues de 1994-1995 ne peuvent-elles avoir déposé un volume très important en aval de Trentemoult, volume que les crues plus ordinaires qui ont suivi ont peu à peu évacué vers l'aval ?

La même analyse nous conduit à penser que l'abaissement des fonds est, entre Mauves et Bellevue, bien inférieur au volume calculé. Mais même faible, l'abaissement des fonds nous interdit d'espérer un exhaussement appréciable et prochain dans ce tronçon et de ce fait dans les tronçons amont.

Les données des marégraphes amont de Mauves à Saint Florent démontrent une stabilité globale qui n'exclut pas des ajustements locaux du lit et génèrent aux débits moyens des abaissements (Ancenis) et des exhaussements (Oudon).

3.4. Discussion des possibilités d'intervention

3.4.1. La recherche des objectifs et des fonctions

Le groupe de travail pour la redéfinition d'un cadre d'objectifs et d'interventions pour la restauration de la Loire entre les Ponts de Cé et Nantes s'est réuni à plusieurs reprises pour redéfinir les objectifs de restauration de ce bief, afin de satisfaire aux différentes fonctions et usages du fleuve.

L'annexe au compte rendu du 3 mars définit dans un tableau les fonctions à assurer, quantifie les exigences et esquisse les degrés de liberté. Nous en avons extrait les thèmes afférents à la discipline hydro-sédimentaire et plaçons en regard nos interrogations et commentaires.

Relèvement des niveaux et remise en eau

La première exigence est l'obtention de boires noyées à 850 m³/s et le relèvement du niveau d'eau de 1 m à 1.5 m à ce même débit : il faut remarquer que, si cette exigence est recherchée en plusieurs points de Loire, la continuité du transport sédimentaire conduira à l'étendre à l'espace intermédiaire, sauf si des chutes fixent une discontinuités dans la ligne d'eau à débit donné.

La seconde exigence est le maintien ou le rétablissement de la continuité hydraulique dans les bras secondaires, pour éviter leur transformation en bras morts. Nous remarquons que trois possibilités satisfont à cet objectif :

- Elever les niveaux en Loire en conservant les fonds dans les bras.

- Abaisser les fonds dans les bras secondaires ou araser les obstacles (duits ou gués).
- Cumuler l'élévation des niveaux en Loire et l'abaissement des fonds dans les bras secondaires.

Navigation de pêche de plaisance ou de tourisme

L'exigence de navigabilité pourrait conduire à préconiser une hauteur d'eau de 1.2 m minimum pendant 75% de la période estivale, soit pour un débit de 220 à 250 m³/s.

Nous avons décelé dans la lecture des comptes rendus un certain pessimisme en ce qui concerne la compatibilité de la navigation avec le relèvement des étiages. Ce pessimisme nous conduit à faire une analyse de l'incidence des diverses actions envisageables sur l'évolution des tirants d'eau. Nous avons au chapitre 1 formulé plusieurs remarques sur ce sujet :

- L'accroissement de la largeur du chenal entre épis est effectivement un facteur de diminution du tirant d'eau : il faut donc proscrire tout élargissement dans les sections où les profondeurs sont juste suffisantes ou a fortiori déjà trop faibles.
- Il est évident qu'il en est de même pour un accroissement du débit dérivé dans les bras secondaires.
- En revanche un abaissement partiel des épis n'a qu'une incidence très limitée sur le tirant d'eau si les épis restent hors d'eau au débit minimum navigable.
- L'élévation des fonds dans les biefs actuellement profonds peut être obtenue par recul et arasement des épis ; en diminuant le tirant d'eau dans ces zones profondes, on augmentera la pente, ce qui élèvera le niveau et augmentera le tirant d'eau dans le tronçon amont souvent peu profond.
- La création de chutes appréciables rend difficile ou impossible la remontée des bateaux faiblement motorisés. A la suite de l'expérience des seuils du Fresne, le groupe de travail s'interroge sur la possibilité de la conception de seuils artificiels, ressemblant à des seuils naturels et franchissables par les bateaux de plaisance.

Rives du fleuve et des annexes

L'objectif affiché est de favoriser l'accueil écologique des espèces terrestres, flore et faune : le document préconise à la fois de respecter la mobilité et d'encourager la « renaturation » des rives. Cette idée nous semble résulter d'un constat de « fragilisation » des rives que notre analyse conduit à contester ; la fragilisation des rives restera certes un thème privilégié du cahier de doléances des riverains, mais c'est au contraire le rétrécissement du lit qui est le fait le plus généralement observé au 20^{ème} siècle.

Une clarification de ce thème est donc nécessaire : l'équilibre morphologique « naturel » est le résultat d'un conflit entre l'érosion qui dénude les talus et la sédimentation qui accompagne le développement de la couverture végétale. Dans le cas de la Loire, la couverture végétale s'établit spontanément sur les rives convexes ou rectilignes. Les rives concaves peuvent être soit nues, soit végétalisées si elles sont stabilisées par les épis ou par les perrés de rive ; ces ouvrages sont paradoxalement un moyen de « renaturation » des rives. La sédimentation qu'ils occasionnent est une cause de rétrécissement du lit : ne faut-il pas inverser alors la tendance et détruire certaines protections peu utiles, pour favoriser la recharge en sable du lit avec les matériaux érodés ?

Ces remarques ne concernent pas les boires fermées à l'amont.

Ne pas aggraver l'évacuation des crues

L'objectif affiché est d'éviter de remonter les niveaux d'inondation de l'habitat, pour la crue de référence du Plan de Prévention des Risques Inondation. Nous nous interrogeons sur l'adéquation de cet objectif restrictif avec l'exigence d'un développement durable qui semble aujourd'hui s'imposer à toute stratégie d'aménagement du territoire. La non

aggravation de l'inondation ne nous paraît pas un objectif suffisant pour un plan de restauration de la Loire prenant en compte les usages. La prévention du risque inondation doit pouvoir être considérée au même titre que les autres contraintes, les actions diminuant l'inondabilité étant considérées comme partie intégrante du plan de restauration.

L'exigence de remontée des niveaux est forte à 850 m³/s (1 m à 1.50 m), ce qui peut conduire à une aggravation des niveaux pour la crue de référence. Mais les niveaux actuels de l'écoulement des crues, fortement abaissés au cours du 20^{ème} siècle, sont-ils une référence à ne transgresser en aucun cas ? L'analyse de cette contrainte doit avoir toute sa place dans l'élaboration des options et compromis du plan de restauration.

Rétablir l'équilibre hydro-morphologique

Il est évident que ce thème est celui qui nous interpelle le plus l'auteur de la présente étude. Le groupe de travail a mis l'accent sur l'arrêt de l'érosion régressive ; nous avons décrit tout au long de notre descente de la Loire l'évolution du lit et signalé effectivement la persistance d'érosions ; mais cette persistance nous paraît être préoccupante non par ses conséquences qui demeurent très limitées, mais par le fait qu'elle révèle que toute recharge du lit en sable et donc tout exhaussement durable de l'étiage sont illusoire s'il ne sont pas accompagnés d'aménagements diminuant la potentialité de transport solide dans la section Angers- Nantes et donc permettant le dépôt partiel ou total des sables. La recherche des solutions supprimant les érosions résiduelles est donc inutile, puisque les autres actions relevant les niveaux auront résolu ce problème.

Le constat de la persistance d'érosions locales en quelques points et l'absence de dépôts autres que locaux en amont de Bellevue sont les conclusions principale de nos analyses ; cela veut dire qu'en première approximation, entre la Pointe et Nantes, le débit solide sortant est du même ordre de grandeur que le débit solide entrant.

La comparaison des pentes de lignes d'eau entre le début du 20^{ème} siècle et aujourd'hui montre que, par suite des dragages de l'estuaire, les pentes d'écoulement se sont fortement majorées en aval d'Ancenis en basse mer : la capacité de transport est donc plus forte qu'auparavant et est localement encore augmentée par les rétrécissements. Les érosions devraient être importantes : or elles sont faibles ou nulles.

La modération de l'érosion peut résulter de deux causes distinctes :

- L'équilibre du lit de la Loire qui aurait été obtenu avec une faible pente au début du 20^{ème} siècle doit être relativisé : il s'agissait en fait d'un lent exhaussement au fur et à mesure de la sédimentation du lit et du comblement naturel et inéluctable des boires.
- Le déficit du charriage est compensé par le mécanisme de pavage : lorsque l'on a un déficit « entrée-sortie » dans un bief donné, l'abaissement des fonds s'accompagne d'un tri granulométrique qui retient les plus gros éléments mieux que les petits et permet une certaine stabilisation du lit. Ce point est développé dans l'annexe 2.

Si le grossissement par pavage du diamètre des matériaux en place évite ou limite l'érosion du fond, un apport supplémentaire de matériau d'amont, qu'il provienne du transit naturel ou d'une recharge artificielle, sera inefficace ou peu efficace pour relever les fonds actuels : car il sera constitué de matériaux plus fins et donc plus mobiles que ceux qui constituent le lit actuel ; ceux ci ne se déposeront pas dans le chenal navigable et la plus grosse fraction sera transportée à Nantes et dans l'estuaire.

Pour que ce dépôt soit effectif, il faut envisager des actions diminuant la potentialité du transport par charriage de fond.

Lors de la réunion de travail du 23 avril, différents moyens de restauration concernant le fonctionnement hydro-sédimentaire ont été évoqués :

1. élargir la section,
2. accepter les érosions de berge pour recharger le lit,
3. apporter des sables marins,
4. allonger le parcours du fleuve,
5. réduire la pente du lit.

1. L'élargissement de la section a pour but de diminuer la capacité de transport solide du bras navigable, ce qui peut être obtenu en abaissant la cote des épis et en les reculant mais seulement dans les sections où le tirant d'eau est trop important. La réalimentation des bras secondaires contribue également à diminuer le débit du chenal navigable : elle se fera par enlèvement ou abaissement des chevrettes et des gués, par essartement et enfin si nécessaire par curage mécanique et dépôt dans le chenal. On peut aussi envisager la création de bras secondaires dans des tronçons étroits en créant un chenal pilote régulièrement scarifié pour faciliter l'érosion ou en façonnant le bras par curage mécanique : un tel bras pourrait être ouvert par exemple dans les épis de rive gauche à l'amont du pont de Mauves et apporter à la Loire plusieurs centaines de milliers de m³ de sable, dont la qualité devra toutefois être vérifiée.
2. L'intérêt d'une recharge par les berges a été déjà souligné. Dans les parties du fleuve fortement abaissées, c'est à dire en aval de Saint Florent, on peut soit favoriser une érosion en enlevant les protections les moins utiles, soit remodeler les passages étroits qui sont la cause de sur-profondeurs abaissant les niveaux d'étiage en amont. Le traitement de 50 hectares, soit une largeur moyenne de 12 m entre Saint Florent et Saint Félix, libèrerait environ 1 million de m³ de sable et rechargerait le chenal d'une dizaine de centimètres.
3. La proposition d'une recharge par les sables marins peut être une idée intéressante : elle ne sera efficace que si les matériaux apportés ont des spécifications granulométriques comparables à celles des matériaux présents dans le fleuve même. Or Berthois rapporte qu'à Donges les carottes prélevées ne contiennent que 26 % de matériau sableux supérieur à 0.5 mm. La proposition ne sera intéressante que si l'on trouve en mer un gisement de matériaux de d₅₀ supérieur à 1.5 mm, à la rigueur 1 mm. Cette recharge du lit devra, comme toute recharge sédimentaire, être associée à une diminution de la pente par l'un des moyens évoqués. Il faudra en outre déposer les matériaux le plus en amont possible.
4. L'allongement du parcours du fleuve serait une mesure beaucoup plus destructrice que celles déjà importantes envisagées ci dessus ; nous ne pensons pas que l'on puisse en obtenir un résultat significatif . En concevant les épis de Loire, Kaufmann a accordé beaucoup d'importance à l'allongement créé par la sinuosité du chenal entre épis ; cet allongement, qui ne faisait que suivre les méandres internes au lit de la Loire, n'a eu aucun effet perceptible.
5. La diminution de la pente est la clé de la réussite d'un plan de restauration : elle doit viser à retrouver les pentes observées au début du siècle, la pente actuelle ne pouvant que transiter vers l'aval les apports solides d'amont et a fortiori les divers matériaux provenant de la recharge latérale que nous venons d'évoquer. En effet, ces matériaux libérés accroîtront encore la pente et seront donc facilement « digérés » par la Loire. En outre, ils sont plus petits que le pavage actuel, et donc beaucoup plus mobiles. Pour augmenter la pente, le groupe de travail a envisagé des interventions plus volontaristes :
 - Recréer des points durs comme les anciens seuils naturels.
 - Epis à radier moins conséquents que ceux du Fresne.

- Seuils noyés en enrochements.
- Duits filtrants obliques recréant une sinuosité plus naturelle.
- Apport de sable marin, déjà traité.

Les quatre premières interventions ont pour objet le relèvement des niveaux et par là la diminution de la pente dans le lit sableux; ce type d'ouvrages a été très critiqué et il est donc nécessaire de clarifier leur mode de fonctionnement et les critères déterminant leur efficacité. Cette analyse est faite au paragraphe suivant.

Permettre la circulation des espèces aquatiques

La permanence de la remontée des migrateurs est une contrainte majeure qui s'impose à tout aménagement visant à relever les niveaux. Nous avons observé que les épis à radier semblent avoir satisfait à cette contrainte, alors qu'ils ne sont pas jugés satisfaisants du point de vue des exigences de navigation (au moins l'un des deux). Le problème de la « franchissabilité » se pose dans des termes différents pour la section soumise à la marée, notamment en raison de la remontée des civelles. Le maintien de la circulation des espèces aquatiques est avec la navigabilité le principal obstacle à la conception d'ouvrages économiques de relèvement des niveaux.

3.4.2. Analyse du fonctionnement des ouvrages de relèvement des niveaux.

Analyse théorique du dépôt en amont des ouvrages de chute

La nécessité de la création d'une chute pour l'obtention d'un dépôt de matériaux et d'un relèvement des fonds est souvent ignorée et parfois contestée dans ces termes : « Ne suffit-il pas de placer au fond du lit un barrage qui retiendra les matériaux comme le fait par exemple un mur de soutènement ? »

Nous voudrions démontrer dans ce paragraphe que la condition nécessaire et suffisante pour qu'un ouvrage assure à son amont un relèvement des niveaux et par là du fond du lit est l'existence sur cet ouvrage d'une chute accompagnée d'une mise en vitesse; l'efficacité de la rétention des matériaux transportés est proportionnelle à l'importance de la chute pondérée aux débits morphogènes, c'est à dire aux débits assurant un transport solide de fond.

Au préalable, rappelons deux faits bien connus :

- L'effet des courants secondaires se traduit sur la Loire par la formation de « mouilles », fosses d'une profondeur pouvant excéder de plusieurs mètres la profondeur moyenne du fleuve. Le creusement d'une fosse s'effectue en hautes eaux, la vitesse y étant forte ; en aval, les matériaux sortent de la fosse en remontant de plusieurs mètres jusqu'à la cote moyenne des fonds. **Ce phénomène montre que la remontée des fonds ne fait pas obstacle au transport des matériaux du lit.**
- Les seuils fixes en rivière de plaine déterminent une retenue des eaux souvent profonde. Si les matériaux transportés dans la rivière en amont du seuil et en dessous de la cote de celui ci n'étaient pas capables de s'élever et de franchir le seuil, les retenues de milliers de seuils de moulins existant en France seraient en permanence remplies de sable ou de gravier : or il n'en est rien.

Il n'y a donc pas de relation directe entre la cote d'un seuil et la cote des fonds à l'amont; seule l'explication hydraulique permet de déterminer à quelle altitude les matériaux mobiles se déposeront à l'amont des seuils fixes. Cette explication est la même quelle que soit la constitution des seuils, roche, maçonnerie ou enrochements et quelle qu'en soit la forme, large, étroite ou à échancrure.

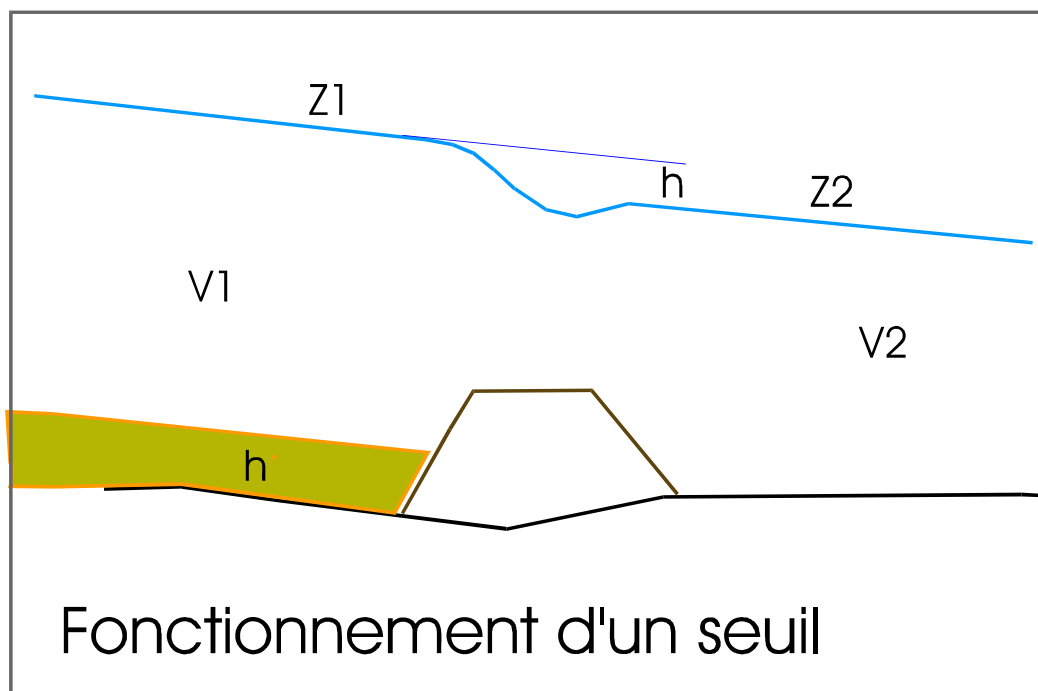
L'analyse théorique ne s'applique pas seulement aux seuils, c'est à dire aux ouvrages relevant le niveau des fonds, elle s'applique aussi aux ouvrages de forme quelconque et notamment aux épis à radier expérimentés au Fresne. C'est en raison de la diversité des formes d'ouvrages possibles que nous n'utiliserons plus dans ce qui suit le terme de seuil : ainsi les épis à radier peuvent être réalisés avec un fond calé aussi bien au dessous qu'au dessus du fond moyen du fleuve. Nous utiliserons le terme « ouvrage de chute » ou ouvrage tout court.

Nous ne traitons ici que le cas des écoulements «noyés », c'est à dire ceux dont le niveau amont est dépendant du niveau aval et qui donc offrent une chute faible : ce sera le cas général des ouvrages en Loire en raison des exigences de franchissabilité piscicole et de navigabilité.

Dans un fleuve en équilibre ou proche de l'équilibre comme aujourd'hui la Loire, la quantité de matériau transporté en aval d'un tronçon est par définition égale à la quantité entrant dans ce tronçon. Si on construit un obstacle qui augmente localement la vitesse et quelle que soit la forme de cet obstacle, l'ouvrage créera une dénivelée ou chute. Cette chute sera fonction de la différence des vitesses sur l'ouvrage et dans le fleuve. Elle sera calculée le plus souvent par la relation de Borda :

$$\Delta H = \alpha \frac{(V_{\text{SEUIL}} - V_{\text{LOIRE}})^2}{2g}$$

ΔH = perte de charge V_{SEUIL} = vitesse sur le seuil V_{LOIRE} = vitesse dans la Loire
 $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$



Le relèvement du niveau dû à la perte de charge créée par l'ouvrage va augmenter la hauteur d'eau en amont et donc augmenter la section d'écoulement. La vitesse de l'eau diminuera et la capacité de transport de sable diminuera : on aura alors dépôt en amont de l'ouvrage d'une fraction du matériau apporté par le fleuve.

Ce dépôt se poursuivra jusqu'à ce que soit obtenue à l'amont de l'ouvrage une section et une vitesse capables d'assurer à nouveau le transport des matériaux provenant de l'amont. Si ces matériaux sont de composition identique à ceux qui étaient transportés avant la construction de l'ouvrage, la section du fleuve, sa vitesse moyenne et donc sa pente tendront vers des valeurs identiques à celles que l'on avait au même point avant cette construction : le lit amont de l'ouvrage se remblaira donc sur une hauteur égale à la chute créée.

Si l'obtention de la chute est la condition nécessaire et suffisante pour que s'effectue le dépôt des sédiments, on en déduit que, si la chute est nulle ou négligeable, le relèvement du fond est nul ou négligeable. Cette évidence suffit à montrer que des ouvrages n'offrant pas de chute, c'est à dire maintenant ou modifiant peu la vitesse de l'écoulement, appelés parfois seuils noyés ou seuils de fond, ne permettent pas un relèvement des niveaux et des fonds qui soit à la hauteur des attentes des acteurs. D'autre part, si la mise en place de chutes appréciables est jugée inacceptable par les acteurs et usagers de la Loire, le relèvement des niveaux d'étiage que l'on peut espérer sera très inférieur aux objectifs envisagés par le groupe de travail, voire même ne compensera que difficilement les tendances résiduelles à l'abaissement.

L'extension de l'exhaussement en amont : le « remous solide »

On a vu que, pour rétablir sur l'ouvrage un transport solide égal au transport antérieur à la construction, il faut en théorie qu'en tous points du lit amont la vitesse et donc la pente de l'écoulement retrouvent leur valeur antérieure. Si la pente est la même qu'auparavant, la future ligne d'eau sera parallèle à l'ancienne et le dépôt de sédiments en amont d'un ouvrage de chute peut donc se prolonger à l'infini. Un seul ouvrage est donc théoriquement capable d'assurer la recharge sédimentaire et le relèvement de l'étiage d'une hauteur donnée sur une longue distance en amont. Mais il y a deux restrictions à apporter à ce point de vue théorique :

- Le délai nécessaire pour atteindre un tel objectif sera long et directement lié à l'importance des apports solides amont.
- Si le lit est actuellement pavé du fait d'un déficit d'apport amont, comme c'est le cas en de nombreux points du fleuve, la vitesse nécessaire au transit des apports solides sera inférieure à la vitesse actuelle, la section ne retrouvera pas sa valeur antérieure et la pente en amont sera plus faible qu'actuellement. Le « remous solide » ne remontera que sur une longueur finie en amont. A la limite, le remous solide peut même être nul, notamment si le relèvement des niveaux est faible par rapport à la hauteur d'eau normale. On déduit de cette dernière remarque que le rendement de l'ouvrage, c'est à dire sa capacité à retenir les matériaux, sera plus faible pour les faibles chutes que pour les fortes chutes.

Fonctionnalité des différents types d'ouvrage

Le raisonnement ci dessus admet implicitement que la chute est constante quel que soit le débit du fleuve : ce n'est pas le cas de la plupart des ouvrages en rivière.

La capacité de dépôt que permet un ouvrage de chute devra être recherchée pour les débits assurant la plus grosse partie du transport solide de fond. A titre d'exemple, selon un calcul approximatif effectué avec notre formulation présentée en 2007, 80% du volume moyen annuel est transporté à Montjean entre 400 et 3500 m³/s, 10% au dessus et 10% au dessous de ces débits, pour un débit solide moyen annuel estimé à 400 000 m³.

Les seuils larges

Les seuils horizontaux barrant toute la largeur du fleuve sont les ouvrages admis le plus communément pour le relèvement des niveaux d'étiage. Mais dans le cas de la Loire et en raison de la faiblesse de la pente du fleuve, la chute sur ce type de seuil décroît rapidement avec le débit. Nous prendrons l'exemple d'un seuil qui serait construit en aval du pont d'Ancenis sur la largeur du lit, soit 300 m, et qui offrirait une chute (limite pour la navigation) de 0.25 m à 150 m³/s et une vitesse de 2.5 m/s ; à l'aide du graphique hauteur-débit présenté en 3.3.2, on peut calculer que ce fonctionnement sera obtenu avec un seuil calé à 0.20 m sous le niveau aval à 150 m³/s, soit à 2.35 IGN 69.

A 800 m³/s le niveau aval sera égal à 5.5 IGN 69 et la vitesse sur le seuil sera inférieure à 1 m/s. La chute ne sera plus que de 5 cm : à ce débit il n'y aura pratiquement pas de rétention de matériau.

Les seuils larges sont donc intéressants pour relever le niveau en étiage. Mais ils sont inefficaces dès que le débit augmente : avec notre exemple, l'intérêt est nul au module et la rétention des matériaux sera négligeable.

Les épis à radier

Pour obtenir une élévation des niveaux qui soit constante dans une large fourchette de débits, la solution est le rétrécissement du lit ; cette solution n'est efficace que si le fond est capable de résister à l'érosion. La mise en place d'un radier entre les épis est le moyen de la stabilisation des fonds : nous avons donc appelé cet ouvrage « épis à radier ».

Le groupe de travail a estimé que l'importance des épis du Fresne était trop grande ; il est bien sûr possible de réaliser des ouvrages offrant une dénivelée plus faible, Mais cela peut conduire à des surcoûts très importants pour deux raisons :

- La perte de charge occasionnée par l'ouvrage est très sensible à la variation du niveau. L'expérimentation du Fresne a montré cette sensibilité en mesurant une vitesse de 2.2 m/s sur un seuil, ce qui semble acceptable, et de 2.60 m/s sur l'autre, ce qui est excessif.
Plus faible est la chute et plus grande sera l'erreur relative dans la détermination de cette chute. Des ouvrages de faible chute devront donc pouvoir être modifiés facilement pour les ajuster aux observations de niveau.
- La deuxième raison est la conséquence du pavage : un ouvrage offrant une trop faible dénivelée risque de ne pas retenir des matériaux apportés naturellement ou artificiellement, car ces matériaux seront de diamètre inférieur aux diamètres observés actuellement à la surface du lit .

On doit remarquer que l'expérience du Fresne pêche peut être par l'ambition exagérée du concepteur et du Maître d'ouvrage : vouloir à la fois relever les forts étiages et redistribuer le débits entre bras navigable et bras de Cul de Bœuf était audacieux, quoique réussi, mais de ce fait l'alluvionnement ne semble pas avoir été obtenu. Nous avons dit toutefois au chapitre 2 la nécessité de mesures complémentaires pour préciser l'évolution 6 ans après cette réalisation et confirmer ou infirmer ce jugement. Mais une conclusion déjà s'impose : la forte sensibilité hydraulique à la variation des paramètres morphologiques rend difficile pour cette sorte d'ouvrage la recherche de compromis entre des objectifs contradictoires : les épis à radier devront privilégier soit la réalimentation des bras secondaires, soit la rétention des matériaux à leur amont.

L'approfondissement du bilan de transport nous montre, malgré les incertitudes liées à ce calcul, que les débits assurant la plus grosse partie du transport sont élevés et de l'ordre de 1500 m³/s : nous en déduisons que, si les acteurs maintiennent le recours à cette technique, les épis à radier devront conserver la chute nominale jusqu'à des débits plus élevés que ceux

envisagés jusqu'à présent, probablement 4000 m³/s. Leur incidence pour le débit de référence inondation (6000 m³/s ?) risque alors de rester appréciable.

Une alternative aux ouvrages de chute : les chenaux rugueux

Pour que cette analyse soit complète, on doit dire qu'il existe un autre moyen, différent ou complémentaire, de créer une chute : il s'agit du frottement rugueux sur le fond obtenu grâce à la mise en œuvre d'enrochements d'autant plus efficaces que leur dimension est grande. Il est facile cependant de démontrer que, dans le cas de la Loire, ce type d'ouvrage est, à vitesse d'écoulement maximum égale, moins économique qu'un ouvrage ponctuel, seuil ou épi à radier.

Ainsi, pour obtenir une vitesse inférieure à 2 m/s à 1200 m³/s et 2.4 m/s à 2000 m³/s, il faudrait choisir les spécifications suivantes :

- Revêtement du lit avec une couche d'enrochements sur 1 m d'épaisseur et 135 m de largeur, ce qui rétrécira le lit d'environ 30%.
- Donner à l'ouvrage une pente longitudinale de 0.9/1000.

Le relèvement des niveaux et des fonds serait de 7.5 cm pour une longueur d'ouvrage de 100 m, ou 0.225 m pour un ouvrage de 300 m, qui nécessiterait 50000 m³ d'enrochements. Appliquée à la totalité du débit de la Loire cette idée n'est donc pas réaliste. Mais pour le relèvement d'une petite fraction du débit, elle peut mériter une étude plus approfondie.

Le site particulier de Bellevue : une proposition

Plusieurs raisons conduisent à accorder une attention particulière au site de Bellevue :

- Il se situe à la transition entre la zone amont où les potentialités de dépôt dans le chenal navigable sont nulles et la zone aval où d'importants dépôts ont été constatés.
- Le site présente un plateau rocheux qui constitue un seuil naturel qui peut permettre moyennant aménagement une chute importante.
- Ce plateau ne s'étend pas à toute la largeur, ce qui peut être considéré comme un inconvénient, mais peut faciliter la mise en œuvre d'un canal assurant à la fois franchissabilité et navigabilité.

L'ouvrage serait alors constitué par :

- le plateau rocheux, dont la géométrie pourra être corrigée avec des structures ancrées dans la roche, mais de dimension et de coût modéré.
- Un chenal navigable et franchissable, constitué soit par les enrochements rugueux évoqués ci dessus, soit sectionné par plusieurs épis à radier, soit par une combinaison des deux options. Ce chenal serait très long, plusieurs centaines de mètres en rive gauche, mais ses dimensions seraient limitées à la seule satisfaction de la navigabilité et de la franchissabilité piscicole.



Dans l'état actuel de notre réflexion, la chute nominale offerte par cet ensemble serait de l'ordre du mètre, ce qui assurerait le blocage des sables durant de nombreuses années et permettrait d'assurer la mise en œuvre en amont d'ouvrages plus modestes. L'accroissement probable des niveaux au débit de référence « inondation » appellera un exhaussement et un renforcement des digues, côté rive droite et peut être rive gauche.

Liste des figures et rapports et fichiers

Figures hors texte : évolution des niveaux en eaux ordinaires

1. La Pointe
2. La Possonnière
3. Chalennes
4. Montjean
5. Saint Florent
6. Ancenis

Figures hors texte : profils en long

7. La Pointe - Montjean
8. Montjean - Oudon
9. Oudon – Nantes

Fichiers rapport phase 1 et exposés

10. Rapport 10-2009 chap 123 V6.doc
11. Annexe 1 coordonnées PK Lefort.doc
12. Annexe 2 granulométrie transport.doc
13. Annexe 3 formule transport 2007.doc
14. Exposé 18 mai archive

Fichiers sur CD rom (dossier graphiques phase1)

15. Evolution h(Q) la Pointe à Ancenis.XLS (fichiers des graphiques 1 à 6)
16. Profil étiage référence 1898 et crue 1910.XLS
17. Profils en travers comparés Lorin 98 et Astérie 06.XLS (données, profils en travers)
18. Profil en long la Pointe-Saint Florent 95-96.XLS
19. Profil en long Montjean-Nantes 95-96.XLS
20. Lignes d'eau basse mer coef 80 1996 et 2006.XLS
21. Variation fond Hydratec 95 map 2006 amont Bellevue.XLS
22. Variation fond Hydratec 95 map 2006 aval Bellevue.XLS
23. Granulométrie Babonaux 1970.XLS
24. Traitement Lefort Granulo 2006.XLS
25. Distribution débit aval Montjean pour calcul transport .XLS
26. Débit solide journalier Montjean 1989-2008.XLS
27. Etiages de référence et zéro échelles 1898 Bourdaloue .JPG (plan d'époque)
28. Graphique jaugeages Montjean 92 à 08.XLS
29. Montjean anciens jaugeages SHC 79 1900-1950.XLS
30. Recherche h(auteurs) basses mers coef 80 1996 et 2007