

GIP Loire estuaire

La Loire des Ponts de Cé à Nantes

Phase 2

Définition et justification des études nécessaires pour l'évaluation des leviers de restauration

Octobre 2009

Sommaire

| | |
|--|------------|
| Objet de l'étude..... | 5 |
| | |
| 1. Caractéristiques générales de la Loire, ses transformations sous l'effet des ouvrages de navigation et des extractions | 7 |
| 1.1. Rappel : le régime des eaux | 7 |
| 1.2. Morphologie de la Loire à la fin du 19ème siècle..... | 7 |
| 1.3. Les ouvrages de navigation | 8 |
| 1.4. Evolution du lit de 1898 à 1996..... | 8 |
| 1.5. Tendances actuelles de 1995-1996 à 2006-2007..... | 10 |
| 1.5.1. Méthode..... | 10 |
| 1.5.2. Evolution des niveaux | 10 |
| 1.5.3. Evolution des fonds de Nantes à Thouaré (1995-2006)..... | 10 |
| 1.5.4. Synthèse | 11 |
| 1.6. Les matériaux du lit et le transport solide..... | 13 |
| 1.6.1. Les matériaux du lit..... | 13 |
| 1.6.2. Estimations du transport solide | 14 |
| | |
| 2. Analyse et discussion des objectifs de restauration du lit de Loire | 177 |
| | |
| 2.1. Relèvement des niveaux et remise en eau..... | 17 |
| 2.2. Navigation de pêche, de plaisance ou de tourisme | 17 |
| 2.3. Rives du fleuve et des annexes..... | 18 |
| 2.4. Ne pas aggraver l'évacuation des crues..... | 18 |
| 2.5. Rétablir l'équilibre hydro-morphologique | 19 |
| 2.6. Permettre la circulation des espèces aquatiques | 21 |
| | |
| 3. Principes de restauration | 23 |
| | |
| 3.1. Restauration de l'équilibre longitudinal | 23 |
| 3.2. Restauration de l'équilibre transversal..... | 24 |
| 3.2.1. Le remodelage des épis de navigation..... | 24 |
| 3.2.2. La restauration des bras secondaires | 25 |
| 3.2.3. L'élargissement du lit actif..... | 25 |
| 3.3. Gestion des sédiments | 26 |
| 3.4. Conception des ouvrages de chute rachetant la dénivelée excédentaire..... | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Définition des études à conduire..... | 29 |
| 4.1. Etude de faisabilité des actions de restauration..... | 29 |
| 4.1.1. Objet de l'étude | 29 |
| 4.1.2. Contenu de l'étude | 30 |
| 4.2. Programme d'acquisition des mesures et données de terrain..... | 33 |
| 4.2.1. Bathymétrie et topographie | 33 |
| 4.2.2. Lignes d'eau et débits..... | 34 |
| 4.2.3. Données sédimentologiques | 35 |
| 4.3. Etude des ouvrages de chute structurants | 36 |
| 4.3.1. Exposé des problèmes | 36 |
| 4.3.2. Intérêt du modèle physique | 37 |
| 4.3.3. Méthodologie | 37 |
| 4.3.4. Données à acquérir | 38 |

Objet de l'étude

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, tout 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 de la Loire.

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 :

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.

Une autre opération expérimentale qui devrait être engagée à partir de 2009, prévoit le remodelage des épis entre la Pointe et Chalonnes/Loire afin de libérer les sables déposés entre épis et ainsi relever les fonds du lit et les niveaux d'étiage.

La mise en place de seuils a été 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.

Pour cette dernière action, 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 été demandé en premier lieu une expertise spécifique sur les questions hydro-sédimentaires et morphologiques et en deuxième lieu une mission d'assistance à Maîtrise d'Ouvrage portant sur la définition des études préalables et des études d'ingénierie nécessaires. Cette étude comporte deux phases, lesquelles font chacune l'objet d'un rapport spécifique :

Phase 1 : l'expertise hydro-sédimentaire a eu pour but d'éclairer les discussions du groupe de travail mis en place pour la redéfinition des objectifs ; le rapport, présenté au groupe de travail le 18 mai 2009, se compose de trois chapitres :

Le 1^{er} chapitre décrit le tronçon fluvial des Ponts de Cé à Montjean et 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.

Une note annexe analyse les données sédimentologiques et présente un état des connaissances sur le transport solide des sables en Loire.

Phase 2 : la mission d'assistance à Maîtrise d'Ouvrage pour la définition des études préalables et des études d'ingénierie nécessaires fait l'objet du présent rapport de phase 2. Elle se compose de quatre chapitres :

Le 1^{er} chapitre résume les caractéristiques générales de la Loire, ses transformations sous l'effet des ouvrages de navigation, des curages et des extractions et les évolutions observées depuis l'arrêt des extractions, qui ont été détaillées dans le rapport de phase 1.

Le 2^{ème} chapitre décrit les objectifs élaborés par le groupe de travail technique réunissant usagers et acteurs locaux, en ce qui concerne les aspects hydrauliques et sédimentaires.

Le 3^{ème} chapitre propose et discute les leviers ou moyens que nous avons envisagés pour atteindre les objectifs.

Le 4^{ème} chapitre énonce les thèmes hydro-sédimentaires qui devront être abordés par l'étude de faisabilité des leviers de restauration, les données à rechercher et les suivis de terrain à mettre en œuvre et les études des ouvrages structurants.

Remarque préliminaire

Pour faciliter le repérage des points et sections de Loire décrits dans les rapports, 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.

Les coordonnées Lambert des sommets de cette polygonale sont données en annexe 1 du rapport de phase 1 ; 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.

1. Caractéristiques générales de la Loire, ses transformations sous l'effet des ouvrages de navigation et des extractions

Rappel : le régime des eaux

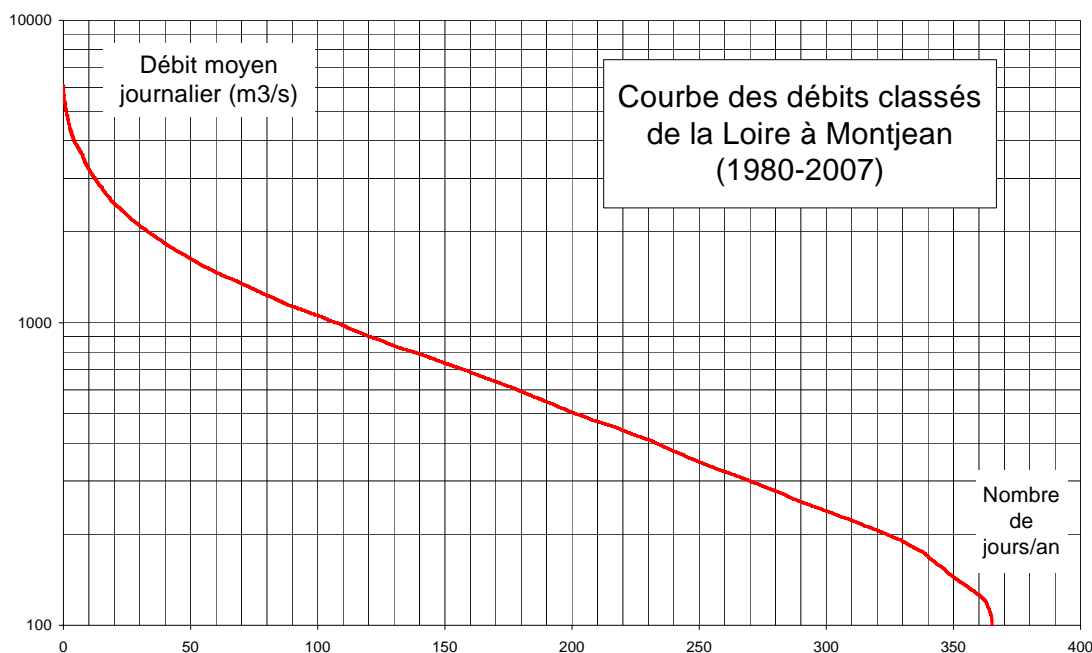
Nous rappelons dans le tableau ci dessous les valeurs caractéristiques du débit de la Loire, calculées à partir des données DIREN de Montjean de 1980 à 2007 inclus, soit 28 années.

Tableau 1 : débits classés de la Loire à Montjean

| Durée de non dépassement | 10 jours | 30 jours | 2 mois | 6 mois | 9 mois | 10 mois | 11 mois | 350 jours |
|---------------------------|----------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------|
| Débit (m ³ /s) | 135 | 180 | 231 | 580 | 1120 | 1460 | 2080 | 2750 |

Sur cette même période, le débit moyen annuel, ou module, est de 864 m³/s.

Le graphique ci dessous permet d'estimer toute valeur intermédiaire.



Morphologie de la Loire à la fin du 19^{ème} siècle

Les interventions humaines dans le but d'améliorer la navigation de la Loire sont anciennes, mais ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que le rythme des transformations s'est accéléré ; aussi on peut considérer que les données de 1898 donnent une image de la morphologie de la Loire dans un état presque naturel.

La ligne d'étiage aux différentes échelles du fleuve que nous avons retrouvée correspondait alors à un débit de 130 m³/s. Le tableau ci après donne les positions des échelles de l'époque, les niveaux à

l'étiage (recalées en IGN 69) et les pentes de cette ligne d'eau de la Pointe jusqu'à Nantes- Saint Félix.

Tableau 2 – Cotes d'étiage en 1898 aux échelles de Loire

| Echelle | Abscisse (km) | Cote IGN 69 | Distance (m) | Pente aval station X 1000 |
|-----------------------------|---------------|-------------|--------------|---------------------------|
| Ponts de Cé | 0,000 | 15.50 | 7450 | 0.254 |
| La Pointe (confluent Maine) | 7.450 | 13.61 | 7309 | 0.182 |
| La Possonnière | 14.759 | 12.28 | 6681 | 0.166 |
| Chalonnnes (rive droite) | 21.440 | 11.17 | 8770 | 0.173 |
| Montjean | 30.210 | 9.65 | 4725 | 0.165 |
| Ingrandes * | 34.935 | 8.87 | 8672 | 0.121 |
| Saint Florent le Vieil | 43.607 | 7.82 | 13067 | 0.171 |
| Ancenis | 56.674 | 5.59 | 18305 | 0.124 |
| Mauves | 74.979 | 3.32 | 16187 | 0.117 |
| Saint Félix | 90.832 | 1.42 | - | |

* Le décalage entre les cotes Bourdaloue de l'époque et les cotes IGN 69 actuelles a été pris égal à 0.63 m.

* La localisation de l'échelle d'Ingrandes en 1898 ne nous est pas connue.

En faisant abstraction des variations locales probablement dues aux variations des formes de lit, on observe la décroissance de la pente de 0.17/1000 en amont de Montjean à 0.12/1000 entre Ancenis et Nantes : il y avait donc au début du 20^{ème} siècle une tendance au dépôt des sables grossiers en aval d'Ancenis.

Les ouvrages de navigation

Les ouvrages d'amélioration de la navigation ont été construits avant la guerre de 14-18 en amont de Montjean et après cette guerre en aval. On peut résumer comme suit leur conception :

- Le débit d'étiage est concentré dans un seul bras, en fermant les autres bras, quelle que soit leur importance, par des chevrettes calées en général à 0.60 m au dessus de l'étiage de référence.
- Le bras navigable est canalisé entre des épis avec une largeur de 120 à 150 m au moyen d'épis enrochés calés à leur tête, c'est à dire côté chenal, au niveau de l'étiage de référence et à l'ancrage en berge à environ 1 m au dessus de cet étiage.
- Les dragages ont été peu importants dans la section amont d'Ancenis, car limités à la mise au gabarit du chenal à une profondeur de 1.5 m. En aval, ils ont été plus importants, avec la création du bassin de marée.
- Enfin l'approfondissement du chenal de l'estuaire en aval de la zone d'étude, de Nantes à Saint Nazaire, a contribué par érosion régressive à l'abaissement des niveaux en amont de Nantes.

Evolution du lit de 1898 à 1996

A partir des études SHC, nous avons pu montrer que l'effet des ouvrages de navigation a été un abaissement de la ligne d'eau d'étiage décroissant avec le débit et croissant d'amont en aval : en 1950, on note par rapport à l'étiage de 1898 un abaissement de l'ordre de 0.40 m de la ligne d'eau de la Pointe à Montjean, de 0.73 m à Saint Florent et 0.95 m à Ancenis.

Basé sur des données différentes, le profil en long ci après représente trois lignes d'eau d'étiage : l'étiage de référence de 1898 (130 m³/s), l'étiage de référence de 1953 (100 m³/s), l'étiage de 1996, que nous avons établi à 150 m³/s en basses mers de coefficient 80 environ. Pour une comparaison au même débit de 130 m³/s, il faut de manière approximative ajouter 0.25 m à la cote de 1953 et soustraire 0.15 m à la cote de 1996. En outre, nous ignorons quelle était la marée lors du levé des étiages de 1898 et d'août 1953.

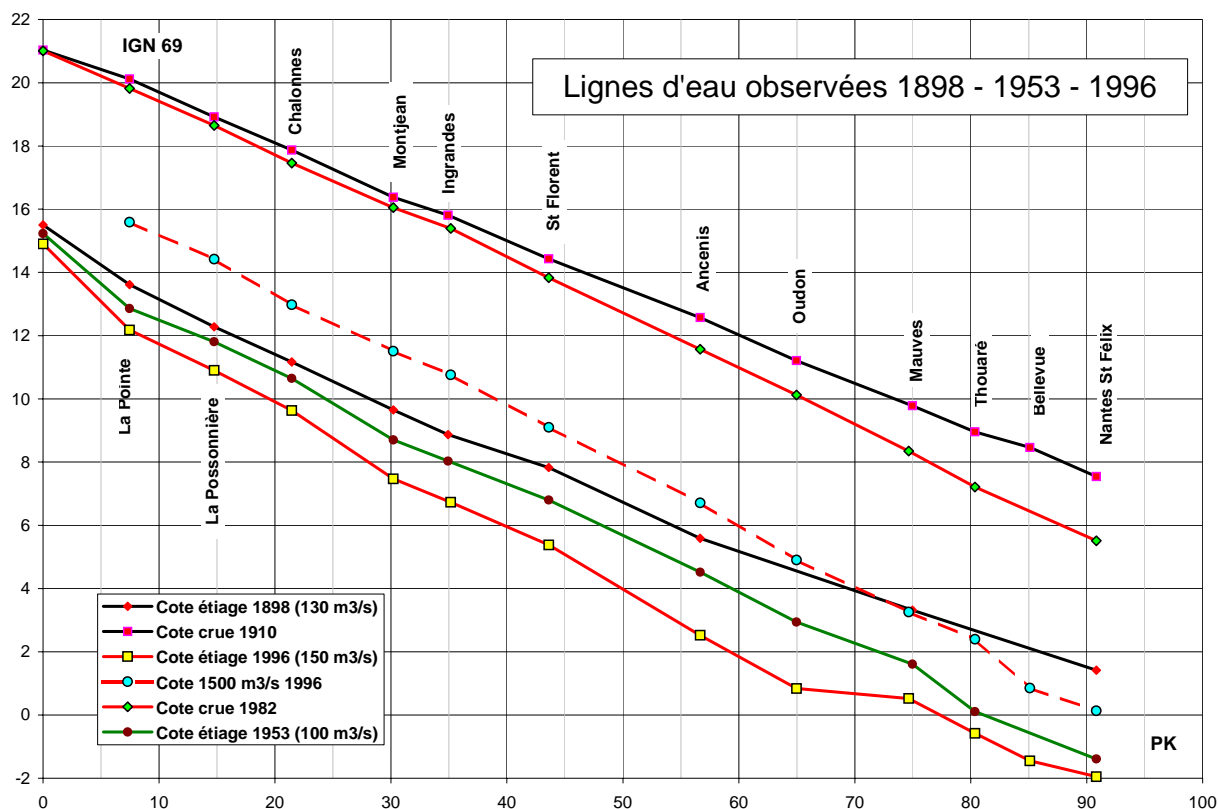
Nous avons figuré sur ce même profil en long la ligne d'eau de la crue de 1910 (6300 m³/s) et de la crue de 1982 (6100 m³/s).

Nous voyons clairement avec ce graphique l'accroissement de l'abaissement d'amont en aval : En 1953, le niveau a baissé par rapport à 1898 de 0.25 m à 0.50 m de la Pointe à Chalonnnes, 0.60 m à 0.80 m de Montjean à Ancenis, de 1.5 m à 2.5 m de Mauves à Nantes St Félix.

En 1996 le niveau a baissé par rapport à 1898 de 1.40 m à 1.70 de la Pointe à Chalonnnes, de 2.3 m à 2.60 de Montjean à St Florent, 3.2 m à 3.5 m d'Ancenis à Nantes St Félix.

L'irrégularité de l'abaissement est due pour une part à l'irrégularité des prélèvements, qui peut n'avoir été que partiellement effacée par le charriage depuis leur interdiction. Mais elle est due aussi, et pour une part peut être aussi importante, à la variation des largeurs cumulées des différents bras du fleuve : le surcreusement des fonds à l'amont du pont de Mauves, dû à la fois à la présence d'un seul bras rétréci par les épis et à la sédimentation en pleine mer, en est l'exemple le plus remarquable.

L'augmentation de l'abaissement d'amont en aval s'est traduit par une augmentation de la pente dans le temps. Cette augmentation de la pente n'est pas seulement observée en étiage : elle concerne tous les débits jusqu'à la plus forte crue observée, comme on peut le voir pour les crues de 1910 et 1982. Il en résulte un accroissement de la capacité érosive du fleuve, qui perdurera, à moins que la remontée des fonds et des niveaux à Nantes efface l'accroissement de la pente en amont. Mais cette remontée est-elle possible et souhaitée ?



Alors qu'en 1898 la pente de l'écoulement était en aval d'Ancenis inférieure à la pente amont, elle est en 1953 comme en 1996 supérieure. Il en résulte qu'à la tendance séculaire au dépôt s'est substituée en aval d'Ancenis et jusqu'à Bellevue une tendance à l'érosion.

D'autre part la présence des épis et chevrettes a confiné le transport solide dans une largeur réduite. Ce confinement a, au même titre que l'accroissement de la pente, accru le transport solide et augmenté encore l'incision. Cette tendance est forte aux débits moyens, mais s'atténue aux très forts débits, lorsque l'écoulement sur les épis devient important. On remarquera que la ligne d'eau 1996 à 1500 m³/s est de Mauves à Nantes inférieure à l'étiage de référence de 1898 et donc au calage probable des épis.

Toutefois le grossissement des matériaux du lit est un facteur de ralentissement de l'érosion.

Tendances actuelles de 1995-1996 à 2006-2007

1.5.1. Méthode

Depuis 1993, il n'y a pas eu de prélèvement en amont de Nantes. Le lit tend donc à retrouver une continuité du charriage et une composition du lit ne dépendant que des paramètres hydro-morphologiques. Dans ce qui suit, nous avons extrait de l'analyse de l'évolution du lit présentée dans le rapport de phase 1 les résultats afférents à la séquence 1996-2006.

Cette évolution a été faite en recherchant pour plusieurs épisodes et à chaque station les niveaux d'eau en fonction du débit à Montjean. Ces stations de mesure sont localisées sur le profil en long ci dessus. Jusqu'à Saint Florent, cette méthode suffit à comprendre l'évolution du lit.

En revanche l'analyse est plus difficile d'Ancenis à Nantes, en raison de l'influence de la marée. Pour que l'appréciation soit la plus représentative de l'évolution des fonds, nous nous sommes intéressé exclusivement aux basses mers de coefficient donné; le coefficient choisi est autour de 80, soit une marée de vives eaux suffisamment fréquente pour obtenir un échantillon significatif. Ce choix conduit néanmoins à une certaine dispersion des points hauteur débit, en raison de la variation des niveaux en aval de Nantes due au vent et à la pression atmosphérique (graphique page suivante). A partir de Thouaré, la dispersion de la corrélation niveau-débit devient de plus en plus forte ; aussi nous avons complété l'analyse en comparant entre Mauves et le bassin d'évitage les profils en travers du fond levés en 1995 et la bathymétrie levée en 2006.

1.5.2. Evolution des niveaux

Notre analyse nous conduit aux conclusions suivantes :

La tendance à la Pointe est un exhaussement faible à l'étiage et qui s'annule au dessus de 800 m³/s.

Les échelles de la Possonnière et Chalonnnes subissent un abaissement d'environ 0.40 m entre 400 et 800 m³/s ; cet abaissement n'est pas dû à une érosion des fonds, mais à la dégradation de la chevrette de l'Alleud consécutive à l'érosion du bras de St Georges de 1982 à 1995, pendant et après les prélèvements des Sabliers Angevins ; l'insuffisance du suivi lors de cette exploitation ne permet pas de quantifier cette érosion.

Les échelles de Montjean et Ingrandes ont vu le niveau s'élever à débit donné sous l'influence des épis à radier du Fresne mis en service en 2003. L'effet propre des épis à radier peut être estimé en étiage à 0.40 m – 0.50 m à Ingrandes et 0.20 – 0.25 m à Montjean. Mais cet effet s'annule autour de 600 m³/s pour deux raisons : d'une part l'abaissement du lit s'est poursuivi de 1996 à 2003 aux deux échelles. D'autre part l'abaissement est atténué en raison de la redistribution du débit entre bras nord et bras de Cul de Bœuf. Au total on peut estimer qu'à Montjean les niveaux ont monté en étiage de 0.20 m, sont restés stables autour de 600 m³/s et se sont abaissés de 0.10 m autour de 1200 m³/s. Mais les jaugeages effectués dans le bras de Cul de Bœuf lors du suivi ont été trop peu nombreux pour juger avec certitude de la redistribution des débits dans ce bras et donc de l'influence des épis à radier sur l'évolution des fonds.

A Saint Florent, l'abaissement s'est ralenti de 1996 à 2006 et n'est observé qu'aux débits moyens.

A Ancenis, l'abaissement du lit semblait s'être arrêté à la fin des années 70 ; mais un abaissement de 0 à 0.30 m est visible de 300 à 1600 m³/s.

Le petit nombre et la dispersion des mesures rendent le diagnostic incertain à Oudon, mais on peut estimer qu'un exhaussement s'est amorcé de 1996 à 2006.

De l'étiage à 1400 m³/s, les niveaux sont restés stables à Mauves.

L'exhaussement augmente de Thouaré à Saint Félix, mais la dispersion est forte ; il est net en étiage, décroît avec le débit et n'est plus appréciable à 1500 m³/s.

1.5.3. Evolution des fonds de Nantes à Thouaré (1995-2006).

Nous avons estimé à 1 360 000 m³ le volume déposé en un peu moins de 11 ans entre Bellevue et le bassin d'évitage, soit sur 10.5 km. Le dépôt moyen annuel serait ainsi de 125 000 m³ ou 200 000 tonnes avec une densité égale à 1.6.

La même analyse a été tentée par Sogreah en aval de Nantes, mais la présence des vases ne permet pas d'obtenir un résultat fiable.

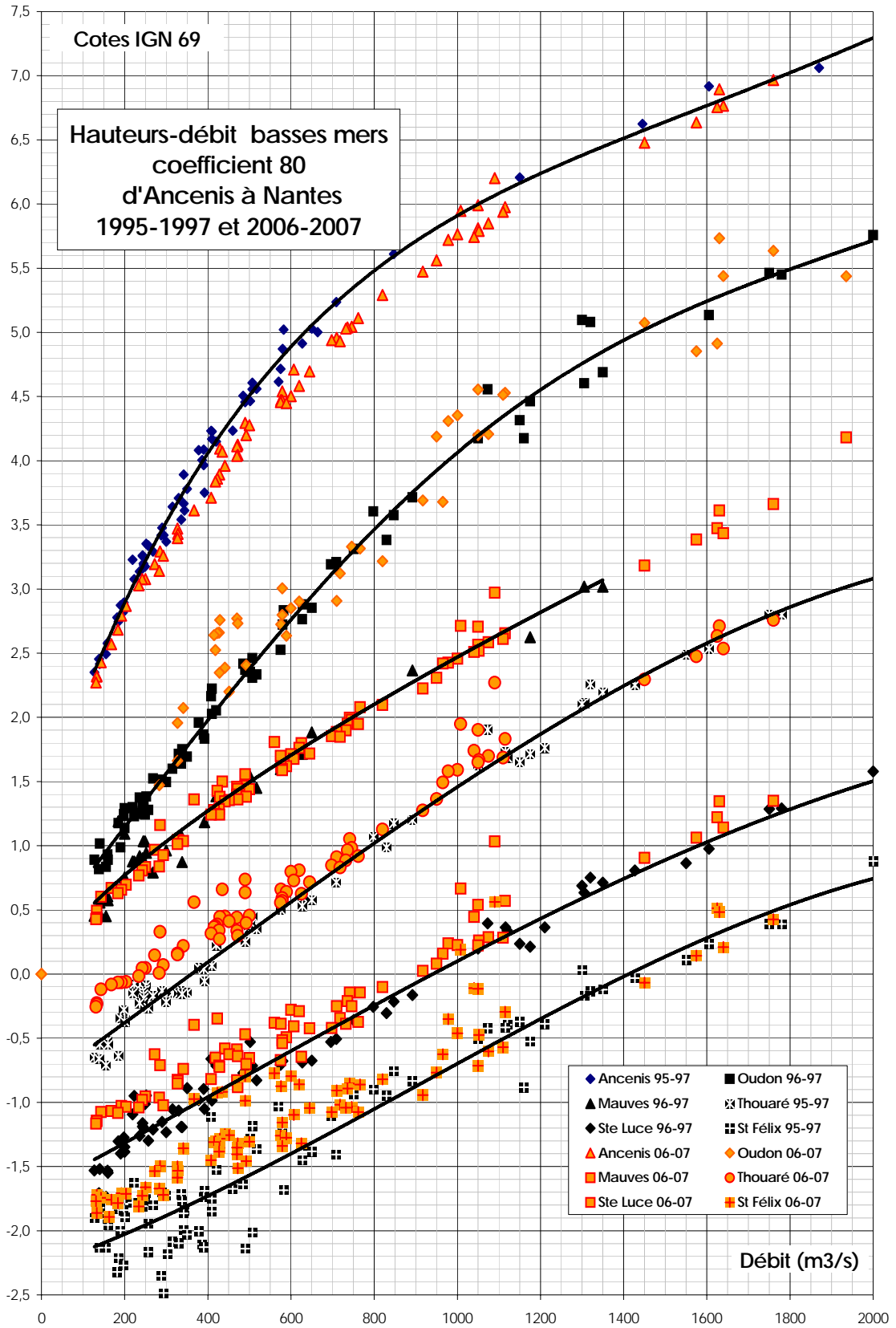
Le même calcul effectué entre Bellevue et Mauves (8 km) sur cette même durée donne une érosion de 500 000 m³. L'importance de cette érosion semble contredite par l'augmentation des niveaux. Mais d'une part elle s'explique en partie par l'effet de remous en aval ; d'autre part, nous avons montré que l'abaissement des fonds s'expliquait par le dépôt de volumes de sable importants en aval du pont de Mauves lors des années hydrologiques exceptionnelles 1994-1995 : mais même si l'abaissement des fonds est plus faible qu'il n'y paraît, il nous est interdit d'espérer un exhaussement prochain et appréciable entre Mauves et Bellevue. On peut penser aussi que subsiste surtout dans le bras navigable un effet résiduel de l'abaissement du lit à Bellevue.

1.5.4. Synthèse

De la Pointe à Mauves, les variations des niveaux de la dernière décennie sont soit liées à des modifications d'ouvrages, soit correspondent à la phase terminale de l'ajustement des fonds après extraction, qui conduit à raboter les seuils, au prix d'un faible abaissement moyen.

De Mauves à Bellevue subsiste une tendance à l'abaissement, tandis que tout concourt à confirmer l'exhaussement des fonds en aval de Bellevue : la faible pente en basses mers, la bathymétrie comparée et la remontée des niveaux.

.../...



Les matériaux du lit et le transport solide

Nous résumons ici les conclusions de l'analyse du transport solide présentée en annexe 2 du rapport de phase 1.

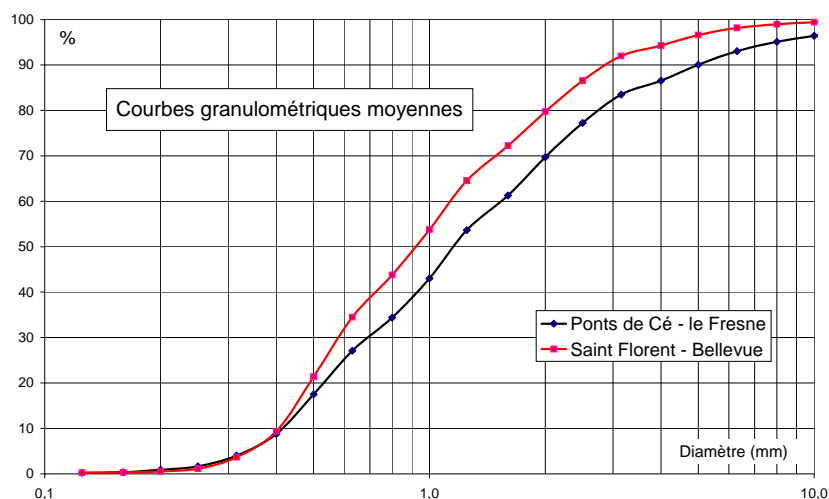
Les matériaux du lit

Nous avons effectué à chaque site de mesure, des Ponts de Cé à Bellevue, le cumul des prélèvements de sable effectués par Astérie en 2006 ; le tableau ci dessous donne les granulométries moyennes à chaque profil de mesure. On remarque que la dispersion des mesures des Ponts de Cé à Montjean est faible; du Fresne à Bellevue, elle est forte, probablement en raison des effets à moyen terme des prélèvements : les zones surcreusées localement se remblaient avec des matériaux de diamètre inférieur à la moyenne, les sections formant seuil sont en déficit et subissent un tri granulométrique conduisant à un diamètre supérieur à la moyenne.

| Lieu | PK | Profil | d30 | Astérie 2006 | | |
|-----------------------|--------|--------|------|--------------|------|--------|
| | | | | d50 | d90 | dmoyen |
| Ponts de Cé | 1,000 | 2 | 0,75 | 1,16 | 3,3 | 1,6 |
| La Pointe | 6,795 | 6 | 0,67 | 1,16 | 4,8 | 2,1 |
| Béhuard | 8,967 | 8 | 0,65 | 1,10 | 3,3 | 1,7 |
| Chalonnnes bras sud | 19,135 | 15 | 0,65 | 1,13 | 5,1 | 2,1 |
| Montjean aval pont | 31,619 | 25 | 0,63 | 1,02 | 2,9 | 1,5 |
| Le Fresne Granges | 37,085 | 30 | 0,90 | 1,82 | 12,7 | 3,3 |
| St Florent île Moquar | 46,550 | 39 | 0,55 | 0,90 | 2,5 | 1,3 |
| Ancenis Juigné | 54,560 | 46 | 0,59 | 0,84 | 2,2 | 1,2 |
| St Géréon Ile Macrièr | 60,680 | 52 | 0,70 | 0,96 | 2,7 | 1,4 |
| Le Cellier Ile Perdue | 67,775 | 59 | 0,80 | 1,43 | 4,6 | 2,1 |
| Mauves amont pont | 73,940 | 65 | 0,51 | 0,73 | 2,6 | 1,3 |
| Ste Luce Bellevue | 83,650 | 75 | 0,85 | 1,43 | 4,7 | 1,9 |

Pour cerner le mieux possible la variation spatiale de la composition des matériaux du lit, nous avons regroupé les six échantillons moyens des Ponts de Cé au Fresne d'une part et les six échantillons moyens de Saint Florent à Bellevue d'autre part. Le tableau et le graphique qui suit représentent assez bien la décroissance du diamètre d'amont en aval.

| | d30 | d50 | d90 | d moyen |
|---------------------|---------|------|-----|---------|
| Amont Saint Florent | 0.69 mm | 1.20 | 5.0 | 2.0 |
| Aval Saint Florent | 0.57 mm | 0.92 | 2.9 | 1.4 |



Estimations du transport solide

Transport en suspension

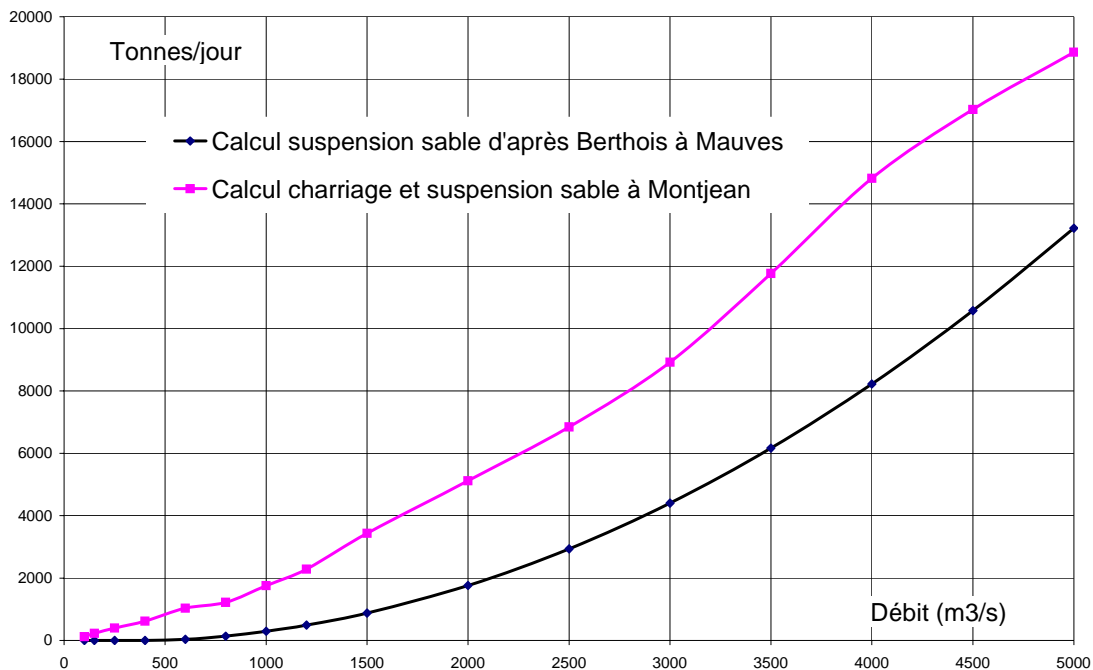
Les travaux de L. Berthois (1952-1971) ont porté sur le transport en suspension de la Loire en aval de Mauves. Cet auteur a pu isoler la fraction sableuse, supérieure à 50μ , dont le transport en suspension est lié aux paramètres hydrauliques locaux et la fraction fine (washload), dont le transport en suspension est indépendant de ces paramètres hydrauliques et qui n'intervient donc pas dans la dynamique du lit. Ses résultats nous ont permis d'évaluer une courbe de transport en suspension de la fraction sableuse en fonction du débit, représentée sur le graphique ci après : on observe que le transport en suspension est négligeable jusqu'à $1000\text{ m}^3/\text{s}$.

L'application à une séquence de 20 années de débits à Montjean aboutit à un transport annuel moyen des sables en suspension de 170 000 tonnes ou 106 000 m^3 à la densité foisonnée de 1.6.

Mais ce chiffre cache une extrême variabilité d'une année à l'autre : le minimum annuel sur la période 1989-2008 est estimé à 35 000 tonnes et le maximum à 500 000 tonnes. 50% du transport en suspension de sable serait d'après ce calcul transporté au dessus de $2830\text{ m}^3/\text{s}$, soit un débit dépassé en moyenne 10 jours/an : le transport du sable en suspension n'est donc significatif qu'aux très forts débits.

La granulométrie des matériaux transportés en suspension mesurée par Berthois est faible, le d_{50} étant en moyenne de 0.3 mm ; on remarque que cette valeur du d_{50} est égale à celle mesurée vers 1970 par Babonaux sur les « buttes » de Loire à + 2 m au dessus de l'étiage.

Le matériau transporté en suspension a une composition correspondant à la tranche 0-7% environ de la composition du lit mesurée par Astérie.



Transport par charriage

Les méthodes d'évaluation du charriage des sables rapportées par L. Berthois ne nous semblent pas probantes. Par ailleurs nous ne disposons que d'estimations des dépôts, soit 125 000 m^3/an de 1995 à 2006 entre Bellevue et Trentemoult et 600 000 m^3 de dépôt en aval de Nantes avant 1950 en année de très forte hydraulicité; ces dépôts sont nécessairement inférieurs au transport solide amont ; il est en outre probable que les transports en suspension observés principalement en grande crue ont transité en majeure partie jusqu'à St Nazaire et n'ont que peu participé à ces dépôts.

Nous avons tenté une évaluation du transport total, charriage et suspension, à partir de la formule que nous avons élaborée en 2007. Le calcul est basé sur les données hydrauliques entre Montjean et

Ingrandes ; la formule est améliorée pour permettre un calcul fractionnel du transport en suspension. Nous avons ainsi obtenu (ci dessus) la courbe de débit solide journalier en fonction du débit liquide.

L'application à la série des débits 1989-2008 nous donne un tonnage annuel de 600 000 tonnes, duquel nous retranchons les transports en suspension, ce qui nous donne un volume charrié de 430 000 tonnes/an en moyenne ou 269 000 m³ pour une densité 1.6.

Ce chiffre qui correspond à un volume deux fois supérieur au dépôt mesuré entre Bellevue et le bassin d'évitage est assez vraisemblable, mais il est impossible de s'en tenir à ce chiffre pour l'étude de l'échelonnement des travaux de restauration ; des mesures de charriage devront donc être rapidement programmées, afin de valider cette méthode de calcul ou une autre.

Dans l'attente de ces résultats, il paraît raisonnable de s'en tenir un transport par charriage de 300 000 tonnes/an.

2. Analyse et discussion des objectifs de restauration du lit de Loire

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 définir les objectifs de restauration de ce bief, afin de satisfaire aux différentes fonctions et usages du fleuve.

L'annexe au compte rendu de la réunion 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. Ce chapitre reprend en partie le contenu du § 3.4.1. du rapport de phase 1.

2.1. Relèvement des niveaux et remise en eau

La première fonction à garantir 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 l'on crée une discontinuité dans les fonds et la ligne d'eau à débit donné, par le moyen d'une chute.

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 secondaires.

Abaisser les fonds dans les bras secondaires ou araser les obstacles (duits ou gués).

Cumuler les deux actions, élévation des niveaux en Loire et abaissement des fonds dans les bras secondaires.

2.2. 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 du groupe de travail un certain pessimisme en ce qui concerne la compatibilité de la navigation avec le relèvement des étiages. Il ne nous semble pas que la contrainte « navigation » soit difficile à satisfaire : nous avons au chapitre 1 du rapport de phase 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 tirants d'eau sont juste suffisants 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 limitée sur le tirant d'eau si les épis restent hors d'eau au débit minimum navigable.

La largeur totale du lit actif (lit sableux entre francs bords), bras secondaires compris, influence la profondeur à l'étiage : les lits actifs étroits créent des sur-profondeurs en crue, qui perdurent en étiage, ce qui diminue localement la pente et abaisse les niveaux en étiage à leur amont (Béhuard, Mauves).

L'élévation des fonds dans ces biefs profonds est alors souhaitable et le recul des épis est alors acceptable ; en diminuant le tirant d'eau dans ces zones profondes, on augmentera la pente de la ligne d'eau, ce qui élèvera le niveau dans le tronçon amont peu profond et en augmentera donc le tirant d'eau.

La création de chutes trop fortes 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 : on doit remarquer que, si de tels seuils occupent toute la largeur de la Loire, ils pourront certes relever la ligne d'eau en étiage, mais pas la ligne d'eau en eau moyenne et a fortiori la ligne d'eau en hautes eaux. Leur effet sur la remontée des fonds sera alors nul.

2.3. Rives du fleuve et des annexes

L'objectif affiché est de favoriser l'accueil écologique des espèces terrestres, flore et faune : le groupe de travail préconise à la fois de respecter la mobilité du lit et d'encourager la « renaturation » des rives. Cette idée nous semble résulter d'un constat récurrent de « fragilisation » des rives que notre analyse conduit à contester ; la fragilisation des rives restera certes un thème privilégié et récurrent 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 : il faut souligner que l'équilibre morphologique « naturel » d'une section en travers de rivière est le résultat d'un conflit entre l'érosion qui déchausse, dénude et érode les talus et la sédimentation des talus, laquelle accompagne en général 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 et érodables, soit végétalisées si elles sont ou ont été stabilisées par les épis ou par les perrés de rive ; contrairement à une opinion largement répandue, ces ouvrages en enrochements contribuent alors à la « renaturation » des rives.

En fixant la rive concave, la protection de rive contribue indirectement à la diminution de largeur du lit actif ; car la poursuite de l'alluvionnement de la rive convexe élève le terrain et permet sa mise hors d'eau de manière suffisamment fréquente pour que la végétation s'y enracine. Les transports en suspension peuvent alors parachever l'élévation jusqu'au franc bord du terrain conquis sur le lit actif : 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.

2.4. 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 définie par le 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.

L'exigence de remontée des niveaux est forte à 850 m³/s (1 m à 1.50 m). Nous savons qu'une telle remontée peut conduire à une aggravation des niveaux pour la crue de référence « inondation ». 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 et la discussion de cette contrainte doivent avoir toute leur place dans l'élaboration des options et des compromis du plan de restauration.

La non aggravation de l'inondation ne nous paraît pas constituer un objectif nécessaire et suffisant pour un plan de restauration de la Loire prenant en compte tous les usages : cet objectif peut n'être pas nécessaire dans des zones de faible vulnérabilité, dans lesquelles une aggravation doit pouvoir être négociée. Il peut à l'inverse être insuffisant dans les zones urbanisées : dans ces zones, le plan de restauration devra si nécessaire envisager une surélévation des digues ou un renforcement de leur structure et de leur aptitude au déversement en cas de crue supérieure à la crue de projet.

La prévention du risque inondation doit alors pouvoir être considérée au même titre que les autres contraintes, les actions diminuant l'inondabilité étant considérées comme partie intégrante du plan de restauration.

On verra plus loin que l'élargissement du lit actif est un levier qui répond à la fois à l'objectif de recharge sédimentaire et de diminution du transport par charriage vers l'aval tout en concourant à l'abaissement des niveaux de la crue de référence « inondation ».

2.5. Rétablir l'équilibre hydro-morphologique

Il est évident que ce thème est au cœur 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 en plusieurs points d'une tendance à l'érosion du fond, notamment autour de Montjean, Ancenis et Mauves ; en revanche, la tendance à l'alluvionnement sur 10 ans de 1996 à 2006 est attestée à la fois par le relèvement des basses mers de vives eaux et par la comparaison des fonds, mais seulement entre Bellevue et Trentemoult.

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 principales 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 du lit et la fermeture de bras. 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 tri granulométrique ou 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.

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 sa réunion du 23 avril, le groupe de travail a envisagé différents moyens de restauration concernant le fonctionnement hydro-sédimentaire :

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

L'élargissement de la section a pour but de diminuer la capacité de transport solide du bras navigable, ce qui peut être obtenu d'une part en abaissant la cote des épis et d'autre part en les reculant 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.

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.

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 d_{50} supérieur à 1.5 mm, à la rigueur 1.2 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.

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.

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 diminuer 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 et donc le charriage, ce qui permet le dépôt et le relèvement des niveaux à débits donnés ; en raison des critiques dont ces ouvrages ont fait l'objet, nous en avons fait une analyse au § 3.4.2. du rapport de phase 1.

2.6. 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. Principes de restauration

Nous reformulerons ici les analyses du chapitre précédent en les ordonnant suivant des critères hydro-sédimentaires. Les principes de restauration concourant à tendre vers un relèvement stable du niveau des eaux ordinaires de la Loire peuvent être ainsi énoncés :

3.1. Restauration de l'équilibre longitudinal

La restauration de l'équilibre longitudinal a pour but d'assurer la pérennité du relèvement des niveaux grâce à la stabilisation des fonds. Cet équilibre sera obtenu grâce à des ouvrages assurant une chute aux débits morphogènes.

Pour que le relèvement des fonds soit effectif, il faudra que le matériau sableux actuellement transporté par charriage jusqu'à Nantes puisse se déposer en majeure partie dans le fleuve en amont de Bellevue. Or la pente actuelle de la Loire ne permet pas ce dépôt. La condition nécessaire à la formation d'un dépôt dans le lit est la diminution de cette pente aux débits morphogènes, c'est à dire aux débits qui assurent la plus grosse partie du transport solide; d'après notre étude, 80% du transport solide est effectué actuellement en dessous de 3000 m³/s, mais cette valeur devra être confirmée par des mesures.

La pente d'un fleuve est déterminée principalement par le charriage, c'est à dire le transport solide de fond. On peut ainsi considérer qu'en l'absence de prélèvements majeurs le profil en long de la Loire entre Ponts de Cé et Nantes était stable au début du 20^{ème} siècle. Par ailleurs nous pensons que les apports solides par charriage aux Ponts de Cé sont actuellement au plus égaux et probablement un peu inférieurs aux apports naturels en 1900.

Si les apports amont par charriage sont aujourd'hui inférieurs ou égaux aux apports de 1900, il est nécessaire que la pente du fleuve restauré entre les Ponts de Cé et Nantes soit au plus égale et probablement inférieure à la pente du fleuve au début du 20^{ème} siècle. Cela veut dire que la dénivelée offerte par le lit alluvial entre les deux villes devrait, au stade final de l'aménagement, être au plus égale à la dénivelée observée en 1900. Or, le lit s'est abaissé beaucoup plus à Nantes qu'aux Ponts de Cé et la différence entre la dénivelée actuelle et la dénivelée en 1900 est supérieure à 2 mètres. Il sera donc nécessaire de « racheter » cette différence par des ouvrages de chute dissipant l'énergie correspondante.

Le relèvement des fonds associé à la diminution des pentes contribuera à élever le niveau des crues, y compris jusqu'au débit centennal : il est certain que l'annulation de l'impact « inondation » pour le débit centennal sera impossible, si, comme nous le pensons, l'objectif de relèvement des niveaux par les ouvrages doit être tenu jusqu'au débit de 3000 m³/s. Le risque « inondation » est donc un élément important de la problématique de la restauration et pourra conduire à intégrer dans le plan de restauration :

L'élargissement de la Loire pour effacer les surélévations du niveau de la crue de référence.

Le renforcement des digues de protection des lieux habités.

3.2. Restauration de l'équilibre transversal

Le but du remodelage transversal est triple :

Rétablir une distribution équilibrée du débit entre les différents bras, en améliorant l'alimentation des bras secondaires sans compromettre la navigation.

Réduire par l'abaissement et l'élargissement du lit hors chenal navigable la capacité de transport solide par charriage de façon à compléter l'effet des ouvrages de chute décrit précédemment.

Recharger les fonds du chenal navigable avec les matériaux provenant du remodelage.

Trois sortes d'actions contribueront à satisfaire les objectifs définis :

Le remodelage des épis de navigation

La restauration des bras secondaires

L'élargissement du lit actif

3.2.1. Le remodelage des épis de navigation

Objectifs

Rappelons les objectifs du remodelage des épis :

Relever les lignes d'eau en étiage par le dépôt des sables libérés par le recul ou l'abaissement des épis.

Accroître autant qu'il est possible l'espace de mobilité.

Ne pas aggraver les conditions de navigation dans les zones où celle ci est aujourd'hui déjà précaire, mais admettre une diminution des tirants d'eau là où ils sont les plus élevés, de façon à homogénéiser les profondeurs autant qu'il est possible.

Diminuer le débit dans le chenal navigable au profit du reste du lit actif, c'est à dire sur les hauts fonds entre épis et dans les bras secondaires.

L'accroissement de l'espace de mobilité peut concerner le bras navigable par élargissement du bras et recul des têtes d'épi ; mais la mobilité doit être améliorée dans l'ensemble du lit actif en redonnant, grâce à l'abaissement des épis et des bancs, une mobilité au sable contenu dans l'espace inter-épis : l'abaissement de ces bancs et la mobilité du sable contrecarreront en effet la poussée végétale qui rétrécit le lit actif. Le remodelage des épis permettra donc d'élargir le lit actif, ou bande active, de telle sorte qu'il s'étende à l'ensemble du lit de plein bord. Le seul recul des épis est à proscrire, car il contribuera à fixer les bancs entre épis et au final réduira la mobilité du lit actif. Il n'y a donc pas synonymie entre accroissement de l'espace de mobilité et recul des épis.

Calage en altitude des épis et élargissement du chenal navigable

Les épis devront être calés au dessus du niveau de la ligne d'eau au débit minimum navigable qui résultera du relèvement des niveaux escompté ; la détermination de ce calage nécessite donc une démarche itérative, puisque le relèvement des niveaux dépendra de la fourniture des matériaux induite par le remodelage des épis.

L'élargissement du chenal navigable ne sera pas souhaitable du point de vue de la contrainte de navigation. L'abaissement des épis sera donc préféré à leur recul, notamment lorsque l'élargissement sera susceptible de déterminer des tirants d'eau en étiage inférieurs à l'objectif fixé ; la pente transversale des épis sera minimisée pour améliorer la mobilité entre épis. Pour plus de précision, on se reportera au § 1.4 du rapport de phase 1, qui illustre ces principes en les appliquant à la section expérimentale la Pointe- Chalonnes.

Lorsque le niveau des bancs ne permet leur submersion qu'à des débits élevés ou lorsque de ce fait la végétation s'est développée sur les bancs, il faudra envisager en premier lieu l'essartement, puis une scarification de la surface avant les crues d'hiver, et si nécessaire un abaissement partiel en deçà du niveau des eaux au module ; ce cas ne doit concerner que la zone de marnage.

3.2.2. La restauration des bras secondaires

La fonctionnalité actuelle des bras secondaires est très hétérogène : certains sont en cours d'asphyxie en raison de la conjugaison de l'abaissement du chenal navigable et du maintien des chevrettes conçues pour en limiter le débit en étiage. Les bras secondaires les plus menacés se caractérisent par la tendance au développement végétal, accentuée par l'envasement en aval du Cellier. D'autres se sont abaissés sous l'effet des prélèvements et de la dégradation des chevrettes : le bilan de leur fonctionnement est donc un préalable à la définition des moyens de restauration.

La restauration des bras secondaires obéit aux mêmes buts que le remodelage des épis ; il s'agit de lutter contre l'atrophie de ces bras, d'améliorer leur écoulement qualitatif et quantitatif, de contribuer à réduire le transport par charriage dans le chenal navigable et enfin de pérenniser ce résultat dans le temps avec un minimum d'entretien.

Pour aboutir à l'amélioration de l'écoulement dans le bras au stade final de la restauration, il pourra être nécessaire d'araser en tout ou partie les chevrettes à l'entrée et parfois à la sortie du bras. Il en sera de même pour les gués ; leur conservation aux cotes actuelles pourrait obliger à prévoir une transparence effaçant la perte de charge, par le moyen de buses ou de dalots, ce qui peut s'avérer prohibitif.

Il est possible que, dans certains bras, le lit actuel soit trop élevé pour permettre l'obtention de la capacité objectif. Il faudra alors abaisser le lit soit naturellement, si l'effacement des gués et chevrettes suffit à autoriser l'auto-curage naturel, soit par l'essartement et des opérations de scarification du matériau à l'automne, soit enfin par curage mécanique.

S'il n'est pas possible d'assurer un curage hydraulique d'un bras secondaire, il sera difficile d'assurer l'auto-curage dans l'état aménagé final. Or nous avons préconisé dans la section Ancenis-Bellevue une diminution de la pente d'écoulement, afin de retenir les sables du lit derrière les ouvrages de chute ; cette diminution favorisera une tendance au colmatage des bras les moins actifs. Il sera donc nécessaire de conserver ou obtenir par des artifices une pente assurant l'équilibre du bras.

Si le bras est court et si la tendance à l'ensablement est modérée, il peut suffire de favoriser l'entrée de débit pour les crues morphogènes par un ouvrage d'entonnement et de faciliter la sortie par un déflecteur. Mais ce moyen ne sera efficace que si les formes du lit ne favorisent pas l'entrée du sable dans le bras.

Si le bras est long et que la tendance à l'ensablement est forte, il faudra chercher à implanter un ouvrage de chute sur le chenal navigable de telle sorte que le bras secondaire le court-circuite, comme c'est le cas pour les épis du Fresne. Il suffira alors soit qu'il n'y ait pas de chute ou une chute moindre sur le bras secondaire, pour que soit obtenue une pente autorisant l'auto-curage.

Une alimentation satisfaisante des bras secondaires aux débits les plus morphogènes peut être en étiage la cause d'un débit trop élevé pénalisant la navigation; la technique des duits filtrants limitant sans le supprimer le débit d'étiage peut trouver dans ce cas une application intéressante.

3.2.3. L'élargissement du lit actif

L'élargissement du lit actif sera envisagé dans l'une ou l'autre des situations suivantes :

Le lit a été exagérément rétréci, en général sous l'action des épis conjuguée à un fort abaissement : ce type de situation est observé par exemple en aval de la Possonnière et en amont du pont de Mauves.

L'élévation des fonds et des niveaux, accentuée par une largeur du lit actif naturellement faible en regard des largeurs moyennes conduirait à une aggravation du risque d'inondation.

Des protections de berge existent et sont peu justifiées de par la valeur des biens protégés, voire nuisibles pour l'équilibre morphologique, compte tenu de la diminution de largeur auxquelles elles conduisent.

Le dépôt dans le lit des matériaux de curage est recherché pour compléter le relèvement des fonds.

Selon les enjeux et le type de berge à reculer, les méthodes utilisées pour l'élargissement pourront différer :

- Si l'élargissement recherché est faible et que la forme en plan de la berge est favorable à l'érosion naturelle, il pourra suffire de supprimer la protection et la couverture végétale.
 - Si les quantités à mobiliser sont plus importantes ou que la forme de la berge ne permet pas son érosion, on utilisera des moyens mécaniques ; les matériaux extraits jusqu'au niveau des bancs seront déposés dans le bras proche ou si nécessaire transportés par barge au point de dépôt optimum. Si elle est constituée de matériaux trop fins, par exemple inférieurs à 0.5 mm, la couche supérieure pourra être affectée à des usages terrestres, par exemple pour le maraîchage.

3.3. Gestion des sédiments

Les apports de sable grossier charriés par la Loire seront certes insuffisants pour assurer le relèvement des fonds, mais leur contribution restera indispensable; la connaissance du transport solide et surtout du charriage de fond, en quantité et qualité, doit donc être améliorée, afin de déterminer d'une part l'importance de sa contribution à la remontée des fonds, d'autre part l'aptitude du fleuve à remodeler la section transversale du fleuve.

Les apports complémentaires seront obtenus par les remodelages du lit en dehors du chenal navigable que nous venons de décrire : l'optimisation du volume nécessaire à l'obtention d'un équilibre stable sera un objectif important de l'étude de faisabilité. Cette étude essentielle sera lourde, autant en raison de l'acquisition des données qu'elle nécessite que du traitement détaillé de ces données.

Le volume de dépôt sera égal à la somme de l'apport externe à la zone et de l'apport interne constitué des volumes résultant des actions de remodelage. L'apport externe sera égal à la différence entre le volume solide entrant et le volume sortant. Le volume sortant ne pourra être nul et se déposera au moins en partie au droit de Nantes : il faudra donc déterminer dans quelle mesure ce dépôt permettra la poursuite de l'exhaussement constaté à Bellevue et en aval de 1995 à 2006.

Pour le décompte des volumes susceptibles de se déposer dans le lit actif, il faudra éliminer la fraction des matériaux fins, par exemple de diamètre inférieur à 0.4 mm, lorsque la proportion de cette fraction est supérieure à celle du matériau du lit. En effet cette fraction excédentaire sera transportée facilement et donc ne se déposera pas dans la section restaurée, mais seulement dans l'estuaire. Le diamètre proposé est indicatif et devra être précisé par les mesures du transport. Exemple : si le matériau du lit contient une fraction inférieure à 0.4 mm de 10 % et que cette proportion est de 30 % pour le matériau déposé, il faudra considérer que le volume utile n'est que de 80% du volume déposé.

Si le cumul des apports par charriage amont et des matériaux provenant des actions de remodelage est insuffisant dans le délai nécessaire à l'obtention de l'objectif de niveau recherché ou si ce délai est jugé trop important, nous devons soit diminuer l'objectif de restauration, soit admettre un délai de restauration plus important, soit en dernier recours envisager une importation de matériaux en provenance de la mer ou du lit majeur, à la condition que leur granulométrie soit supérieure ou égale à celle du lit actuel .

3.4. Conception des ouvrages de chute rachetant la dénivelée excédentaire

Pour que les ouvrages de chute relèvent les fonds d'une hauteur donnée, il faut et il suffit qu'ils relèvent la ligne d'eau de cette même hauteur dans la fourchette des débits morphogènes, c'est à dire des débits assurant la majeure partie du transport.

Pour relever la ligne d'eau d'une quantité donnée, il faut que la vitesse soit accélérée sur l'ouvrage et que l'énergie cinétique acquise soit dissipée soit par frottement le long de la chute, soit dans l'écoulement divergent en aval de la chute par dissipation turbulente. Toute conception d'ouvrage qui ne serait pas fondée sur l'accroissement de la vitesse serait inefficace.

Les ouvrages de chute devront être conçus d'une part pour la satisfaction de l'objectif de restauration final, d'autre part en fonction des contraintes hydrauliques rencontrées dans les situations intermédiaires. Les caprices hydrologiques imposeront une programmation souple qui devra néanmoins rester compatible avec la gestion des marchés publics.

Pour le maintien des usages piscicole et navigation, la vitesse d'écoulement sur les ouvrages ne devra pas dépasser une limite à fixer en fonction de la distance à parcourir sur l'obstacle. L'expérience des épis du Fresne a démontré que la vitesse limite sur un obstacle court devrait en tout cas rester inférieure à 2.5 m/s. Cette contrainte s'appliquera soit à la totalité du débit écoulé, soit à une fraction de ce débit suffisante pour assurer le total maintien des usages piscicole et navigation.

La vitesse acceptable sur un ouvrage élémentaire correspond à un type d'écoulement noyé par l'aval, ce qui veut dire que la vitesse et la chute dépendent fortement du niveau aval. L'expérience des épis à radier du Fresne a montré que la vitesse obtenue n'était pas la même sur les deux ouvrages, en raison des imprécisions légères du calcul d'écoulement ou du délai de 5 ans écoulé entre conception et réalisation. Or, pour la restauration future, le niveau en aval de l'ouvrage à construire variera aussi dans le temps par suite du relèvement escompté des fonds. Il en résulte qu'en principe un ouvrage de chute ne pourra être construit que lorsque le relèvement des fonds sur lesquels il sera fondé sera atteint ou proche d'être atteint; s'il est construit trop tôt et si le seuil est calé en fonction de l'objectif final, la chute sera temporairement trop forte et le franchissement pourra être trop difficile pendant plusieurs années.

La remarque qui précède montre que la géométrie d'un ouvrage devra pouvoir être ajustée après mise en service si ses performances diffèrent de l'objectif projeté : les enrochements sont le matériau le plus adapté aux modifications de la section de contrôle des ouvrages.

Il est souhaitable aussi que le délai nécessaire à l'équilibrage du profil en long d'un bief entre deux ouvrages soit le plus réduit possible. Si le charriage normal de la Loire assurait seul ce remblaiement du lit, le délai de comblement du chenal navigable serait beaucoup trop long, de l'ordre du siècle; la fourniture des matériaux provenant du remodelage du lit hors chenal navigable permettra de raccourcir ce délai, à la condition que la distance séparant les zones remodelées et les zones de dépôt ne soit pas trop grande.

4. Définition des études à conduire

Ce chapitre définit :

La méthodologie de l'étude préalable à engager pour déterminer la faisabilité des actions de restauration que nous avons proposées.

Les mesures, données topographiques et sédimentologiques à acquérir pour mener à bien ces études.

La définition des études des ouvrages structurant le profil en long de la Loire.

Etude de faisabilité des actions de restauration

4.1.1. Objet de l'étude

L'étude de faisabilité que nous proposons a pour but premier la définition hydraulique et sédimentologique d'une restauration du lit de la Loire entre Angers et Nantes suivant les objectifs et les contraintes définis par le groupe de travail d'utilisateurs et d'acteurs locaux initié par le GIP Loire Estuaire. En second lieu, l'étude s'attachera à déterminer l'échelonnement possible des actions ou leviers de restauration qui permette une réponse morphologique optimum du fleuve aux différentes actions.

L'objectif majeur est l'obtention d'un état du lit de Loire, que nous appellerons « état restauré », morphologiquement stable, qui relève les niveaux ordinaires de la Loire et réactive ses bras secondaires et ses boires, grâce au dépôt des sables, que ces matériaux soient charriés par le fleuve ou qu'ils proviennent du remodelage du lit actif.

La faisabilité de ce programme exige la satisfaction de trois conditions :

Pour obtenir un état stable, le profil en long de la Loire doit être relevé par l'aval de manière à effacer l'excès de pente résultant de l'incision de l'estuaire.

La contribution cumulée du volume net de charriage (amont – aval) et du volume produit par le remodelage hors chenal de navigation doit être égale au volume de remblaiement du chenal. Le volume net de charriage est fonction du temps ; le volume de remodelage hors chenal est fonction du relèvement des niveaux et décroît avec celui-ci ; le volume de remblaiement du chenal est fonction du relèvement des niveaux et croît avec ce relèvement.

L'accroissement du niveau des crues de référence devra être tolérable, mais il pourra conduire soit à élargir le lit si cet élargissement peut être stable, soit à renforcer la protection des lieux habités.

Remarque

Il y a en théorie une relation entre le niveau de relèvement possible et la durée d'exécution du programme; mais il n'est pas certain que cette relation aboutisse à un niveau ou à un délai d'évolution acceptable par les utilisateurs et acteurs.

Ainsi un calcul grossier montre que, pour relever en moyenne de 1.25 m le fond du chenal navigable sur 200 m de largeur et 80 km de longueur, le volume de remblaiement devra être de 20 millions de m³.

D'autre part, on peut penser qu'il est raisonnable de prévoir un délai minimum de 20 ans pour la réalisation du programme et que ce délai ne devra pas dépasser 40 ans. Selon notre estimation provisoire, la différence entre les volumes nets charriés pour l'un et l'autre délais ne serait alors que de 4 millions de m³, ce qui ne représente donc que 20% du besoin.

Cette remarque montre que la faisabilité du programme de restauration est principalement liée au volume de remodelage hors chenal navigable.

Un lecteur attentif ne manquera pas alors de s'interroger sur l'intérêt pratique de la mesure du transport solide décrite au § 4.2.3.2 si le volume charrié net peut ne couvrir que 20 à 40 % du besoin. Nous répondrons que l'intérêt pratique de la mesure reste aussi important que son intérêt scientifique : la mesure contribuera aussi à la connaissance des apports à l'estuaire, mais surtout elle apportera une contribution essentielle à l'étude de l'échelonnement des aménagements, l'équilibre du lit remanié étant obtenu par le charriage.

4.1.2. Contenu de l'étude

L'étude de faisabilité comportera trois parties :

L'étude des paramètres de l'écoulement et de la morphologie du lit dans l'état actuel du lit de la Loire.

La détermination et la justification de l'état restauré stabilisé à l'issue du programme des travaux.

Le découpage et la programmation des tranches de travaux adaptées à l'évolution de la morphologie du lit.

4.1.2.1. Etude de l'état actuel du lit de la Loire

But de l'étude de l'état actuel

Le but de l'étude de l'état actuel ne se limite pas à l'étalonnage d'un modèle numérique d'écoulement et à l'extrapolation aux valeurs extrêmes. Elle doit aussi permettre, avec l'aide d'un modèle numérique :

- L'appréciation des coefficients de rugosité et de perte de charge sur les différentes surfaces du lit : chenal navigable, bancs entre épis, bras secondaires.
- L'analyse des pentes, vitesses ou contraintes de cisaillement dans les différents bras et la compréhension des variations spatiales et temporelles induites par le nombre des bras, la largeur du lit actif, les ouvrages de navigation et, en aval, la marée.
- La détermination des paramètres de calage du chenal navigable et des bancs en fonction de la géométrie du lit et des épis.
- L'amélioration de la quantification du transport solide à partir de l'exploitation des mesures de terrain qui auront été effectuées : l'exploitation de ces mesures devra permettre de proposer une estimation du bilan annuel de charriage et de sa variabilité dans le temps.
- L'appréciation de la mobilité des différents bras et l'estimation des relations débit solide /débit liquide hors des zones de marnage et en aval de la variabilité du transport au cours de deux cycles de marée différents.

Choix de l'outil de calcul

L'outil de calcul pourra être soit un modèle unidimensionnel maillé incluant en tous points les termes d'inertie, soit un modèle bidimensionnel. Le modèle maillé permet une représentation facilement lisible des calculs, mais sera peu adapté à l'analyse du fonctionnement des épis. Le modèle bidimensionnel permet cette analyse si l'écoulement sur l'épi est correctement simulé mais sera plus lourd à gérer, car ses résultats devront être interprétés, notamment en ce qui concerne les pentes, les vitesses moyennes et la totalisation du transport solide par bras.

La clarté de la lecture des résultats sera préférée à leur quantité : pour cette raison, l'état de référence sera présenté à débit constant amont et les résultats, ligne d'eau, vitesses, pentes seront affichés en amont d'Anetz en régime permanent et avec les maxima et minima dans les zones de marnage. Rappelons que le profil en long filaire suivant les différents bras sera le principal mode de représentation des résultats.

Remarque

Que ce soit pour le charriage ou pour le transport en suspension, les mécanismes qui déterminent la morphologie du lit de la Loire sont actifs pour des débits élevés ; les études à venir devront donc s'intéresser aux débits dits morphogènes que nous situerons dans la fourchette 750-3000 m³/s.

L'efficacité de la restauration se mesurera pour les débits ordinaires, grosso modo de l'étiage au module.

Enfin l'impact sur l'inondabilité sera apprécié au débit centennal et éventuellement au delà.

C'est donc la totalité de la gamme des débits qui devra être calculée, de 130 à 6000 m³/s environ.

4.1.2.2 Détermination et justification de l'état restauré

L'état restauré est un état stable du lit de la Loire et de ses différents bras, obtenu par :

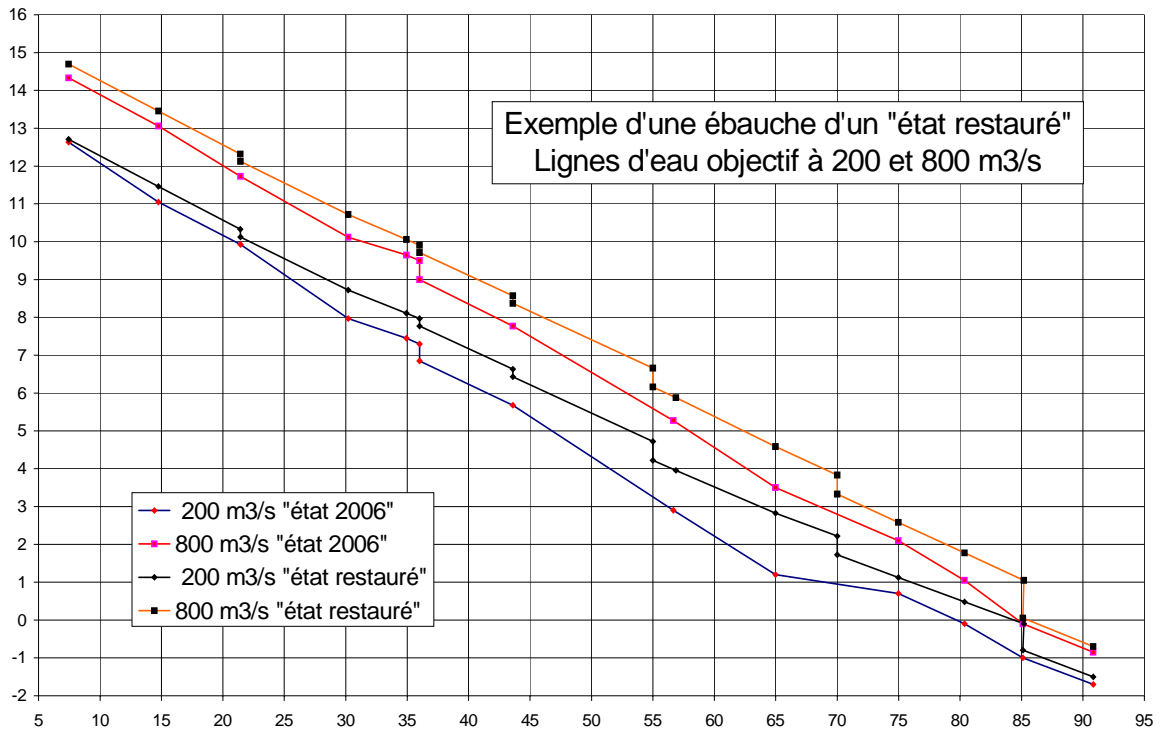
- la mise en place progressive d'ouvrages structurants relevant les niveaux et réduisant la pente,
- le dépôt dans les biefs ainsi délimités des matériaux provenant du charriage amont et du remodelage du lit hors chenal,
- le transport par charriage de ces dépôts jusqu'à obtention de l'équilibre.

L'analyse de l'état actuel aura permis d'avoir une vision plus claire des conditions à satisfaire pour l'obtention de l'équilibre recherché : pente des lignes d'eau dans les différents biefs et bras suivant le type morphologique du lit, relation entre cote des épis et cote des bancs.

On pourra ainsi déterminer les lignes d'eau objectifs à différents débits : on trouvera ci après un exemple de profil en long élaboré à partir de notre expertise et qui ne constitue qu'un exemple de ce que l'étude de l'état actuel permettra d'élaborer. Cet exemple est bâti sur les choix suivants :

- Création d'un ouvrage à Bellevue rachatant une dénivelée de 1 mètre.
- Création au Cellier et à Ancenis de deux ouvrages rachatant chacun une dénivelée de 0.5 m.
- Mise en place d'épis à radier à l'Alleud, Ingrandes et Saint Florent assurant avec une faible dénivelée la distribution du débit entre les bras.

Lors de l'étude de faisabilité s'ajouteront aux lignes d'eau objectifs d'eaux moyennes les contraintes de pente aux débits morphogènes dans les différents bras, déduites de l'analyse du transport solide dans l'état actuel.



A partir de cette définition, on pourra déterminer les cotes des épis et du terrain dans les espaces inter-épis et la cote des bras secondaires satisfaisant à la condition de niveau. Il sera souhaitable que le logiciel dispose de correction de hauteur appliquée par tronçons homogènes, ce qui permettra une correction rapide des fonds tout en facilitant l'évaluation des volumes produits par le remodelage.

Un 1er calcul hydraulique sera alors effectué en distribuant le volume de remodelage dans le chenal de navigation par grands tronçons : ce calcul mesurera les écarts entre les niveaux objectifs et les niveaux obtenus.

Un 2^{ème} calcul, itératif celui là, cherchera à déterminer le volume de remblaiement du chenal navigable satisfaisant aux objectifs de niveau.

Le calcul sera alors conduit aux débits morphogènes, pour vérifier que les pentes restent en deçà du critère de stabilité et pour déterminer les niveaux au débit de référence « inondation ».

Les résultats seront visualisés à l'aide du profil en long des bras en comparant les lignes d'eau de l'état actuel, les lignes d'eau objectif et les lignes d'eau obtenues avec le calcul.

Les volumes déplacés, les pentes et les vitesses feront l'objet des mêmes comparaisons.

Les calculs suivants devront jouer sur les paramètres disponibles :

- les volumes de remodelage hors chenal,
- l'objectif de relèvement en concentrant l'effort sur les tronçons prioritaires, en jouant sur l'emplacement et la dénivellée des ouvrages de chute structurant la pente,
- la modification du délai de stabilisation,
- éventuellement l'importation de matériaux.

4.1.2.3. Découpage et programmation des tranches de travaux

La définition d'un état permanent morphologiquement stable est la condition nécessaire d'une restauration durable, mais elle n'est pas suffisante. Prenons deux exemples :

1^{er} exemple ; nous avons dit que les ouvrages intermédiaires de relèvement que nous avons provisoirement situés au Cellier et à Ancenis, devaient être établis sur les fonds relevés par l'aménagement du bief aval réalisé antérieurement ; mais si le bief aval a atteint l'état d'équilibre final, cela veut dire que son débit solide sera égal au débit solide entrant à la Pointe dans la zone à restaurer ; dès lors le volume sortant sera égal au volume entrant et le volume net apporté par la Loire sera nul. Or un aménagement optimum doit minimiser le débit sortant pendant les différentes étapes de la restauration de façon à maximiser le volume net disponible. Cet exemple montre que si la construction des ouvrages structurants doit se faire d'aval en amont, il n'en va pas de même pour le remodelage du lit.

2^{ème} exemple : la remise en eau des bras secondaires risque de s'accompagner d'une diminution de pente que l'on s'efforcera de combattre par le positionnement des ouvrages structurant le profil en long. Mais l'auto-curage risque de rester difficile. Si on réalise un ouvrage relevant les niveaux en amont d'un bras, il peut être intéressant de maintenir en aval des niveaux bas pour permettre un auto-curage évitant une intervention mécanique coûteuse et temporairement nuisible pour le milieu.

Un phasage de la conduite des opérations de restauration doit donc être réfléchi. Nous pensons que le modèle numérique précédemment mis au point peut en simulant les évolutions au cours de la période de travaux et de stabilisation du lit être un outil d'aide à la réflexion très appréciable.

L'exploitation d'un tel modèle peut être lourde, car les durées testées seront de plusieurs années. Mais l'exploitation de ce type de modèle peut être raccourcie en découpant le chantier en plusieurs phases, par exemple sur 4 années représentatives du régime, et en ne simulant qu'une partie de la durée de cette phase, par exemple un an ; cette durée est suffisante pour déceler les tendances et corriger la programmation. La simulation de la durée totale de la phase ne sera alors effectuée qu'une seule fois.

Programme d'acquisition des mesures et données de terrain

Nous distinguerons les données topographiques et bathymétriques, les données hydrauliques, lignes d'eau et débits, et les données sédimentologiques, granulométrie et transport solide :

Bathymétrie et topographie

La connaissance des données de terrain ne peut être limitée à la bathymétrie, même si celle-ci est effectuée à un débit soutenu : d'une part il sera nécessaire que l'étude préalable s'intéresse aux plus fortes crues, d'autre part nous sommes réservés en ce qui concerne la validité des levés bathymétriques effectués au delà du module, en raison de l'intense transport solide pouvant être observé localement au dessus du fond et qui est susceptible d'entraîner une erreur de plusieurs décimètres sur la cote de celui-ci. La combinaison de la bathymétrie du chenal navigable et d'un levé aérien effectué au plus bas débit d'étiage et en aval en basse mer nous semble être une solution plus sûre.

La géométrie des ouvrages au sol, épis et chevrettes, devra être précise; le rendu sera semblable à celui effectué par le cabinet Branchereau en 1996 entre Ingrandes et Montrelais. Une solution intéressante pourrait être pour l'ensemble des levés terrestres le recours au système LIDAR, si celui-ci permet de lever en une seule opération le terrain émergé et les ouvrages. Nous n'avons pas l'expérience de l'utilisation de ces levés.

Il faudra également prévoir l'extraction de la base de données topographiques de profils en travers des différents bras, notamment dans le cas de l'utilisation d'un modèle maillé et pour les cubatures des volumes de remodelage et de remblaiement.

Un inventaire des rives revêtues sera obtenu par l'observation de terrain et l'exploitation de données d'archive, tout particulièrement en ce qui concerne les îles.

L'assemblage d'un document regroupant les différentes sources d'information est indispensable à la fois pour faciliter le déroulement de l'étude préalable et pour la constitution d'un document de référence utilisable pour les études futures à l'échelle du 1/2000 ou 1/2500.

Le report sur ce document des francs bords des différents bras de Loire de 1898 sera un élément d'appréciation de la possibilité d'élargissement du lit actif par rescindement des îles dans les zones aujourd'hui rétrécies.

Lignes d'eau et débits

La succession de tronçons à lit unique et à bras multiples crée des variations des lignes d'eau dans le temps et des pentes dans l'espace. Un modèle hydro-morphologique ne peut être validé au vu des seules données des limnigraphes existants. Il est nécessaire que ces données soient complétées par des mesures de niveaux et débits permettant de caractériser le comportement des différents types de bras.

Niveaux

Plusieurs mesures des niveaux seront effectuées aux divers points de confluence et de défluence des bras, dans une large gamme de débits, notamment 200, 800, 1500 m³/s et si possible 3000 m³/s.

La localisation des points, qui s'ajouteront aux limnigraphes existants, sera la suivante :

Défluence Guillemette, km 9.5

Pont de l'Alleud, km 17.8

Aval île Meslet, km 39.0

Belle Croix, km 47.8

La Chaussée, km 50.2

La Roche Drain, km 61.5

Le Cellier, km 70.0

Les trois derniers points sont soumis à la marée, ce qui pourra nécessiter l'installation temporaire d'enregistreurs.

Les lignes d'eau seront figurées sur des profils en long repérés en abscisse de préférence avec la polygonale du chenal navigable que nous avons établie ; l'analyse de ces lignes d'eau viendra préciser notre analyse établie avec des pas d'espace un peu trop grands.

Débits

Une campagne de jaugeages sera effectuée pour déterminer les débits écoulés dans différents types de bras secondaires, notamment pour valider les coefficients de rugosité admis pour la modélisation ; trois jaugeages datés à débits différents sont souhaitables.

Il serait utile d'identifier simultanément aux jaugeages les éventuelles ondulations de surface présentes, en évaluant leur longueur d'onde et leur amplitude.

Les niveaux au droit du jaugeage et aux extrémités du bras seront levés simultanément et rattachés au NGF.

Les dépouillements du champ des vitesses seront fournis aux chargés d'étude.

Ces jaugeages pourraient concerner :

Le bras de Saint Georges à Chalonnes

Le bras de Cul de Bœuf pour compléter le suivi de l'expérience du Fresne

Le bras de l'île du Bernardeau ou de l'île Delage

La boire Chapoin ou d'Anjou (en basse mer)

La boire du Cellier (en hautes eaux et basse mer)

Le bras nord entre Thouaré et Bellevue (basse mer).

4.2.3. Données sédimentologiques

4.2.3.1. Granulométries

Les granulométries effectuées par Hydro-expert et Astérie suffisent à notre avis pour caractériser le matériau du chenal navigable.

Le but des nouvelles mesures est d'identifier les granulométries des matériaux des bancs entre épis, des bras secondaires et des terrasses de francs bords où peut être envisagé un élargissement du lit.

Pour les bancs entre épis, la manière dont les matériaux seront prélevés peut différer ; si la remise en mouvement sur les bancs et le remblaiement du chenal sont purement hydrauliques, le prélèvement ne concernera qu'une couche de surface dont l'épaisseur sera de l'ordre du mètre.

Mais si cette méthode devait conduire à mettre en mouvement des matériaux trop petits, il faudra peut être recourir à des prélèvements mécaniques à la pelle, plus ponctuels, plus profonds et capables de mettre au jour des éléments plus grossiers. Ce mode de prélèvement sera alors localisé dans la partie aval des bancs : le comblement hydraulique des fosses se fera alors avec les petits matériaux charriés sur la surface du banc.

Sur chaque banc important susceptible d'être remodelé, on localisera trois transects granulométriques répartis pour couvrir des surfaces égales dans le banc, mais qui ne devront pas être implantés à proximité aval des épis. Sur chaque transect, on effectuera trois trous. à 15 %, 50 % et 75 % de la largeur comptée à partir du bord de l'eau à l'étiage. Sur les deux transects amont, la profondeur maximum de prélèvement sera limitée au niveau de l'étiage actuel : sur chaque trou, on effectuera au dessus de l'étiage un prélèvement tous les 0.50 m. Sur le transect aval, la même règle sera appliquée au dessus de l'étiage, mais des prélèvements seront effectués à 0.50 m, 1.50 m, et si possible 2.50 m sous étiage.

Cette méthode est conçue à partir de l'examen des photos aériennes ; il est possible qu'il faille l'adapter en aval de Mauves. Entre l'Alleud et Mauves, la méthode concernerait une quinzaine de bancs, les plus importants.

Les granulométries de chaque prélèvement seront analysées avec des tamis de mailles comprises entre 63 μ et 12.5 mm avec une progression géométrique de 2, sauf entre 0.5 et 2 mm où elle sera resserrée.

4.2.3.2. Transport solide

Le but des mesures de transport est la validation d'une formule de transport par charriage et suspension qui puisse permettre un calcul de bilan de transport annuel sur le site de la mesure et qui puisse être appliquée à l'un ou l'autre bras de Loire. La loi de transport devra être une loi de transport par fractions telle que celle que nous avons esquissée en annexe au rapport de phase 1 ou toute autre qui se révélerait mieux adaptée à la Loire et au mode de calcul choisi.

La campagne de mesures effectuée sur la Loire près de Langeais en mars 2007 et présentée en novembre 2007 au colloque de la SHF apporte des indications intéressantes sur la méthode de mesure ; les choix de l'appareillage et de la conduite des opérations devront tirer parti des enseignements de cette campagne.

Nous pensons que le meilleur site pour ces jaugeages du transport solide se situe entre les ponts de Montjean et d'Ingrandes. La mesure ne devra pas être effectuée à ces ponts, l'effet des appuis, la confluence à Montjean et le coude à Ingrandes perturbant le champ des vitesses et la distribution du transport; l'extrapolation à des sections quelconques serait rendue plus difficile. Le transect qui nous semble le plus intéressant pour la mesure est situé au km 32.3 avec un lit actif de 370 m et un chenal entre épis de 140 m. Cinq verticales de mesure devraient être positionnées à poste fixe ancré sur corps morts dans le chenal navigable avec un espacement de 35 m. Hors chenal, la mesure et sa localisation devront être adaptées en fonction des premières observations : il est possible que la

mesure du charriage de fond n'y soit nécessaire qu'au delà de 1000 m³/s et que le transport en suspension entre épis soit presque toujours négligeable.

La campagne de mesures devrait couvrir une période d'hiver et de printemps ; les débits les plus importants pour le bilan sont compris entre 800 et 3000 m³/s, mais les débits plus faibles seront utiles pour la détermination des seuils de mise en mouvement.

La connaissance des formes du lit est nécessaire, sur environ 500 m en amont et 500 m en aval de la section de jaugeage.

A chaque débit et pour chaque verticale de mesure, devront être fournis, outre les résultats généraux :

- La distribution des concentrations en suspension
- La granulométrie du transport en fonction de la profondeur
- Le débit solide unitaire par charriage
- La granulométrie du transport par charriage.

Les paramètres hydrauliques du transport solide devront être appréciés de manière fine, notamment pour apprécier la pente de la ligne d'énergie avec une marge d'erreur inférieure à 10%. Les niveaux seront mesurés avec une précision centimétrique et rattachés au NGF :

- A l'échelle de Montjean
- A 500 m en amont de la section de jaugeage
- Au droit de la section de jaugeage
- A 500 m en aval
- A l'amont du pont d'Ingrandes
- Au limnigraphe d'Ingrandes.

Deux sections seront levées de part et d'autre à 500 m de la section de jaugeage après chaque variation notable du débit liquide.

4.3. Etude des ouvrages de chute structurants

4.3.1. Exposé des problèmes

Indispensables pour assurer à la fois le dépôt des sédiments à leur amont et la remontées des niveaux, les ouvrages seront d'une conception difficile et d'un coût élevé en raison des contraintes de franchissabilité imposées par la navigation et la remontée des migrateurs.

Ces contraintes imposent une limitation de la vitesse qui est pourtant le seul moyen de créer les pertes de charge et donc la chute recherchée.

Cette nécessité avait été déjà perçue lors de la conception des épis à radier du Fresne et a justifié le fractionnement de la chute à assurer par la création de deux épis éloignés de 500 m. Or il est apparu que, par suite du délai écoulé entre conception et réalisation, mais aussi en raison de l'extrême sensibilité de ce type d'ouvrage à la variation du niveau aval, la vitesse était excessive sur l'un des deux ouvrages.

La diminution des vitesses apparaît donc nécessaire, ce qui rendra ce type d'ouvrage encore plus sensible à la variation des niveaux aval. Il apparaît ainsi que la conception de chutes isolées ne constitue pas une réponse satisfaisante à la création des relèvements recherchés.

En revanche les épis à radier restent un moyen utile à la modification ou au contrôle de la distribution du débit entre les bras ; la diminution de leur chute permettra de réaliser des ouvrages plus simples que ceux du Fresne et, avec une structure en enrochements, l'aspect ne sera pas différent de celui des épis de navigation ou des chevrettes existantes .

Pour résoudre le problème posé, nous proposons de concevoir des ouvrages basés sur la séparation du débit sur deux structures :

La première assure pour la majeure partie des débits morphogènes la chute recherchée : elle est constituée d'un seuil étroit surversant aux forts débits.

La seconde est une rampe franchissable de pente moyenne comprise entre 1/1000 et 2/1000 obtenue soit par un lit fortement rugueux, soit par des petites chutes élémentaires d'environ 15 cm, de manière à limiter la vitesse à 2 m/s. Cette rampe assurera l'écoulement de la majeure partie des débits d'étiage.

C'est ce type d'ouvrage que nous avons pris en compte dans l'esquisse de profil en long de la ligne d'eau objectif présentée plus haut, en supposant une chute de 1 m à Bellevue, 0.50 m au Cellier et à Ancenis.

4.3.2. Intérêt du modèle physique

Si, comme nous le croyons, la création de chutes par contraction de l'écoulement doit s'avérer moins coûteuse que le recours à la rugosité artificielle du lit, la proximité des contractions élémentaires conduit à s'interroger sur la validité des formules de pertes de charge par divergence appliquées à ce cas particulier. Il est en effet reconnu que deux ouvrages proches contractant la section offrent une perte de charge inférieure au double de celle occasionnée par un ouvrage seul. Le calcul de la perte de charge par divergence est donc incertain, ce qui ajoute une imprécision à celle résultant de la sensibilité au niveau aval.

La création de contractions pose en outre le problème de l'affouillement des fonds. Ce problème, jugé préoccupant au Fresne, l'est bien davantage ici, car la rampe sera confinée entre des berges proches que l'affouillement pourra ruiner. En outre l'affouillement modifie les vitesses dans la divergence et donc ajoute une autre incertitude au calcul de la perte de charge.

L'essai sur modèle physique de la rampe franchissable doit permettre la mise au point des formes optima de ce type d'ouvrage. Nous nous sommes interrogé sur l'opportunité de réaliser un essai de l'ouvrage complet, associant la rampe et le seuil déversant et y avons renoncé : l'échelle assurant une bonne similitude des écoulements dans la rampe devra être au maximum de l'ordre de 1/50, ce qui conduit à un modèle global de 10 x 50m. La nécessité de représenter les fonds affouillables conduirait à une gestion trop complexe du modèle.

Le modèle de la seule rampe franchissable sera beaucoup moins complexe : une échelle de 1/40 serait optimale, notamment pour le dimensionnement des enrochements ; la longueur, limitée à la rampe et ses accès sera inférieure à 30 m et la largeur n'excédera pas 2 m. La représentation du transport serait assurée simplement par un circuit fermé associant débit solide et débit liquide. Le matériau sera choisi de façon à respecter la similitude du début d'entraînement et devra donc être distordu en densité. En revanche, la distorsion de l'échelle des hauteurs ne sera pas possible, en raison de la présence des enrochements.

4.3.3. Méthodologie

L'étude des ouvrages comportera successivement :

Un dégrossissage des conditions aux limites de la rampe franchissable en utilisant le modèle numérique de l'étude de faisabilité pour déterminer la fourchette des conditions débit niveau aval possibles à tester sur le modèle physique.

L'essai sur modèle de la rampe franchissable dans le cas d'une implantation à Bellevue. Les essais devront déterminer la forme à donner aux rétrécissements pour obtenir la perte de charge maximum à vitesse maximum imposée, l'incidence des formes sur les affouillements et les dépôts latéraux.

L'appareillage comportera une lecture des niveaux dans chaque bief, la mesure des champs de vitesse et la mesure des fonds.

La reproduction sur un modèle numérique 3D à fond mobile des essais les plus caractéristiques. L'application aux autres ouvrages de chute envisageables du traitement sur ce modèle numérique 3D. La conception de l'ouvrage complet s'appuiera enfin sur le modèle numérique de l'étude de faisabilité.

4.3.4. Données à acquérir

La conception de l'ouvrage de Bellevue nécessite l'établissement d'un plan précis du plateau rocheux qui servira de support non affouillable à l'ouvrage déversant. Il en sera de même des autres ouvrages lorsque leur positionnement aura été arrêté.