

GIP Loire estuaire

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

Note de synthèse

Décembre 2010

La restauration du lit de la Loire, de la Maine à Nantes

1. Les objectifs de la restauration – les contraintes à respecter

Depuis le début du 20^{ème} siècle jusqu'en 1990, l'aménagement d'un chenal navigable en Loire entre les Ponts de Cé et Nantes et les extractions massives de sable ont profondément altéré la morphologie du lit : ces deux actions ont provoqué l'incision du fond dans le bras navigable et l'abaissement du niveau des eaux du fleuve. Les bras secondaires et les annexes hydrauliques, « boires », zones humides, ripisylves et prairies ont été moins souvent inondés; aussi ces composantes essentielles de l'écosystème fluvial se sont progressivement colmatées ou asséchées.

Favoriser l'accueil de la flore et de la faune terrestres est donc l'objectif principal d'une restauration de la Loire entre Nantes et les Ponts-de-Cé : cet objectif ne peut être obtenu qu'en restaurant des espaces soumis à l'équilibre hydrique antérieur. La présence, permanente ou saisonnière, de l'eau sur ces espaces sera donc le but premier de la restauration.

Le relèvement des niveaux du fleuve pour les débits ordinaires, de l'étiage jusqu'au débit moyen annuel, a fait l'objet de nombreuses études réalisées au cours des 20 dernières années : ces études ont buté sur le déficit sédimentaire consécutif au prélèvement dans le lit mineur de dizaines de millions de tonnes de sable. Ce déficit a conduit les ingénieurs à envisager des seuils artificiels de relèvement des niveaux, mais ceux ci ont été mal perçus par les acteurs locaux et les riverains de la Loire, en raison d'une insuffisante prise en compte des contraintes environnementales et d'usage à respecter sur le fleuve.

Ces contraintes sont les suivantes :

- La première est la permanence de la circulation des espèces aquatiques : la mise en œuvre d'actions relevant les niveaux ne peut être envisagée que s'ils sont franchissables.
- La seconde est le maintien d'une navigation de plaisance la majeure partie du temps et notamment en été : elle conduit à prévoir des aménagements franchissables par les embarcations utilisées sur la Loire.
- Enfin, si le relèvement des étiages peut avoir pour conséquence un exhaussement du niveau des crues, celui ci ne devra pas aggraver l'inondation des lieux habités.

Par ailleurs les expériences engagées sur le terrain ont montré la nécessité de mieux analyser l'interaction entre les écoulements du fleuve et ses transformations morphologiques ; la compréhension de ces interactions est la condition du rétablissement d'un équilibre hydro-morphologique à moyen terme (20 ou 30 ans), garant de l'efficacité et de la pérennité des actions engagées.

La nécessité d'une re-définition des objectifs et des moyens de la restauration est alors apparue : le GIP Loire Estuaire a conduit cette démarche avec la mise en place d'un groupe de travail technique d'usagers et d'acteurs locaux. En parallèle, il nous a demandé d'apporter à ce groupe de travail une contribution technique portant sur les mécanismes hydrauliques et morphologiques de la Loire entre les Ponts de Cé et Nantes; c'est le résultat de ce travail qui est présenté ici :

- *Nous décrirons brièvement les transformations du siècle passé et analyserons les évolutions hydro-morphologiques qui en ont résulté.*
- *Un diagnostic sur les évolutions prévisibles en l'absence de toute action sera ensuite posé à partir du constat des évolutions les plus récentes, c'est à dire celles survenues dans la dernière décennie après l'arrêt des extractions de matériau.*
- *Enfin les actions envisageables seront discutées du point de vue de leur efficacité et de leur impact sur l'environnement et les usages du fleuve.*

2. Morphologie de la Loire : une évolution séculaire et inachevée

2.1. Causes de l'évolution

Trois types principaux d'intervention ont contribué à modifier les niveaux et les fonds de la Loire en aval des Ponts-de-Cé depuis 1910 jusqu'en 1993 :

- L'aménagement d'un chenal de navigation, avec la construction d'épis et de chevrettes.
- L'approfondissement de l'estuaire entre Nantes et l'océan et le creusement du « bassin de marée », c'est à dire de la section de Loire entre Nantes et Ancenis soumise à l'influence de la marée.
- Les extractions de sable pour le bâtiment et les travaux publics.

2.1.1. Le chenal de navigation

Pour définir les ouvrages augmentant le tirant d'eau du bras de Loire navigable en basses eaux, les concepteurs se sont basés sur un étiage de référence avant travaux, à savoir la ligne d'eau mesurée au débit de 130 m³/s au début de XXème siècle. Le bras choisi pour être le bras navigable n'a pas toujours été le bras principal : les ingénieurs lui ont souvent préféré un bras naturellement rétréci, notamment en amont de Saint Florent.

Pour pérenniser ce choix, la première mesure a consisté à concentrer la majeure partie du débit d'étiage dans le bras choisi en fermant l'entrée et la sortie des autres bras par des seuils, appelés chevrettes, calés au niveau de l'étiage de référence ; au delà de cet étiage, le déversement sur les chevrettes rétablissait une alimentation des bras non navigables modifiant aussi peu que possible le niveau et la vitesse d'écoulement antérieurs, notamment en crue. La photo ci dessous montre la chevette de l'Alleud fermant l'entrée du bras de St Georges à l'amont de Chalonnes-sur-Loire ; on peut voir que cette chevette est aujourd'hui partiellement dégradée par des brèches.

La deuxième mesure a consisté à régulariser et diminuer la largeur du chenal navigable : lorsque la largeur du bras choisi était supérieure à 120-150 m, les concepteurs l'ont réduite en resserrant le lit entre des épis perpendiculaires à l'axe du chenal navigable. La cote de la tête des épis est celle de l'étiage de référence, mais le corps se relève en légère pente jusqu'à la berge. Lorsque l'alignement des épis dessine une rive concave, une digue submersible un peu plus élevée relie les têtes d'épis. Comme il a été dit pour les chevrettes, le niveau peu élevé de ces ouvrages devait permettre le maintien de la fonctionnalité de la section entière du bras navigable lors des crues.



Chevette de l'Alleud

Observons dès maintenant que ces règles de conception des ouvrages de navigation n'ont pas tenu compte de la largeur du lit sableux entre berges ; cet oubli a conduit au maintien de hauts fonds là où le lit était le plus large et au creusement de fosses là où il était le plus étroit ; nous en verrons plus loin les conséquences.

2.1.2. Les approfondissements de l'estuaire et du « bassin de marée »

Les approfondissements de l'estuaire en aval de Nantes, réalisés pour augmenter l'accessibilité des navires, ont eu pour conséquence un abaissement progressif du niveau de basses mers tout au long du 20^{ème} siècle : ainsi à Nantes Saint Félix, entre 1900 et 1995, le niveau d'étiage en basses mers s'est abaissé de 4 m.

En amont de Nantes jusqu'à Ancenis, l'approfondissement du lit de la Loire a été également recherché à partir de 1913, en creusant un lit appelé « bassin de marée » : ce surcreusement visait à augmenter le volume d'eau oscillant de la marée dans l'estuaire, dans l'espoir d'assurer un auto-curage du chenal de navigation à l'aval de Nantes. Mais après la 2^{ème} guerre mondiale, c'est la fourniture de sable qui a été l'objectif principal des prélèvements ; ceux ci peuvent avoir excédé 50 millions de m³.

2.1.3. Les extractions de sable

Développées surtout après la 2^{ème} guerre mondiale, les extractions ont concerné divers tronçons de Loire, en fonction de l'implantation des carrières ou des besoins de curage; l'exploitation la plus récente a concerné le bras de Saint Georges en amont de Montjean-sur-Loire et n'a été arrêtée que vers 1995.

2.2. Evolution des niveaux d'eau et de la morphologie du lit jusqu'en 1995

Pour apprécier l'effet des aménagements, la lecture des niveaux aux échelles de Loire et la mesure simultanée du débit à Montjean permettent d'apprécier la variation des niveaux à débit donné au cours du 20^{ème} siècle. Nous distinguerons deux périodes : de 1913 à 1950, l'incidence des ouvrages de navigation est prépondérante; de 1950 à 1995, les extractions sont la cause principale des transformations.

2.2.1. Variation du niveau (m) de l'eau aux échelles de Loire à débit donné de 1900 à 1950

Débit m ³ /s	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	St Florent	Ancenis
150	-0.44	-0.40	-0.28	-0.46	-0.73	-0.94
250	-0.26	-0.18	-0.10	-0.22	-0.50	-0.70
400	-0.18	-0.02	+0.04	0	-0.25	-0.47
800	+0.02	+0.11	+0.11	+0.15	-	0

Nous devons distinguer deux zones :

- A l'amont de Montjean, les épis et chevrettes sont jusqu'en 1950 la cause principale de l'enfoncement du bras navigable; cet enfoncement a porté à 200 m³/s la capacité du bras au lieu de 130 m³/s initialement. Mais cet effet s'atténue et même s'annule à 800 m³/s, la présence des épis et le dépôt de sable entre épis compensant l'enfoncement du chenal navigable.

L'absence de variation moyenne du lit actif à 800 m³/s entre La Pointe et Montjean permet alors de considérer qu'il n'y a pas eu de modification importante de la section du lit actif. S'il n'y a pas eu de dépôt, il n'y a pas eu de modification de la capacité globale de charriage de la Loire; en fait, la capacité de charriage a été accrue dans le chenal navigable et diminuée en crue hors du chenal en raison de l'obstacle à l'écoulement que constituent les épis et chevrettes.

Entre Saint Florent et Ancenis, l'érosion des fonds induite par le creusement du bassin de marée s'est ajoutée à l'effet des épis et chevrettes. En aval d'Oudon, le processus de

sédimentation diffère de celui du tronçon amont en raison de la marée qui a favorisé le dépôt entre épis des matières en suspension lors des pleines mers de vives eaux.

2.2.2. Variation du niveau (m) de l'eau aux échelles de Loire à débit donné de 1950 à 1995

Débit m ³ /s	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	St Florent	Ancenis
150	-1.04	-1.16	-1.10	--1.70	-1.90	-2.23
250	-1.03	-1.10	-1.04	-1.69	-1.70	-2.25
400	-1.16	-0.79	-0.80	-1.55	-1.51	-2.04
800	-1.08	--0.62	-0.55	-1.13	-1.13	-1.79

A la Possonnière et à Chalonnnes, l'abaissement des fonds révélé par l'abaissement du niveau à 150 m³/s est en 1995 masqué au delà de ce débit par le remous créé par la chevette de l'Alleud ; ce remous relève le niveau en amont et suralimente le bras de Chalonnnes en aval.

2.2.3. Les changements morphologiques

C'est à Montjean que le lit s'est abaissé le plus rapidement au cours de cette période, sous l'effet de l'érosion régressive liée à l'abaissement du lit dans le bassin de marée et du déficit de transport de sable provoqué par les extractions dans le bras de Saint Georges.

La capacité du bras navigable sous le niveau d'étiage de 1900 est en 1995 considérablement augmentée, les fonds ayant baissé entre ces deux dates : elle atteint 800 m³/s à Montjean et plus en aval. Les bras secondaires sont moins souvent alimentés, ce qui conduit simultanément à leur colmatage et au développement végétal.

De même le ralentissement des vitesses sur les bancs entre épis favorise les atterrissements des sables et des limons sur les marges du bras navigable, ce qui conduit à leur mise hors d'eau plus fréquente et à leur végétalisation, ce qui rétrécit le lit actif en de nombreux points. Lorsque le lit actif était déjà naturellement étroit, ce colmatage conduit à un rétrécissement excessif de la section qui élève le niveau des crues, accroît les vitesses et induit des sur-profondeurs que les eaux ordinaires comblent en partie : l'exemple le plus remarquable peut être observé en amont du pont de Mauves.

2.3. Evolution récente (1995-2007)

Au cours des années 1995-2007, il n'y a plus eu d'extractions en amont de Nantes ; la variation des niveaux à débit donné doit donc correspondre à un retour progressif à l'équilibre des fonds mobiles.

Une bonne connaissance de ces variations est donc un préalable à la prévision de l'évolution future ; nous distinguons pour cette analyse le tronçon en amont d'Ancenis et le bassin de marée, d'Ancenis à Nantes.

2.3.1. Variation du niveau (m) des eaux à l'amont d'Ancenis à débit donné de 1995 à 2007

Débit m ³ /s	La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	St Florent	Ancenis
150	+0.16	-0.28	0.08	+0.20	-0.05	-0.05
250	+0.13	-0.45	-0.20	+0.13	-0.10	-0.10
400	+0.15	-0.23	-0.39	+0.10	-0.12	-0.20
800	-0.10	-0.08	-0.41	-0.09	-0.20	-0.30

Les brèches dans la chevette de l'Alleud ont abaissé les niveaux en amont jusqu'à la Possonnière et diminué le débit écoulé et la hauteur d'eau dans le bras de Chalonnnes : ces abaissements des niveaux ne correspondent pas à un abaissement des fonds.

A Montjean, la surélévation du niveau correspond au remous atténué des seuils à échancrure construits en 2003 sur le bras nord de l'île Meslet au Fresne, mais à 800 m³/s l'effet de cet ouvrage est plus que compensé par l'abaissement des fonds entre 1995 et 2007.

A Saint Florent et Ancenis, les abaissements sont faibles et sont la conséquence de l'atténuation des irrégularités du profil en long du fleuve.

Au total, les variations sont faibles et aucune remontée des fonds ne peut être déduite de l'observation des niveaux.

2.3.2. Variation des niveaux et des fonds à l'aval d'Ancenis de 1996 à 2007

L'analyse de l'évolution des niveaux en aval d'Ancenis est à débit donné plus difficile qu'en amont : elle est faite en comparant les niveaux de basses mers aux différents marégraphes; or ces niveaux dépendent du débit mais aussi de la marée. Nous avons donc cherché à comparer les cotes de basse mer à débit et coefficient de marée donnés. Le coefficient 80 a été choisi, car c'est celui ci qui est en vives eaux le plus fréquemment observé. Il reste que ce choix ne prend pas en compte l'effet de la pression atmosphérique et du vent sur les niveaux de basses mers : il en résulte une dispersion des valeurs obtenues.

Débit (m ³ /s)	Ancenis	Oudon	Mauves	Thouaré	Bellevue	Nantes St Félix
150	-0.05	-	-0.05	+0.35	+0.35	+0.30
250	-0.10	+0.30	-0.10	+0.30	+0.30	+0.35
400	-0.20	+0.35	0	+0.25	+0.20	+0.35
800	-0.30	+0.20	0	+0.15	+0.15	+0.30

Une comparaison de l'évolution des fonds est possible entre Mauves et Nantes à partir des levés bathymétriques effectués en 1995 et 2006. Mais elle n'est complète qu'en aval de Bellevue, où elle met en évidence des dépôts répartis comme suit :

Bellevue-Pont Vendée	Bras de la Madeleine	Bras de Pirmil	Dépôt total
763 000 m ³	268 000 m ³	331 000 m ³	1 360 000 m ³

Soit une moyenne annuelle de 124 000 m³ ou 200 000 tonnes/an.

En rapprochant ces deux estimations, nous pouvons conclure que :

- Une fraction importante du transport solide par charriage s'est déposée de Bellevue à Trentemoult et a permis un exhaussement bien perceptible des niveaux d'étiage de basses mers jusqu'à Thouaré inclus. En revanche la fraction la plus fine transportée en suspension a continué à se propager et se déposer en aval de Nantes, mais la présence de crème de vase sur les fonds lors des levés bathymétriques n'a pas permis de la quantifier.
- L'érosion en aval du pont de Mauves est plus le résultat d'un changement de largeur de part et d'autre de ce pont lors des fortes crues que d'un déséquilibre global.
- Il en est de même pour l'exhaussement à Oudon, mais il est possible que cet exhaussement résulte aussi du comblement des fosses d'extraction les moins anciennes.
- On constate enfin un abaissement des niveaux aux débits moyens à Ancenis.

En conclusion, l'évolution majeure au cours de la décennie est le dépôt à Nantes. Entre Ancenis et Thouaré, on a plutôt de petites variations résultant du comblement des fosses d'extraction passées, mais aussi des fluctuations liées aux crues.

3. Evolution future en l'absence d'aménagement

3.1. Evolution du transport solide en Loire

Il était souvent admis que les prélèvements de sable avaient diminué les transports solides dans la Loire en aval des Ponts de Cé : cette assertion était sans doute exacte lorsque des fosses d'extraction profondes piègeaient les apports d'amont, mais cet effet a pratiquement disparu avec la régularisation en cours du profil en long.

Examinons comment ont évolué les paramètres qui déterminent la capacité de transport solide :

- Le régime des débits liquides n'a pas été modifié de façon significative sur la Loire ; les barrages ne modifient que faiblement le régime hydrologique.
- L'apport en matériaux n'a pas diminué de façon importante. En effet le lit de la Loire en amont des Ponts de Cé a été peu perturbé par les prélèvements de matériaux ; en conséquence, la majeure partie du charriage de fond antérieur y a été conservée.
- Comme l'illustre le tableau ci dessous, l'abaissement des niveaux et des fonds en Loire va croissant des Ponts de Cé à Nantes : la pente de l'écoulement est donc supérieure de 15 % à la pente au début du 20^{ème} siècle, ce qui accroît toutes choses égales par ailleurs la capacité de charriage d'environ 30%.

Abaissement de la ligne d'eau d'étiage de 1900 à 2007

La Pointe	Possonnière	Chalonnnes	Montjean	St Florent	Ancenis	Bellevue
-1.32 m	-1.84 m	-1.30 m	-1.96 m	-2.68 m	-3.17 m	-3.60 m

- La construction des épis et chevrettes et l'abaissement des fonds ont déterminé un rétrécissement du lit actif qui accroît encore la potentialité de charriage du chenal navigable entre épis.
- En revanche, l'écoulement sur les épis et chevrettes dissipe une énergie qui concourait au transport dans le lit naturel, ce qui peut diminuer le charriage; mais nous avons vu qu'en amont de Montjean, le fond moyen du lit actif n'a pas subi de modification majeure avant 1950.

Résumons notre approche du transport solide des sables en Loire :

- Les mesures effectuées par Berthois de 1952 à 1970 permettent d'estimer à 170 000 tonnes ou 106 000 m³/an le transport en suspension des sables. Avec des méthodes plus critiquables, Berthois évalue entre 225 000 et 275 000 tonnes le charriage annuel sur le fond, soit un tonnage charriage+suspension de l'ordre de 420 000 tonnes.
- Nous avons mesuré un dépôt des matériaux charriés à Nantes de 200 000 tonnes/an. Ce dépôt est inférieur au transport puisque le dépôt est par définition la différence entre les transports « entrants » et « sortants ». Si on ajoute à ce chiffre le transport en suspension évalué ci dessus, on peut conclure que le tonnage total de sable transporté en Loire est en moyenne supérieur à 370 000 tonnes/an.

En conclusion, nous estimons qu'un débit solide charrié sur le fond de 300 000 tonnes (ou 180 000 m³) constitue une hypothèse de travail raisonnable dans l'attente de mesures de terrain indispensables.

3.2. Evolution des fonds et niveaux d'eau ordinaires

Le remodelage du fond de la Loire, effaçant les irrégularités des fonds dues aux extractions passées, va se poursuivre de plus en plus lentement.

Les matériaux charriés continueront à se déposer en aval de Bellevue. L'exhaussement des fonds s'étendra en aval du bassin d'évitage, sauf si celui ci est régulièrement dragué.

La tendance légère à l'érosion entre Mauves et Thouaré va être contrecarrée par la remontée des dépôts vers l'amont à partir de Bellevue : le bilan peut varier d'une année à l'autre.

En l'absence d'interventions, il ne faut donc attendre aucune remontée significative du niveau des eaux ordinaires, sauf à Nantes où elle peut n'être pas souhaitée. Ce dépôt ne sera alors que la poursuite du gaspillage en cours des maigres apports solides disponibles pour la restauration du lit amont.

3.3. Evolution de la largeur du lit actif

Si l'évolution du profil en long ne fait pas craindre de nouveaux abaissements des niveaux, les conditions actuelles d'écoulement favorisent dans les bras secondaires et dans certains bras principaux la poursuite des dépôts de sables et limons et le développement végétal; le rétrécissement du lit actif accentuera l'atrophie de ces espaces. Plus la restauration tarde, plus elle sera difficile.

4. Discussion des actions envisageables

4.1. Le remodelage du lit actif

En concentrant le débit dans un chenal incisé entre épis, les extractions ont perverti le rôle des ouvrages de navigation : les épis et chevrettes ont contribué au dépôt des sables et limons et à la mise à sec de nombreuses annexes hydrauliques. L'abaissement de ces ouvrages est donc la condition nécessaire au maintien et si possible à la restauration de la morphologie des bras de Loire.

L'apport de sable par le charriage naturel sera insuffisant même à l'échéance de 30 ans (soit 9 millions de tonnes) pour permettre une remontée suffisante des fonds et du niveau des étiages et des eaux moyennes : même si tout se dépose entre la Pointe et Nantes, le gain de la section moyenne sera de 80 m², soit un exhaussement probable de l'ordre de 0,35 m.

Il apparaît alors qu'il est illusoire de vouloir rétablir un lit qui relève les niveaux de Loire de telle sorte que soit restaurée complètement la morphologie de la Loire telle qu'elle se présentait à la fin du 19^{ème} siècle, avant les grands aménagements : le relèvement des niveaux sera le résultat d'un compromis entre les objectifs environnementaux, les disponibilités en matériau et le coût des aménagements.

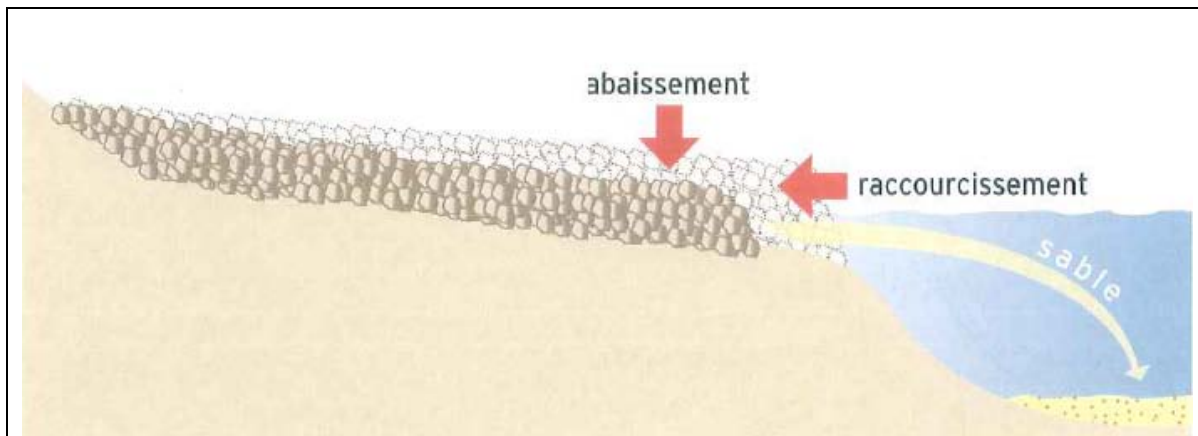
La situation en basse Loire se caractérise par un déficit sédimentaire, mais aussi par la déformation du lit actif, avec un chenal navigable surcreusé et des bancs entre épis et bras secondaires peu ou pas incisés, parfois colmatés par les limons et végétalisés. Le remodelage consiste à utiliser les matériaux des zones peu incisées pour d'une part contribuer par la fourniture de matériaux au relèvement global et d'autre part améliorer et pérenniser leur écoulement.

Jusqu'à présent seul le traitement des épis a été envisagé et expérimenté sur la section La Pointe-l'Alleud. Nous y ajouterons deux actions complémentaires sur les bras secondaires et les îles.

4.1.1. Abaissement des épis

La plus grosse partie du stock alluvial libérable se situe entre les épis ; mais nous ne sommes pas certains que les sables retenus entre les épis présentent des spécifications conformes à celles des sables présents dans le chenal navigable. S'ils sont trop fins, leur reprise aura surtout pour effet d'accroître le charriage dans le chenal et donc d'accélérer le dépôt dans l'estuaire et en mer. La connaissance exhaustive de la granulométrie des matériaux est donc un préalable à la généralisation de l'abaissement des épis.

L'abaissement des épis sera en général préféré à leur raccourcissement : le raccourcissement favorise le dépôt des sables mais en même temps élargit le bras navigable et diminue la hauteur d'eau ; s'il maintient les épis hors d'eau à l'étiage, l'abaissement ne diminue pas la hauteur d'eau. Toutefois lorsque le lit entre berges est fortement rétréci, la hauteur d'eau est largement suffisante et le raccourcissement pourra être préféré, comme il est développé ci dessous.



Coupe schématique des épis avant et après remodelage

4.1.2. Remise en eau des bras secondaires

Plusieurs éléments contribuent à l'atrophie de nombreux bras :

- La présence des chevrettes aux extrémités des bras secondaires et l'enfoncement du bras navigable raréfient l'écoulement dans ces bras.
- La diminution de la vitesse favorise le dépôt des limons et l'invasion végétale.
- Les gués ou ponceaux trop étroits réduisent la capacité et augmentent encore les dépôts.

Les moyens de lutte contre l'atrophie découlent de ce qui précède et peuvent être :

- Suppression temporaire ou définitive des chevrettes amont ou aval.
- Suppression, abaissement des gués ou remplacement par des passerelles submersibles.
- Corne d'entonnoir à l'entrée des bras, augmentant le débit et la vitesse dans le bras et donc sa capacité d'auto-curage des fonds.

Le fond des bras sera calé au niveau de l'étiage de référence futur ; si les dispositions précédentes ne sont pas suffisantes pour assurer l'auto-curage, on devra le faciliter par scarification de la surface en automne, ou envisager un curage mécanique avec dépôt dans le chenal navigable.

4.1.3. Elargissement du lit actif

Lorsque la largeur totale du lit actif est inférieure à la normale, l'écoulement des crues crée des sur-profondeurs ; les hautes eaux ordinaires tendent à résorber ces fosses, mais le transport solide est en général trop faible à ces débits pour les combler, notamment si le rétrécissement s'étend sur de grandes longueurs. Il en résulte dans le bief amont plus large des tirants d'eau anormalement faibles et des vitesses plus fortes. La largeur du lit actif est donc un paramètre à considérer pour le remodelage du lit.

Pour ce faire, on devra dans les lits étroits, soit accroître la largeur du chenal navigable, c'est à dire reculer les épis, soit élargir le lit actif en empiétant sur les îles, si la granulométrie des matériaux qui les constituent est suffisamment grossière pour contribuer à la recharge du lit. Cette disposition concerne aussi bien les lits naturellement étroits en 1900 que ceux qui au 20ème siècle ont été rétrécis par l'effet des épis et des extractions.

4.1.4. Insuffisance du remodelage et nécessité de la création des chutes

On aura compris que le remodelage du lit actif a pour but de rehausser les fonds et les niveaux et de retrouver une distribution des débits qui combatte l'atrophie des bras secondaires. Mais l'analyse de l'évolution des 10 dernières années nous montre que ce remodelage ne peut être stable.

Nous avons en effet montré que pendant la dernière décennie, les matériaux transportés par la Loire se sont déposés principalement dans Nantes et jusqu'à Bellevue. En remettant des matériaux dans le lit, on va accroître encore la pente, augmenter la migration des sables entre

Ancenis et Bellevue et accroître les dépôts à Nantes, dans l'estuaire ou en mer. On aura alors « consommé » la majeure partie du stock alluvial disponible sans obtenir le relèvement des niveaux recherché.

Pour que les matériaux remodelés relèvent les fonds de façon pérenne, il faut diminuer la capacité de la Loire à charrier les sables. Cette diminution ne peut être obtenue que par une diminution de la vitesse du courant et donc une diminution de la pente de l'écoulement.

Pour diminuer la pente entre deux points, il faut soit abaisser le niveau amont, ce qui est contraire au but principal recherché, soit relever le niveau de la mer, ce qui est hors sujet, soit créer des chutes intermédiaires qui dissipent l'énergie excédentaire : cette dernière option, la seule possible, est celle que nous proposons.

La création d'aménagements relevant les niveaux en amont de Bellevue est la condition nécessaire pour rendre pérenne le relèvement des niveaux et des fonds.

Pour que ces interventions soient efficaces, il faut que la chute soit au moins égale au relèvement des fonds autorisé par le stock de matériau disponible. La connaissance du stock disponible et des apports par charriage amont déterminera la valeur possible de la remontée des fonds et le délai de cette remontée. La dénivelée à créer par les chutes dépendra donc du volume disponible et du délai admis pour la réalisation de la restauration.

Une bonne gestion de la ressource exige une réalisation progressive des chutes en commençant par l'aval et en coordonnant la recharge sédimentaire et la construction des chutes.

4.2. Critères de bon fonctionnement des ouvrages

L'impact d'un seuil en rivière sur le transit des sables est souvent perçu de manière erronée par le public. Beaucoup pensent en effet que c'est la remontée du fond créée par le seuil qui bloque le transit des matériaux : or cette idée est totalement fautive. La théorie et l'expérimentation démontrent que la construction d'un seuil crée à son amont un dépôt de sédiment dont l'épaisseur tend à être égale à la hauteur de la chute d'eau créée.

Pour bloquer le transit de sable, l'ouvrage doit créer une chute d'eau. Plus cette chute est importante, plus le courant est ralenti en amont de la chute et plus la capacité de l'ouvrage à piéger les sédiments est importante.

Un seuil immergé de faible hauteur ne piège pas les sédiments s'il ne crée pas de chute : dans ce cas en effet, le courant a la même vitesse en amont et en aval et donc le transport de sable est le même : il ne peut y avoir de dépôt si la vitesse de l'eau est la même en amont et en aval de l'ouvrage.

Si la hauteur du seuil augmente (ou que la largeur de son échancrure diminue, ce qui a le même effet), la diminution de la section accroît fortement la vitesse et on a formation d'une chute. La vitesse du courant est alors ralentie, alors que la vitesse en aval varie peu : on crée ainsi une chute dont la valeur est proportionnelle au carré de la différence des vitesses sur le seuil et en aval. La vitesse amont est plus faible que la vitesse aval ; le sable se dépose alors dans le bief amont proportionnellement à la diminution de vitesse.

Lorsque le dépôt en amont est suffisant pour que le courant retrouve la valeur aval initiale (qui a un peu diminué), le transport de sable du bief amont est égal au transport du bief aval et les fonds deviennent stables de part et d'autre. Mais la pente est diminuée de l'effet de la chute et ce transport reste inférieur au transport avant construction du seuil : le fond est stable et exhausé.

Ce schéma de fonctionnement est théorique et simplifié : il ne tient pas compte du fait que les débits varient tout au long de l'année et d'une année à l'autre. En temps ordinaire le transport de sable est très faible en Loire et c'est en crue qu'il est le plus élevé.

Le fond amont va se stabiliser à une valeur moyenne de la chute pour les débits auxquels s'effectue un charriage : ces débits sont dits morphogènes. Lorsque la chute est faible ou nulle, la retenue des matériaux est négligeable. Si un ouvrage crée une chute à l'étiage mais que la chute aux débits des crues morphogènes est négligeable, la rétention des sables sera négligeable.

Pour qu'un seuil retienne les sédiments, il est donc nécessaire qu'il maintienne une chute pour les débits morphogènes qui assurent la plus grosse partie du charriage de fond. On voit ainsi

l'importance que revêt pour la conception des ouvrages la connaissance de la loi de charriage et par là l'urgence des mesures de terrain.

Le bilan de transport solide résumé au § 4.1 montre, malgré les incertitudes de ce calcul, que les débits assurant la majeure partie du transport sont élevés et centrés sur une valeur de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. On en déduit que, pour retenir les sables, les aménagements devront offrir une chute dans une fourchette de débits plus large que celle envisagée par les études antérieures, probablement jusqu'à $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. L'incidence de l'aménagement sur le niveau peut alors rester appréciable au débit de référence retenu par le PPRI (en général le débit centennal). Le schéma de restauration ne pourra donc atteindre les objectifs fixés en basses et moyennes eaux que si une surélévation des niveaux est admise pour ce débit de référence. Cette surélévation pourra être en aval de Mauves appréciable en basse mer mais faible en pleine mer. Dans tous les cas, les surélévations ne représenteront qu'une petite fraction des abaissements du niveau des crues obtenus au 20^{ème} siècle du fait des grands aménagements et des extractions de sable.

4.3. Conception d'ouvrages de chute polyvalents

En première approximation, nous estimons que la dénivelée totale nécessaire au blocage des matériaux issus du remodelage et des apports amont devra être de l'ordre de 2 m. Cette valeur conduira à prévoir plusieurs ouvrages implantés principalement entre Ancenis et Bellevue.

La navigation et le franchissement piscicole imposent sur les ouvrages de chute des vitesses modérées et probablement inférieures à 2 m/s; une telle valeur correspondrait à une chute élémentaire de l'ordre de 15 centimètres, inférieure à la chute sur les seuils du Fresne. L'exigence d'une faible dénivelée unitaire pour la navigation et le franchissement piscicole conduit à un rapport coût /dénivelée exorbitant pour une efficacité incertaine : en effet la dénivelée sur chaque ouvrage serait inférieure à la précision des calculs hydrauliques préalables à la définition de chaque ouvrage. Il faudrait donc entre 15 et 20 ouvrages pour obtenir un aménagement en équilibre et donc durable.

Constatons alors que le regroupement de plusieurs ouvrages est un moyen de réduire l'incidence de l'incertitude des calculs.

Mais aussi une réalisation plus économique est possible si on sépare l'ouvrage en deux parties affectées chacune à une fonction :

- La "franchissabilité" pour les migrateurs et la navigation serait assurée par une échelle mixte associant plusieurs chutes élémentaires et n'écoulant comme les échelles à poisson que la fraction du débit nécessaire aux deux franchissabilités.
- L'écoulement du reste du débit, notamment des fortes crues, beaucoup plus onéreux que les chutes élémentaires, serait assuré en principe par une chute unique.

L'ouvrage serait en quelque sorte un seuil fixe équipé d'une grande passe à poisson navigable et se composerait de deux parties :

- un seuil déversant offrant à tous les débits morphogènes la chute correspondant au relèvement recherché des fonds.
- une passe navigable, «escalier » de plusieurs marches de faible chute unitaire assurant, quel que soit le débit instantané et, en aval d'Ancenis, quel que soit le marnage, une dénivelée et une vitesse satisfaisant à l'objectif de "franchissabilité".

Pour fixer les idées, la passe navigable pourrait écouler un débit de l'ordre de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'étiage de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, mais seulement 10 à 20 % du débit instantané total au jusan lors des plus hautes eaux navigables. La hauteur de chute unitaire serait de 15 cm pour une vitesse limitée à 2 m/s, sauf aux extrémités où une marge d'erreur sera prise en compte.

La recherche de l'équilibre morfo-dynamique impose le blocage des sédiments dès l'amont immédiat de Nantes; en outre la présence du plateau rocheux de Bellevue crée des conditions favorables à l'édification d'un ouvrage en amont du pont; cet ouvrage serait donc la pièce maîtresse d'un aménagement permettant le dépôt et l'équilibre sédimentaire de la Loire en amont de Nantes.

D'autres ouvrages seront ensuite réalisés en amont, leur calage étant fonction de l'objectif de relèvement local et du bilan des sédiments disponibles. Mais ils seront peu nombreux, le dépôt des sables induit par la chute régressant avec le temps de plus en plus loin vers l'amont.

La conception de ces ouvrages exige la satisfaction d'objectifs difficiles à concilier :

- Obtention de la dénivelée à tous les débits morphogènes.
- Pour les ouvrages soumis à la marée, limitation de la vitesse dans la passe navigable non seulement au jusant, mais aussi au flot.
- Résistance des structures aux courants et aux affouillements.