




carte : www.geoportail.fr; photo : hydratec ©



RAPPORT DE PHASE 2 mis à jour après une démarche de concertation avec les acteurs et usagers de Loire



		11, rue Hoche 49100 ANGERS Email : hydratec_angers@hydra.setec.fr T : 02 51 47 05 73			N°affaire : 28439 Directeur de projet : B.CORTIER Responsable d'affaire : P. PEETERS Secrétaire : Réf fichier : PHASE_2-V0.docx	
Version	Date	Etabli par	Vérfié par	Nb pages	Observations	
V0	8/02/2013	CTB / PPE	CTB	61 + annexes	Emission	
V1	12/03/2013	CTB / PPE	CTB	63 + annexes	Prise en compte des observations du comité d'experts	
V2	03/04/2013	CTB / PPE	CTB	63 + annexes	Prise en compte des observations suite au comité de pilotage du 25/03/2013	
V3	27/05/2013	CTB / PPE	CTB	78 + annexes	Prise en compte des observations du GIP Loire Estuaire du 19/04/2013	
V4	31/10/2013	PPE	CTB	81 + annexes	Prise en compte des propositions du groupe de travail « acteurs – usagers » du 2 juillet 2013	

SOMMAIRE

PREAMBULE.....	3
1. CADRE GENERAL.....	5
1.1. CONTEXTE ET RAPPEL DU CONSTAT	5
1.2. OBJECTIFS DE RESTAURATION.....	6
1.3. PRESENTATION DE LA DEMARCHE ENGAGEE PAR LE GIP LE	7
1.4. METHODOLOGIE D'ETUDE.....	8
1.4.1. Phase 1	8
1.4.2. Phase 2	10
2. RAPPEL DES EVOLUTIONS PROBABLES DU LIT SANS INTERVENTION (SCENARIO TENDANCIEL)	11
2.1. EVOLUTION PROBABLE DU LIT DANS LES 75 PROCHAINES ANNEES EN L'ABSENCE D'INTERVENTION	11
2.2. CONSEQUENCES SUR LES LIGNES D'EAU ET L'EVOLUTION DES MILIEUX ENVIRONNEMENTAUX	13
2.2.1. Conséquences sur les lignes d'eau	13
2.2.2. Evolution des milieux environnementaux	14
3. LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DE LA PHASE 1.....	16
3.1. LES CONDITIONS DE REEQUILIBRAGE DU LIT SUR LE LONG TERME.....	16
3.2. LES COMBINAISONS D' ACTIONS RETENUES	18
3.2.1. Rappel des résultats de phase 1.....	18
3.2.2. Les dispositions retenues pour la définition du programme d'actions.....	19
3.2.3. Récapitulatif des actions.....	20
3.2.4. Calendrier général de l'opération.....	26
3.2.5. Coût général du programme.....	26
3.3. LES EFFETS TRANSITOIRES.....	29
3.4. LES EFFETS A LONG TERME SUR LES FONDS ET LES LIGNES D'EAU.....	33
3.5. EFFET SUR LE BILAN SEDIMENTAIRE ET L'EVOLUTION DES FONDS.....	37
3.5.1. Rappel du bilan sédimentaire à 40 ans sans intervention dans le lit (scénario tendanciel).....	37
3.5.2. Bilan sédimentaire du programme d'actions.....	37
3.5.3. Evolution des fonds.....	39
4. EVALUATION DU PROGRAMME D' ACTIONS	41
4.1. MILIEU PHYSIQUE	41
4.1.1. Ligne d'eau.....	41
4.1.2. Marée	42
4.1.3. Morphologie	42
4.2. FONCTIONS ET USAGES	44
4.2.1. Navigation	44
4.2.2. Crue.....	44
4.2.3. Environnement.....	45
4.2.4. Accès aux îles où des usages ont été identifiés	48
4.3. FAISABILITE	48
4.3.1. Procédures réglementaires.....	48
4.3.2. Ingénierie de conception	50

5.	COÛT DU PROGRAMME D' ACTIONS ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES	52
5.1.	MONTANT DES TRAVAUX	52
5.1.1.	<i>Prix unitaires</i>	52
5.1.2.	<i>Montant global de l'opération</i>	53
5.2.	LE SECTEUR AVAL DE OUDON A BELLEVUE.....	54
5.2.1.	<i>Définition des actions</i>	54
5.2.2.	<i>Le raccourcissement des épis sur les bancs de Oudon et de Mauves-sur-Loire</i>	54
5.2.3.	<i>Aménagement de Bellevue</i>	58
5.2.4.	<i>Conditions de faisabilité</i>	58
5.2.5.	<i>Coût</i>	61
5.3.	LE SECTEUR COMPRIS ENTRE ANCENIS ET OUDON	62
5.3.1.	<i>Définition des actions</i>	62
5.3.2.	<i>Conditions de faisabilité</i>	64
5.3.3.	<i>Coût</i>	65
5.1.	LE SECTEUR COMPRIS ENTRE ANCENIS ET SAINT-FLORENT-LE-VIEIL.....	66
5.1.1.	<i>Actions envisageables dans le lit principal</i>	66
5.1.2.	<i>Actions envisageables dans le bras de Varades</i>	66
5.1.3.	<i>Coût</i>	68
5.2.	LE SECTEUR AMONT COMPRIS ENTRE SAINT-FLORENT-LE-VIEIL ET LA POINTE	69
5.2.1.	<i>Définition d'actions envisageables</i>	69
5.2.2.	<i>Coût</i>	72
6.	SUIVI DES ACTIONS.....	73
6.1.	ETAT INITIAL.....	73
6.2.	SUIVI DE L'EFFICACITE.....	74
6.3.	ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE	76
6.4.	SUIVIS SPECIFIQUES AUX ETUDES DETAILLEES DE BELLEVUE ET DU SECTEUR DE L'ILE DE NEUVE-MACRIERE.....	76
7.	ROBUSTESSE DU PROGRAMME D' ACTIONS	78
7.1.	LE REGIME HYDROLOGIQUE	78
7.2.	LA CHARGE SOLIDE PROVENANT DE L'AMONT	78
7.3.	L'INFLUENCE DU NIVEAU MARIN	79
7.4.	CONCLUSION.....	80
ANNEXES	81

PREAMBULE

Le présent rapport constitue le rapport de phase 2 de l'étude de définition d'une stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération Nantaise.

L'étude conduite pour le GIP Loire Estuaire a été réalisée par le groupement hydratec – Asconit entre juillet 2011 et mai 2013.

La phase 1 a porté sur l'analyse des évolutions prévisibles du lit et la définition des différents scénarios d'intervention envisageables (voir § 1.3 et 1.4.1).

La phase 2 se propose de caractériser le contenu du programme d'actions issu du scénario retenu à l'issue de la phase 1.

Afin de faciliter sa compréhension et d'éviter au lecteur une lecture complète du rapport de phase 1, les chapitres 1 à 3 du présent rapport reprennent les éléments d'analyse décrits dans le rapport précédent (phase 1) et portant sur :

- le constat de la situation actuelle ;
- les évolutions probables du lit sans intervention (scénario tendanciel) ;
- les actions de restauration envisagées et leurs effets seuls ou combinés sur l'évolution du lit et des lignes d'eau ;
- le scénario retenu permettant d'envisager un réengrèvement progressif des fonds et d'optimiser le rehaussement des lignes d'eau à moyen et long terme.

Les chapitres 4 à 6 précisent les dispositions constructives des actions, leurs coûts, le calendrier de réalisation et les propositions pour le suivi et l'évaluation du programme d'actions.

Le chapitre 7 présente l'analyse de robustesse du programme d'actions en fonction d'hypothèses d'évolution du régime hydrologique (période plus sèche), de l'influence de la charge solide provenant de l'amont ou encore de l'influence de la surélévation du niveau marin.

A l'issue de la phase 2, le programme d'actions finalisé pour la reconquête du lit de la Loire entre Nantes et les Ponts-de-Cé, et validé par le comité de pilotage, a été présenté à un groupe de travail représentatif des acteurs et usagers de la Loire en vue d'une concertation sur les actions proposées et les conditions de leur faisabilité.

Le groupe de travail s'est réuni à deux reprises :

- le 16 avril 2013 afin de présenter la stratégie retenue et échanger sur les actions envisagées ;
- le 2 juillet 2013 où le programme a été détaillé action par action et les mesures proposées ont fait l'objet d'échanges constructifs.

Les propositions issues de cette concertation sont reprises dans ce document de phase 2 mis à jour.

Le groupe de travail « acteurs-usagers » était composé de :

- Christophe Dougé et Channig Urvoy (Région Pays de la Loire)
- Patrick Falkowicz (SGAR 44)
- Arnaud le Névé (DREAL)
- Nicolas Pichon (VNF)
- Régis Le Quillec (AELB)
- Yves Bourse (Mairie de Mauves-sur-Loire)
- Yannick Perraud (pêcheur professionnel)
- Jacques Birgand (Comité pour la Loire de Demain)
- Yann Nicolas (Fédération de pêche du 49)
- Nicole le Nevez et Valérie Drouet (CORELA)
- Jacques Zeimert (Association Sauvegarde de la Loire Angevine)
- Estelle Lemoigne-Maulny (Association SOS Loire vivante)

Participaient également, au titre de la conduite et de la réalisation des études relatives au programme :

- Benoît Cortier et Pierre Peeters (Hydratec)
- Bernard Prud'homme et Pierre Bona (GIP Loire Estuaire)

1. CADRE GENERAL

1.1. CONTEXTE ET RAPPEL DU CONSTAT

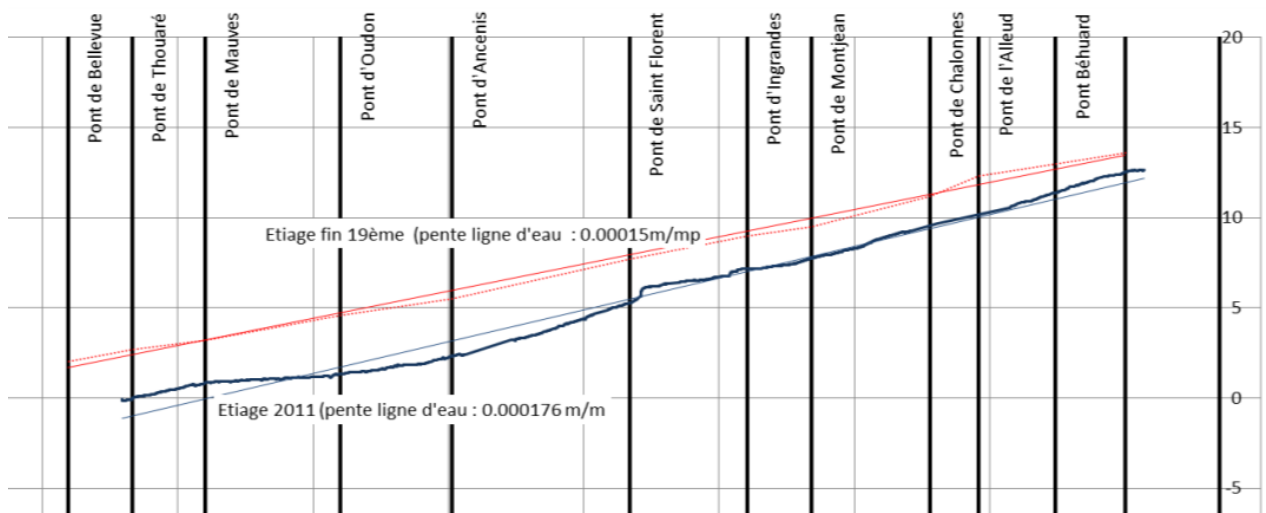
Le lit principal de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes présente une incision importante. Elle résulte de l'aménagement début 20^{ème} siècle d'un chenal de navigation au moyen d'épis et d'ouvrages de contrôle des bras secondaires puis des extractions de matériaux dans le lit du fleuve au 20^{ème} siècle notamment dans le secteur aval entre Ancenis et Nantes. Ces aménagements ont également eu pour effet de modifier la pente du lit et donc de la ligne d'eau.

Ce phénomène a été accentué par les travaux réalisés dans la partie estuarienne pour favoriser la navigation maritime jusqu'à Nantes et qui ont contribué à faire progresser la limite de la marée dynamique de Nantes jusqu'à Ancenis.

Le secteur d'intervention est marqué par plusieurs seuils naturels qui ont été arasés pour les besoins de la navigation dans les années 1970-1980. Ce secteur est sans doute le plus marqué par le cadre structural de la vallée avec la présence de la cluse du Cellier et les nombreux affleurements rocheux associés.

L'analyse du profil en long du chenal principal de Loire met en évidence les principaux résultats détaillés ci-après.

- Les pentes actuelles observées sont significativement supérieures à la pente de la ligne d'eau d'étiage de la fin du 19^{ème} siècle. Elle est ainsi passée de 0,15 ‰ à 0,18 ‰ comme le montre le graphique ci-après.



- L'évolution actuelle du fond s'inscrit vraisemblablement dans un processus transitoire d'érosion régressive. Ce processus devrait se poursuivre si aucune perturbation ne vient l'entraver (comme par exemple l'augmentation de la charge amont, la remobilisation de matériaux présents dans le lit, le piégeage des matériaux mobilisés en fond de chenal, l'incision du lit atteignant le substratum,...) et tant que la pente n'a pas retrouvé une valeur permettant d'équilibrer la capacité de transport du fleuve avec sa charge solide.
- Les bras secondaires sont en général « perchés » au-dessus du lit principal d'une hauteur comprise entre 1,9 m (bras de Varades) et 4,4 m (bras du Bernardeau). Il est remarquable de constater que ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celle de l'abaissement de la ligne d'eau d'étiage constaté entre le

début du 20^{ème} siècle et maintenant, excepté pour le bras de la Guillemette qui constituait autrefois l'ancien chenal navigable. On peut donc considérer que le phénomène de sédimentation dans les bras secondaires est beaucoup moins important que ne l'est l'incision du chenal principal. L'impression d'encombrement des bras secondaires par les alluvions semblerait donc plus liée à l'abaissement de la ligne d'eau d'étiage et à la mauvaise alimentation hydraulique de ces bras, qu'au piégeage des matériaux dans ces derniers.

Les évolutions récentes sur les lignes d'eau montrent une tendance à l'enfoncement à l'étiage de Mauves jusqu'à la Pointe, excepté en amont des seuils du Fresne-sur-Loire. L'érosion régressive semble encore active. Ce bief est donc en déséquilibre au niveau de sa pente et ne dispose pas d'apports de sable suffisants pour se restaurer naturellement dans un « délai court ». En outre, les pentes des lignes d'eau actuelles, notamment entre Ancenis et Nantes, sont trop importantes pour que ces apports puissent être piégés et restaurer le lit.

Dans ce contexte, le GIP Loire Estuaire (GIP LE) a missionné, en juillet 2011, la société Hydratec pour élaborer une stratégie de reconquête du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération Nantaise, et définir le programme d'actions correspondant.

1.2. OBJECTIFS DE RESTAURATION

La recherche de différentes stratégies d'intervention possibles est liée aux attentes et objectifs visés de restauration morphologique de la Loire.

Ces objectifs dépendent eux mêmes des priorités souhaitées en termes de restauration des fonctionnalités écologiques des milieux et de maintien des usages et compte tenu de la gravité des dysfonctionnements observés.

Ainsi, sur la base d'un travail de concertation mené en 2008-2009 par le GIP LE, sous la forme d'un groupe de travail « acteurs-usagers », et de l'expertise hydrosédimentaire réalisé par Philippe Lefort en 2009, le principe suivant de restauration du lit de la Loire a été retenu par le GIP LE et ses partenaires : il s'agit de rééquilibrer la morphologie du lit pour une meilleure satisfaction des fonctions qu'il assure.

Ce principe de restauration a guidé le travail de construction de la stratégie d'intervention. Ont été également prises en compte les attentes partagées exprimées par le groupe de travail pour chacune des fonctionnalités du lit et les enjeux identifiés :

- ❑ **Fonctions écologiques** : L'abaissement de la ligne d'eau a pour incidence générale un caractère humide moins prononcé des milieux du lit majeur et donc une évolution des fonctions écologiques associées à ces milieux.
- ❑ **Continuité transversale** : les bras secondaires et ses boires échangent de façon insuffisante avec le bras principal. Il est souhaitable d'améliorer le fonctionnement des annexes par la restauration du lit mineur et par des actions internes aux annexes et à leurs connexions.
- ❑ **Navigation**. Les principaux usagers sont des plaisanciers et des pêcheurs, auxquels s'ajoutent un transporteur de sable sur la partie aval du secteur d'intervention et quelques bateaux à passagers. Le programme de travaux devra limiter les impacts négatifs (diminution des tirants d'eau et augmentation des vitesses d'écoulement) sur la navigation fluviale.

- ❑ **Evacuation des crues.** Les bras secondaires, en se comblant et en se végétalisant, jouent moins leur rôle d'évacuation des crues. Par ailleurs les dispositifs de rééquilibrage du lit peuvent avoir une incidence sur les lignes d'eau de crue. Il s'agit d'un point de vigilance vis-à-vis des actions qui peuvent être développées.
- ❑ **Attrait paysager du lit et des rives,** pour la promenade et la plaisance notamment.

La connectivité des annexes hydrauliques en fonction des débits de la Loire (hors secteur marnant) et leurs potentialités en termes de frayères à brochet est au centre des préoccupations des différents acteurs locaux de l'environnement.

Au droit des annexes hydrauliques à enjeu écologique, le groupe de travail estime ainsi qu'il faudrait relever la ligne d'eau d'1,30m à 1,80m, au débit de 850 m³/s, pour garantir la submersion en continu des principales boires en mars et avril, au minimum, et assurer une connexion temporaire en mai et juin.

Afin de permettre la navigation de pêche, de plaisance et de tourisme, un tirant d'eau de 1 m pour un débit de 220 m³/s ou 250 m³/s (étiage moyen) serait souhaitable sur les secteurs où il existe aujourd'hui une circulation de bateau à passagers. On cherchera également à permettre la navigation de plaisance et le transit d'un bassin à un autre pendant 75% de l'année (hors étiage sévère), pour des tirants d'eau de l'ordre de 0,80 m sans obstacle et sans augmenter la dangerosité.

Enfin, le maintien des accès agricoles aux îles a été évoqué mais seulement en cas d'usage avéré et sans entraver la continuité hydro-sédimentaire.

1.3. PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE ENGAGÉE PAR LE GIP LE

La présente étude engagée par le GIP LE pour définir le programme de restauration du lit de la Loire, comprend deux phases :

- ❑ **phase 1 :** analyse et évaluation de différents scénarios d'intervention envisageables et sélection d'un scénario en concertation avec les acteurs et financeurs du plan Loire,
- ❑ **phase 2 :** déclinaison du scénario retenu en un programme d'actions opérationnel.

La démarche ne consiste pas à entreprendre une étude détaillée des phénomènes hydro sédimentaires à l'œuvre le long de la Loire estuarienne, mais nécessite néanmoins une compréhension approfondie des mécanismes influant sur la morphologie de la Loire, afin de proposer les bons leviers d'intervention.

Cette compréhension est acquise au travers :

- ❑ Une analyse critique des études et travaux engagés à ce jour ;
- ❑ Un retour d'expérience sur des études et des missions réalisées sur des systèmes fluviaux présentant des caractéristiques hydro sédimentaires et des problématiques de restauration similaires ;
- ❑ L'acquisition et l'exploitation de données complémentaires telles que les lignes d'eau mesurées à différents débits dans le bras principal et les bras secondaires, la répartition des débits entre les bras pour différentes hydrologies amont, la granulométrie des matériaux des bancs et la bathymétrie des fonds ;
- ❑ La construction et la mise en œuvre d'un modèle hydrosédimentaire 1D/2D nécessaire à l'analyse des conditions de transport solide et d'évolution des fonds pour différentes situations avant et après travaux dans le lit et en considérant des chroniques de débits supérieures à 40 ans ;
- ❑ La mise en œuvre d'un processus de pilotage et de concertation à plusieurs niveaux :
 - avec les experts scientifiques du domaine hydro sédimentaire commissionnés par le GIP LE, afin de vérifier, à chaque étape de la réflexion, la pertinence du travail d'analyse et de la stratégie d'étude appliquée, et de définir éventuellement des actions particulières à investiguer,
 - avec les membres du comité de pilotage associant les financeurs et VNF, le maître d'ouvrage ayant vocation à intervenir dans le lit,
 - avec le GIP Loire Estuaire, maître d'ouvrage de l'étude.

Le présent document constitue le rapport final de phase 2.

1.4. METHODOLOGIE D'ÉTUDE

1.4.1. Phase 1

Cette phase vise à préciser les évolutions prévisibles du lit à moyen et long terme, sans intervention, à définir différents leviers d'actions permettant d'enrayer la dynamique actuelle d'incision des fonds et de baisse des lignes d'eau et de proposer des scénarios d'actions permettant de répondre aux objectifs de restauration définis par les partenaires du programme.

Les principales étapes de la phase 1 sont rappelées ci-après :

- ❑ Acquisition des données complémentaires nécessaires à l'étude. Les différentes investigations ci-après ont été réalisées :
 - Campagne de prélèvement de matériaux sur les bancs situés entre les épis et dans les bras secondaires entre Bouchemaine et Bellevue. 156 prélèvements ont été réalisés et analysés pour caractériser la granulométrie des sédiments situés dans la bande potentiellement active du lit. Cette campagne complète ainsi les mesures faites sur les matériaux du chenal en eau, par Hydro-expert en 1998 et Astérie en 2006.
 - Levé de trois lignes d'eau dans le chenal navigable pour trois débits différents de Loire : 150 m³/s, 900 m³/s, 2300 m³/s, et pour des coefficients de marées de vives eaux (respectivement 114, 96 et 91).
 - Mesure de la répartition des débits entre chenal navigable et bras secondaires par transect ADCP pour trois débits différents en Loire (150, 900 et 2300 m³/s). Les mesures de débits dans les bras secondaires ont concerné, de l'amont vers l'aval, les bras des Lombardières, de Saint-Georges, de Varades, de Neuve-Macrière et de Thouaré.

- Prises de vues aériennes obliques du lit de la Loire réalisées le 30 septembre 2011 en période d'étiage (150 m³/s à Montjean-sur-Loire) à une altitude de 150 m environ, afin de préciser la configuration actuelle des bancs présents dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaires.
 - Visites de terrain réalisées en septembre 2011 pour reconnaître l'état du lit et des ouvrages (chevrettes, épis, végétation présente sur les bancs et dans les différents bras, configuration des écoulements dans les bras secondaires, présence de points durs et de zones d'affleurements).
 - Exploitation du modèle numérique de terrain mis à disposition par le GIP LE et représentant la bathymétrie du lit relevé en 2009/2010.
- Analyse des enjeux environnementaux concernés par les attentes du groupe de travail en termes de remontée des lignes d'eau d'étiage et de débit moyen et d'amélioration des connexions hydrauliques.
 - Définition de la structure des pentes actuelles des fonds et de lignes d'eau dans le chenal navigable et les bras secondaires, et analyse comparative avec les lignes d'eau anciennes.
 - Evaluation des volumes de sédiments stockés dans les systèmes d'épis et dans les différents bras secondaires et pouvant être potentiellement remobilisés par des actions de décorsetage du lit (suppression/modification des épis et réouverture des bras secondaires).
 - Développement et construction d'un modèle hydrosédimentaire de la Loire entre Bouchemaine et l'agglomération nantaise. Le modèle construit en utilisant le logiciel HydraRiv développé par hydratec, représente le lit du fleuve selon deux domaines de modélisation : un domaine filaire (1D) pour la schématisation du chenal principal et des bras secondaires, un domaine bidimensionnel (2D) pour la schématisation des systèmes d'épis.
 - Réglage des lignes d'eau calculées par le modèle hydrosédimentaire, en régime permanent et pour les différentes lignes d'eau mesurées lors de la campagne d'acquisition de données.
 - Reconstitution d'une chronique hydrologique de 75 ans représentant une hydraulité moyenne du fleuve. La chronique a été construite à partir des débits journaliers mesurés entre 1965 et 2005, et en doublant la période correspondante de 40 ans.
 - Mise en œuvre et réglage du modèle sur le secteur test du bras des Lombardières sur la période 2010-2012 pour lequel un bilan sédimentaire a été réalisé par l'université de Tours, suite au remodelage des épis réalisé en 2009 par VNF entre la Possonnière et Chalonnes-sur-Loire.
 - Mise en œuvre du modèle hydro sédimentaire en situation actuelle et en situation aménagée pour la chronique des débits reconstituée et en considérant différentes hypothèses de transport solide provenant de l'amont.
 - Définition de scénarios envisageables d'actions dans le lit pour remonter les lignes d'eau et à tester par le modèle hydrosédimentaire.
 - Mise en œuvre du modèle hydro sédimentaire pour les différents scénarios d'action.
 - Evaluation des gains sur la remontée des fonds et des lignes d'eau à moyen et long terme pour les différents scénarios d'actions précédemment définis.
 - Définition et analyse des critères d'évaluation des actions envisagées pour la définition du programme de travaux.
 - Proposition des éléments constitutifs du programme d'action à étudier en phase 2 de l'étude.

Ces différents volets ont fait l'objet d'un rapport complet (phase 1).

1.4.2. Phase 2

Cette phase d'étude a pour objet de détailler le programme d'actions défini en phase 1 et à préciser en particulier les différentes modalités constructives et de mise en œuvre dans l'espace et dans le temps.

Elle distingue les principales étapes suivantes :

- Analyse des enseignements de la phase 1 sur les effets des actions sur les fonds et les lignes d'eau.
- Evaluation du programme d'actions sur le milieu physique et les principaux usages.
- Description sectorielle des actions et phasage.
- Prédimensionnement des aménagements et définition des dispositions constructives
- Estimation des coûts.

2. RAPPEL DES EVOLUTIONS PROBABLES DU LIT SANS INTERVENTION (SCÉNARIO TENDANCIEL)

2.1. EVOLUTION PROBABLE DU LIT DANS LES 75 PROCHAINES ANNÉES EN L'ABSENCE D'INTERVENTION

Nous rappelons ci-après les principales conclusions établies en phase 1 de l'étude.

Sans intervention dans le lit de la Loire (avec maintien des ouvrages dans leur état actuel, y compris les seuils du Fresne-sur-Loire), la tendance générale à l'incision se poursuivra de façon modérée. Les valeurs moyennes obtenues sur l'évolution des fonds du chenal principal, sur 75 années de simulation et en considérant une hypothèse basse du transport solide (charge solide amont correspondant à 60% de la capacité théorique de charriage du fleuve, soit 210 000 m³/an estimé selon la loi de transport de Meyer Peter Müller¹), sont :

- entre la Pointe et Ingrandes : incision inférieure à 0,2 m ;
- entre Ingrandes et Ancenis : incision de l'ordre de 0,3 m ;
- entre Ancenis et Oudon : incision sans doute plus marquée de l'ordre de 0,5 m ;
- entre Oudon et Bellevue : incision inférieure à 0,2 m.

Les évolutions se font sentir sur 40 ans. Entre 40 et 75 ans, on ne note plus de tendance nette à l'enfoncement, les variations des fonds résultant essentiellement des variations interannuelles de l'hydrologie du fleuve.

En considérant une hypothèse de charge solide amont plus forte, dénommée « hypothèse haute » (80% de la capacité théorique de charriage, soit 280 000 m³/an), l'incision se fait sentir essentiellement sur le secteur Ancenis-Oudon ; ailleurs les fonds seraient stables.

Il convient de signaler que cette hypothèse de transport par charriage est comparable à la charge solide annuelle estimée par l'université de Tours dans le lit de la Loire, en amont de la confluence de la Vienne, à partir de campagnes de mesures (282 000 m³/an). En tenant compte des apports solide de la Vienne, aujourd'hui non quantifiés, la valeur réelle de la charge solide annuelle, juste en amont du secteur étudié, devrait être supérieure à la valeur estimée par l'Université de Tours.

Evolution des fonds moyens (m) dans le bras principal de Loire- simulation réalisée sur la chronique 1965-2005 avec hypothèse basse de transport solide

Bief	+5 ans	+10 ans	+15 ans	+20 ans	+25 ans	+30 ans	+35 ans	+40 ans
Pointe-Ingrandes	0.20	-0.12	-0.06	-0.08	-0.27	-0.26	-0.20	-0.20
Ingrandes- Ancenis	-0.48	-0.12	0.09	-0.16	-0.12	-0.13	-0.30	-0.29
Ancenis-Oudon	-0.34	-0.49	-0.33	-0.12	-0.17	-0.31	-0.13	-0.48
Oudon-Bellevue	-0.30	-0.21	-0.30	-0.27	-0.11	-0.11	-0.15	-0.13

¹ Valeur retenue car se rapprochant de l'estimation faite par l'université de Tours dans le val de Bréhémont (282 000 m³ en 2010).

Evolution des fonds moyens (m) dans le bras principal de Loire- simulation réalisée sur la chronique 1965-2005 avec hypothèse haute de transport solide

Bief	+5 ans	+10 ans	+15 ans	+20 ans	+25 ans	+30 ans	+35 ans	+40 ans
Pointe-Ingrandes	0.25	0.09	0.23	0.21	0.06	0.12	0.18	0.06
Ingrandes- Ancenis	-0.56	-0.19	0.04	0.05	0.10	-0.04	-0.10	0.03
Ancenis-Oudon	-0.46	-0.65	-0.51	-0.33	-0.16	-0.16	-0.20	-0.39
Oudon-BelleVue	-0.14	-0.12	-0.26	-0.22	-0.06	0.04	0.12	0.04

Quelle que soit l'hypothèse de charge solide retenue, le risque de poursuite de l'incision du fleuve semble être le plus marqué sur le secteur médian entre Ingrandes et Oudon. Les secteurs amont et aval apparaissent les moins affectés par cette tendance. Ces résultats sont sans doute à mettre en relation avec une pente générale du fond entre Bellevue et Ancenis moins élevée que sur le secteur médian (0.16‰ contre 0.20‰ entre Oudon et Ingrandes). Pour le tronçon amont soumis à une forte pente (0.26‰), l'explication est plus délicate. Elle est sans doute à rechercher dans le rôle hydraulique important que jouent les bras de Chalonnnes et de Cul de Bœuf en période de crue, avec plus de la moitié du débit de crue qui transite dans ces derniers et pour moins de 30% pour les autres bras plus en aval. De ce fait, les contraintes érosives dans le bras principal sont moins importantes en amont d'Ingrandes.

Le scénario tendanciel a également été testé en considérant une chronique de Loire et une surélévation du niveau marin représentatives des évolutions possibles liées au réchauffement climatique (chronique 1945-1985 et cote du niveau moyen de la mer de + 0,20 m, à échéance 2040 - hypothèse de calcul retenu par SOGREAH² pour la Loire estuarienne, sur la base des recommandations de l'ONERC³).

Les résultats de simulation mettent en évidence les principaux éléments suivants :

- ❑ L'élévation du niveau moyen de la mer de + 0,20 m n'a pas d'effet sensible sur le bilan sédimentaire du fleuve. On note seulement un très léger effet bénéfique sur le fond du lit avec une diminution de l'incision de 1 à 3 cm entre Ancenis et Oudon.
- ❑ L'effet d'une variation des cycles hydrologiques sur l'évolution du fond du lit peut être évalué à ± 15 cm. C'est ce que montrent les résultats présentés en phase 1 à partir des simulations réalisées sur deux chroniques différentes 1945-1985 (hydraulicité faible) et 1965-2005 (hydraulicité moyenne).
- ❑ C'est la variation des apports solides amont qui entraîne les écarts les plus élevés sur les évolutions à long terme. On note ainsi un écart de l'ordre de 20 à 40 cm sur les lignes d'eau entre les deux hypothèses de charge solide provenant de l'amont.

² SOGREAH, Memo, *Hypothèses à prendre en compte pour l'évaluation des scénarios tendanciel et morphologique de restauration de la Loire estuarienne*, juin 2010

³ ONERC, Note de synthèse, *Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles*, février 2010

2.2. CONSÉQUENCES SUR LES LIGNES D'EAU ET L'ÉVOLUTION DES MILIEUX ENVIRONNEMENTAUX

2.2.1. Conséquences sur les lignes d'eau

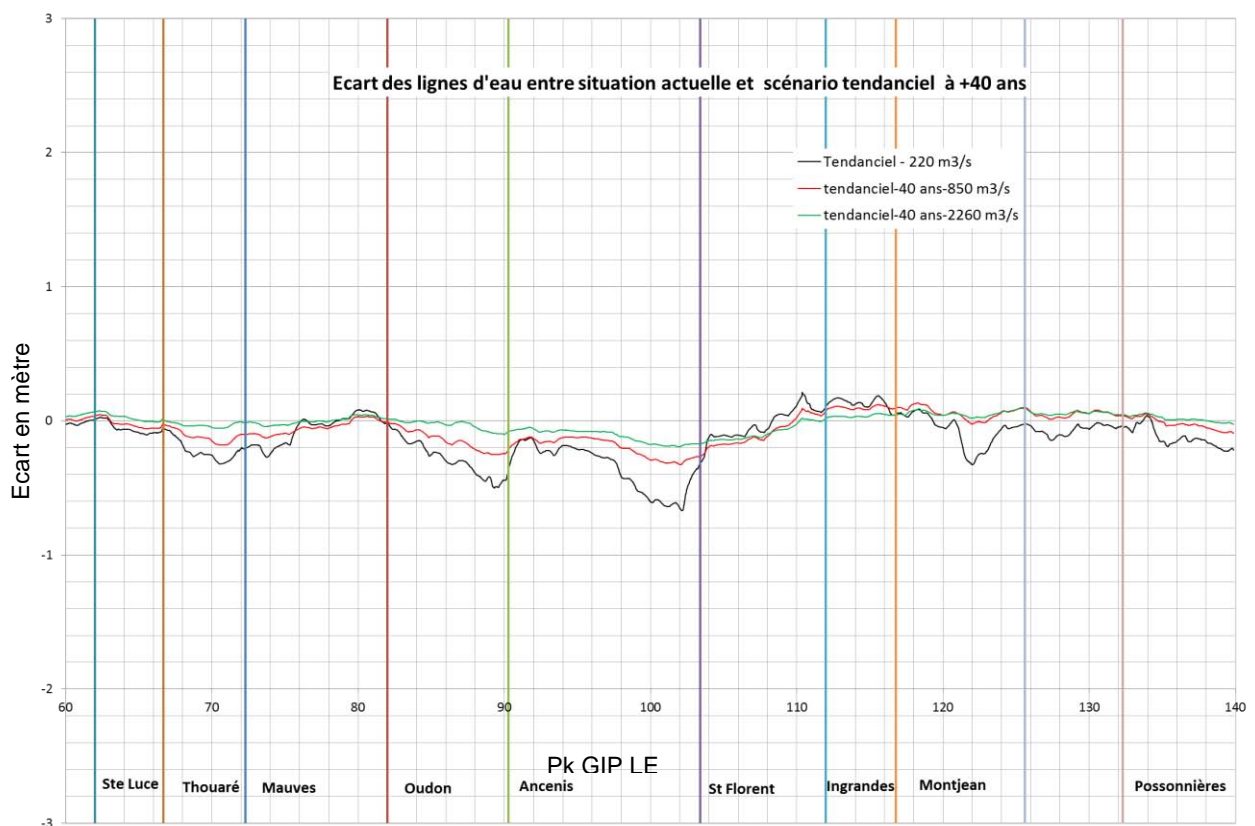
L'évolution de la ligne d'eau est reportée sur le profil en long joint (profil en long des écarts de cote d'eau entre situation actuelle et situation tendancielle à 40 ans). Les résultats obtenus appellent les principaux commentaires ci-après.

Les principaux secteurs d'abaissement de la ligne d'eau d'étiage se situent :

- ❑ à Mauves (entre les PK 76 et 67) ;
- ❑ entre Ancenis et Oudon (PK 92 à 82) ;
- ❑ entre Saint Florent-le-Vieil et Ancenis (PK 104 à 92) ;
- ❑ en aval de Chalonnnes-sur-Loire (PK 124 à 121) ;
- ❑ en amont de Rochefort-sur-Loire (PK140 à 132).

Cet abaissement de la ligne d'eau d'étiage correspond à une poursuite de l'incision du fond du chenal.

Le seul secteur où existe un rehaussement significatif de la ligne d'eau d'étiage, se situe dans le bras principal d'Ingrandes et entre Ingrandes et Montjean-sur-Loire. Ce secteur se caractérise par une pente hydraulique plus faible et donc des contraintes d'érosion sur le fond moins fortes qu'ailleurs (pente de la ligne d'eau proche de 0,12‰ contre 0,2‰ en moyenne)



2.2.2. Evolution des milieux environnementaux

Sans intervention, les habitats aquatiques du lit mineur auront tendance à se « figer » et seront morphologiquement plus « homogènes » de par la nature des aménagements et du manque de diversité des écoulements.

La diminution des débits attendus dans les bras secondaires et de leur fréquence de mise en eau se traduira en particulier par une baisse de surface des habitats aquatiques et de moins bons échanges biologiques avec le bras principal. Au module, le débit transitant dans les bras secondaires, diminuerait 15% en moyenne, passant ainsi de 2600 m³/s actuellement à 2200 m³/s avec le scénario tendanciel, débit instantané cumulé sur l'ensemble des bras secondaires.

De fait, la mise en eau des surfaces d'habitats aquatiques de faibles profondeurs qu'on observe lors de la submersion des bras secondaires sera plus rare. En phase de submersion, ces bras secondaires participent à la diversité des écoulements : habitats de faibles profondeurs avec des variations locales de courant souvent importantes, à la différence du bras principal qui présente une forte homogénéité des faciès d'écoulement.

Principalement dans les bras secondaires, ces habitats servent généralement de zones de caches et de nourriceries pour de nombreux juvéniles d'espèces aquatiques (poissons et batraciens principalement). Ils créent également des conditions favorables au développement de toute une partie de la faune benthique qui ne trouve pas d'habitat favorable dans le lit principal.

Si les bras secondaires sont moins alimentés, leur enrichissement et emboisement continuera à se développer réclamant des interventions anthropiques pour leur conserver leur capacité d'écoulement hydraulique en crue. Ces interventions ont toujours une influence forte sur le dérangement de la faune terrestre locale (castor) et ont un impact direct sur la petite faune locale qui colonise temporairement ses habitats exondés.

La moule d'eau douce (*unio crassus*) risque de bénéficier d'habitats moins importants en superficie et plus soumis aux interruptions d'alimentation en eau. Cette moule ne se développe que dans le lit principal. Cet impact négatif ne serait constaté que si des bancs de graves se trouvent exondés suite à la poursuite de l'incision du lit. Ce point n'a pas fait l'objet d'études particulières dans le cadre de ce dossier, il ne s'agit donc ici que de présomptions qui nécessiteront d'être vérifiées par un suivi lors de la réalisation des travaux et de leurs impacts.

Enfin, l'avifaune nicheuse (sterne, petit gravelot) peut également être impactée. Les grèves sableuses seront moins isolées du fait de l'incision du lit et donc du confinement des écoulements dans un chenal unique, les rendant plus sensibles au dérangement anthropiques et à la prédation. Les opérations d'entretien des bras secondaires peuvent avoir une influence sur leur répartition. Enfin, l'enrichissement de ces bras peut limiter leur zone de nichage.

On peut donc s'attendre localement à une fragilisation de certaines espèces, à une baisse du recrutement en juvénile, ainsi qu'à une diminution de la diversité. La Loire est un fleuve qui présente actuellement un bon fonctionnement écologique et une forte résilience (données RCS et inventaires Natura 2000). Cela ne remettra donc pas en cause l'état écologique des masses d'eau concernées, mais participera à une érosion progressive de la biodiversité locale.

Un bras secondaire peut évoluer en bras mort par déconnexion et comblement de son chenal ou de son point de déconnexion amont. Dans le contexte actuel, les sous-systèmes de bras morts, marais et dépressions topographiques, peuvent présenter une grande diversité d'associations végétales et animales. Ces zones sont très productives. Une végétation hydrophile, riche et variée peut s'y développer constituant de nombreux habitats pour la faune. Actuellement, dans ces bras morts les surfaces potentiellement en eau, au module, sont estimées à 9,3 ha, et serait de 8,8 ha avec le scénario tendanciel, soit une baisse sensible de 5%.

3. LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DE LA PHASE 1

3.1. LES CONDITIONS DE RÉÉQUILIBRAGE DU LIT SUR LE LONG TERME

Pour permettre le réengrèvement du lit, plusieurs types d'actions doivent être menés simultanément :

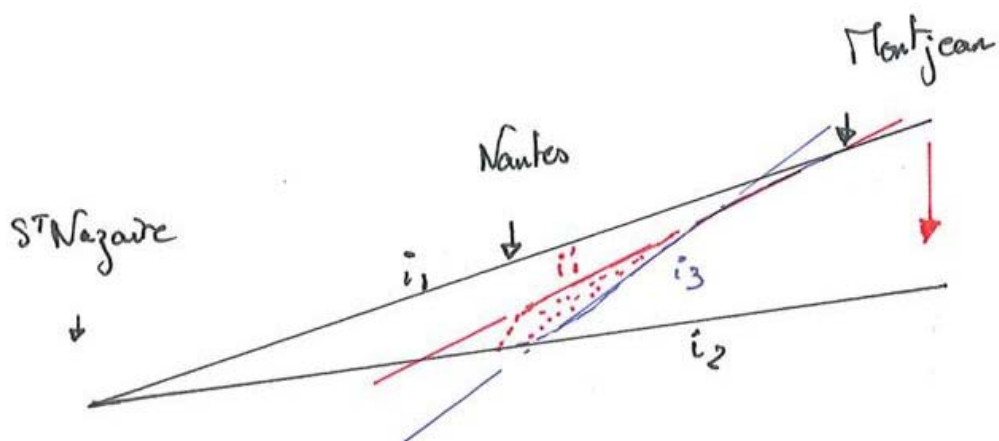
- L'un des moteurs de l'érosion étant la pente du lit, il convient de réduire la pente hydraulique existante afin de favoriser un processus de dépôt progressif dans le lit principal. Cette réduction de pente peut être obtenue :
 - **Par réalisation des ouvrages définis dans les études antérieures** (seuils à échancrure ou « épis à radier ») assurant une perte de charge significative quel que soit le débit considéré.
 - **Par élargissement du lit de la Loire.** Le remodelage, voire la suppression des épis auront pour effet de décorseter le lit et donc de restaurer une largeur mouillée plus importante.
 - **Par ouverture des bras secondaires.** La diminution du débit transitant dans le bras principal pour une large gamme de débit au-delà des débits d'étiage, aura pour conséquence une réduction de la capacité de transport de ce bras et la formation de dépôt. Les actions visant à rendre plus transparente les chevrettes existantes barrant l'entrée de certains bras et/ou à augmenter la capacité hydraulique des bras secondaires devraient permettre de réduire les débits transitant dans les bras principaux.

Il convient pour ce type d'action de différencier les effets à court terme (avec phénomène d'érosion transitoire dans les sections situés en amont et en aval des zones d'action) et les effets attendus à long terme (réengrèvement généralisé du lit en considérant une charge solide suffisante).

- L'autre moteur de l'érosion est le déficit sédimentaire. La charge solide entrant dans le bief étant inférieure à la capacité de transport de la Loire, cette dernière tend à prélever le différentiel de charge dans son lit actif actuel, c'est-à-dire principalement le bras principal, avec pour conséquence une incision du chenal. Il convient donc de remobiliser des matériaux existant dans les marges du chenal actif et localisés entre les épis et dans les bras secondaires.

La mise en œuvre de ces deux principes est nécessaire pour amorcer le processus de ré ensablement du chenal principal et de remontée progressive de la ligne d'eau d'étiage.

Un troisième principe doit également être mis en œuvre, il porte sur la condition limite aval. Dans la mesure où il ne peut être envisagé de rehaussement du fond du lit en aval de Bellevue, il convient d'admettre une zone de transition entre les deux biefs permettant d'assurer le raccordement entre les deux lits amont et aval (voir figure ci-dessous). Cette zone de transition peut être assurée de « façon brutale » par un ouvrage ponctuel (type seuil à échancrure) ou de façon plus progressive sur une certaine longueur de lit.



i_1 : pente du lit initiale

i'_1 : pente du lit restauré

i_3 : pente du lit actuel ($i_3 > i'_1 > i_1$)

i_2 : pente du lit à long terme en l'absence d'intervention

3.2. LES COMBINAISONS D' ACTIONS RETENUES

3.2.1. Rappel des résultats de phase 1

Les simulations réalisées en phase 1 de l'étude à l'aide du modèle hydrosédimentaire de la Loire entre la Pointe et l'agglomération nantaise, ont mis en évidence les effets attendus des différentes combinaisons d'actions, que nous rappelons ci-après.

- **Le remodelage des épis** conduit à déstocker les sédiments piégés dans le bief avec deux conséquences : une augmentation de la section d'écoulement du fait de la remobilisation des matériaux entre les épis, et une augmentation temporaire (sur plusieurs dizaines d'années) du transit solide vers l'aval. L'impact sur le relèvement de la ligne d'eau n'est pas systématique, dans la mesure où l'élargissement du lit peut conduire à l'étalement des écoulements non compensé par un réengrèvement du fond qui restera modéré du fait de la migration des sédiments vers l'aval. En effet, les matériaux libérés entre les épis ont beaucoup de difficultés à rester dans le lit en amont de Nantes, compte tenu de leur granulométrie (matériaux fins) et de la pente hydraulique du fleuve. En l'absence d'aménagement à Bellevue, sur les 5,5 Mm³ de matériaux libérés par la suppression de l'ensemble des systèmes d'épis, 3,0 Mm³ transiteraient vers l'aval, le reste se déposerait pour partie (1,3 Mm³) dans le lit principal et pour l'autre (1,0 Mm³) dans les bras secondaires.
- **L'ouverture des bras secondaires** permet de mieux répartir les débits du fleuve et réduire les contraintes d'érosion sur le fond. Cette action vise ainsi à lutter contre l'incision du lit mais ne permet pas à elle seule de relever les lignes d'eau. On peut même observer dans certains cas un effet négatif sur ces lignes d'eau du fait de l'étalement des écoulements lié à l'élargissement de la section d'écoulement.
L'effacement des chevrettes barrant l'amont des bras, s'il contribue à mieux répartir les débits entre les bras, supprimera l'effet de contrôle qu'elle procure sur la ligne d'eau d'étiage en amont et entrainera de ce fait une baisse du niveau d'eau dans le bras principal.
Pour autant, la réouverture d'un bras, même partielle, afin de conserver un contrôle des lignes d'eau, peut répondre à un objectif de rétablissement d'un écoulement favorable aux fonctions écologiques du bras (diversité des faciès sédimentaires,...).
- **Les actions visant à stimuler les érosions de berges**, en admettant qu'elles peuvent contenir une fraction graveleuse favorable au dépôt, produiront des quantités de matériaux largement inférieures aux volumes nécessaires pour réengraver le lit. Elles contribueront néanmoins à restaurer une certaine diversité des milieux et à diminuer le déficit sédimentaire du fleuve.

Ces résultats montrent la difficulté à obtenir le relèvement des lignes d'eau de la Loire par des actions visant le décorsetage du lit et son réengrèvement.

Dans ce contexte, les principes qui ont guidé au choix des actions sont les suivants :

- Les actions (remodelage des épis, ouverture des bras) devront répondre à un bilan favorable vis-à-vis des lignes d'eau ou a minima neutre. S'agissant des bras secondaires, il s'agira de s'attacher à ne pas perturber le contrôle de la ligne d'eau d'étiage lié à l'existence des chevrettes actuelles ce qui peut cependant autoriser des adaptations des chevrettes existantes pour améliorer l'écoulement dans le bras à des fins notamment environnementales.
- Le phasage des travaux devra permettre d'assurer une efficacité maximale des actions à long terme. De ce fait, il conviendra d'éviter un déstockage prématuré des matériaux entre les épis, afin de limiter leur migration en aval du périmètre de l'étude, préalablement à la réalisation d'opérations favorisant le piégeage de ces matériaux.
- L'ouverture des bras secondaires devra se faire en priorité dans les secteurs les plus soumis au risque d'incision, et en préservant les conditions de contrôle de la ligne d'eau dans le bras principal en étiage. Il convient pour cela de ne pas systématiquement supprimer les chevrettes mais plutôt de reconsidérer leur cote d'arase qui sera calée au-dessus de la ligne d'eau d'étiage et de fermer les brèches actuelles.

3.2.2. Les dispositions retenues pour la définition du programme d'actions

Le programme d'actions doit respecter la stratégie suivante :

- Les aménagements visant à créer une perte de charge répartie sur une certaine distance de lit (environ 1 km) et à diminuer la pente hydraulique en amont, constituent les actions les plus efficaces pour favoriser le dépôt des alluvions et remonter les lignes d'eau. Les résultats de simulation montrent clairement l'intérêt d'un tel aménagement compte tenu par ailleurs de la faible efficacité des autres actions sur la restauration des lignes d'eau.
L'implantation d'un tel aménagement est à envisager à la limite aval du secteur d'étude, pour constituer une zone de transition entre la zone estuarienne, caractérisée par des pentes très faibles, et la Loire plus en amont, aux pentes plus fortes. L'aménagement ne doit pas être trop aval par rapport aux zones soumises à l'érosion. Il paraît difficile de prévoir cette implantation dans l'agglomération nantaise dans la mesure où la configuration de la Loire à deux bras nécessiterait de réaliser deux aménagements au lieu d'un seul et que, par ailleurs, la sensibilité aux inondations est plus forte dans l'agglomération du fait des enjeux économiques et urbains, ce qui amènerait une contrainte supplémentaire dans la conception de l'aménagement. De par l'existence d'un platier rocheux sur le site de Bellevue et le rôle que jouait historiquement ce site dans l'équilibre morphologique des fonds, ce secteur semble le plus approprié pour réaliser cette jonction. Cette zone de transition doit permettre d'assurer une restauration progressive des fonds en amont tout en acceptant le maintien des fonds dans leur état actuel en aval. Dans ce contexte il apparaît pertinent d'y proposer un aménagement progressif sur une certaine longueur de lit (environ 1200 m). Il permettrait de retenir le sable libéré des systèmes d'épis en particulier de Mauves et de Oudon et de contribuer à relever les lignes d'eau jusqu'à Ancenis.
- Le secteur entre Saint Florent-le-Vieil et Oudon constitue la zone où les effets de l'enfoncement du chenal principal se font le plus sentir (cf. scénario tendanciel) avec un abaissement important de la ligne d'eau à l'étiage et au module. Le remodelage des systèmes d'épis constitue donc une mesure prioritaire sur ce

secteur. Cependant cette action reste insuffisante pour contrecarrer les évolutions tendancielle et il est proposé un rechargement du bras principal au niveau de l'île Neuve-Macrière. Une alternative serait la réalisation d'un deuxième aménagement visant à créer une perte de charge.

- ❑ La reprise d'érosion sur les berges par démantèlement des protections existantes sur l'île de Neuve-Macrière constituera une autre source potentielle de matériaux mais cependant limitée en volume. Elle favorisera en premier lieu l'amélioration de l'état écologique des berges.
- ❑ La réouverture du bras de Varades est bénéfique pour le réengrèvement du bras principal de Saint-Florent-le-Vieil et constitue donc une action nécessaire pour le décorsetage du lit dans ce secteur. Il conviendra cependant d'être attentif au calage de la chevrette amont, après intervention (fermeture de la brèche et abaissement de l'ouvrage).
- ❑ La suppression des systèmes d'épis entre Montjean-sur-Loire et Ingrandes pourrait être bénéfique pour le réengrèvement du lit, en contribuant à la restauration morphologique du fleuve. Cependant, cette action n'a pas été retenue pour l'élaboration du programme dans la mesure où elle n'a pas d'effet positif sur les lignes d'eau de Loire.
- ❑ Pas d'intervention sur les épis dans le secteur en amont de la Possonnière. En effet ces épis ont été remodelés par VNF dans le bras des Lombardières en 2009. Ce remodelage semble produire ses effets : les premiers éléments disponibles du suivi réalisé sur le secteur par l'université de Tours mettent en évidence des mouvements de matériaux dans le secteur aval de la Possonnière (érosion). Il convient d'agir plutôt sur la réouverture du bras de Saint-Georges et le réaménagement de la chevrette de l'Alleud qui sera à caler au-dessus de la ligne d'eau d'étiage, et ce à des fins plus environnementales. En effet le déstockage de sable entre les épis sur ce secteur risque d'entraîner un abaissement non désiré des lignes d'eau.

Les actions proposées seront **phasées** de façon à respecter une logique d'intervention dans le lit de la Loire, visant à obtenir le meilleur bilan sédimentaire possible et faciliter leur mise en œuvre (étalement dans le temps des travaux et donc des dépenses).

3.2.3. Récapitulatif des actions

Les différentes actions proposées sont présentées et localisées sur le tableau et la carte, page suivante.

Les dispositions constructives correspondantes sont précisées au chapitre 5 et dans les pièces graphiques reportées en annexe.

Ce programme d'action intègre par ailleurs :

- ❑ **Les actions de dévégétalisation du lit prévues par VNF.** Parmi les sites où ces actions sont programmées, deux sites présentent des enjeux significatifs en termes de remobilisation des matériaux du lit et donc de recharge potentielle du fond. Il s'agit des sites en amont du Pont de Mauves (système d'épis RD) et en aval du pont d'Oudon (île Bridon). Ces deux sites se caractérisent en effet par des volumes importants de matériaux (plusieurs milliers de m³) qui sont fixés de façon durable par une végétation bien installée. Les autres sites présentent des enjeux moins importants en termes de restauration de la mobilité

des matériaux alluviaux, soit parce que le développement de la végétation reste ponctuel soit parce que les surfaces concernées sont faibles (île Moron, île Ripoche, îlots en amont et en aval du pont de Thouaré) ou leur situation trop en aval pour présenter un intérêt réel vis-à-vis de l'engrèvement du bief.

On rappelle cependant que la dévégétalisation des systèmes d'épis et des bras secondaires réalisée sous maîtrise d'ouvrage VNF, **constitue une étape préalable nécessaire à la mise en œuvre des actions proposées pour le démantèlement ou le remodelage des épis, et le dégagement de certains bras** où existe un stock de matériaux significatif (Bras de l'île Neuve-Macrière, bras des Brevets). Si cette dévégétalisation devait être réalisée bien avant le démantèlement des ouvrages, il s'avérera nécessaire de procéder à des opérations d'entretien sur les bancs afin de maintenir meubles les alluvions.

Pour les autres secteurs d'intervention, si les intérêts purement de restauration morphologique sont moindres, il n'en reste pas moins qu'ils répondent à des enjeux plus hydrauliques (évacuation des crues) et/ou environnementaux. Enfin selon les configurations rencontrées, le déboisement de certaines parties du lit peut permettre de réduire les contraintes d'érosion sur le fond en favorisant une diminution des vitesses d'écoulement dans le chenal principal.

□ **La réflexion sur le devenir des seuils du Fresne-sur-Loire :**

Les analyses conduites en phase 1 ont mis en évidence les points suivants :

- Le secteur en amont des ouvrages est celui qui est le moins soumis à une évolution tendancielle à l'incision.
- Compte tenu des opérations de remodelage d'épis déjà réalisées, la stratégie d'intervention sur le secteur vise surtout à réouvrir des milieux.
- Les simulations réalisées avec le modèle hydrosédimentaire ont montré l'effet positif de la restauration des ouvrages dans leur configuration d'origine sur le réengrèvement des fonds en amont. Pour le scénario tendanciel sans intervention, la différence de cote d'eau calculée au bout de 40 ans avec ou sans ouvrage dans sa configuration actuelle est de + 4 cm environ à Ingrandes. En cas de restauration des seuils leur permettant d'assurer la perte de charge initialement prévue (0,5m), cette différence de cote serait de + 34 cm.
- Les différentes interventions envisageables sur les seuils n'ont pas d'incidence sur la stratégie adoptée pour les secteurs plus en aval, ce qui laisse les possibilités ouvertes

Dans ce contexte, les deux options envisageables pour ces ouvrages pourraient être les suivantes :

- Adaptation des ouvrages pour maintenir la répartition actuelle des débits entre les deux bras (voire l'améliorer encore), répartition qui s'avère bénéfique pour le fonctionnement morphologique du bras de Cul de Bœuf ;
- Action plus volontariste consistant en une modification des seuils pour restaurer la perte de charge d'origine et arriver à un effet plus marqué sur la morphologie de la Loire en amont.

Il convient en tout état de cause d'inscrire au programme une intervention sur les seuils du Fresne-sur-Loire, la nature de cette intervention restant à définir en fonction des décisions qui pourront être prises au sein du comité consultatif piloté par VNF.

Dans la suite de l'étude il a été convenu de ne pas intégrer explicitement la restauration de ces ouvrages dans les modélisations et l'évaluation du programme d'actions.

- **Les objectifs de restauration de certaines annexes fluviales.** Dans le cadre du Contrat Restauration Entretien (CRE) de la Loire Estuarienne Amont, piloté par le CORELA, des actions de restauration hydro-morphologique ont été inscrites dans le programme 2009-2014, notamment sur les annexes fluviales

suivantes : boires de la Varenne (Chapoin et Anjou), de Saint-Nicolas, du Cellier, de la Bridonnière, de Drain, Torse, de Champtocé et de la Ciretterie.

Les interventions développées pour agir sur la morphologie du lit croisent les opérations programmées, susceptibles d'être programmées ou déjà réalisées au titre du programme sur les annexes fluviales. Il est privilégié une approche cohérente par bief lorsque les interactions entre les deux programmes sont importantes pour à la fois tenir compte des contraintes de fonctionnement des annexes dans la définition des actions structurantes et développer une stratégie d'intervention cohérente dans le temps.

Dans le cadre du programme d'action, les travaux menés dans le lit principal seront conçus de telle manière à renforcer autant que faire se peut l'efficacité des actions inscrites au programme sur les annexes fluviales. Pour ce faire, on pourra agir de manière directe ou indirecte :

- De manière directe, par une amélioration des conditions de connectivité hydraulique des annexes directement reliées à la Loire, en modifiant la configuration de la zone de connexion (suppression des bancs de sable et/ou d'épis, création d'un chenal secondaire) tout en veillant au respect des conditions hydro-morphologiques favorables au bon fonctionnement écologique de l'annexe. On s'intéressera ainsi aux annexes suivantes : **bras des Vinettes, bras des Brevets, boire Chapoin** (et **boire de la Bridonnière** indirectement), **boire d'Anjou, boire St-Nicolas, boire du Cellier, boire de la Patache** ;
- De manière indirecte, par une réouverture des bras secondaires auxquels sont reliés certaines boires et certains marais à forte valeur écologique. On pense en particulier au **bras de la Pierre de Drain** auquel sont connectées les boires de Drain, au bras de **l'île Delage** où se jette le marais de Grée, au **bras du Bernardeau** qui sert d'exutoire au marais de Méron et de connexion aval pour la boire Torse et au **bras des Babins** auquel est relié la boire du Seil au Marillais.

Définition des actions et effets attendus sur le lit et les lignes d'eau

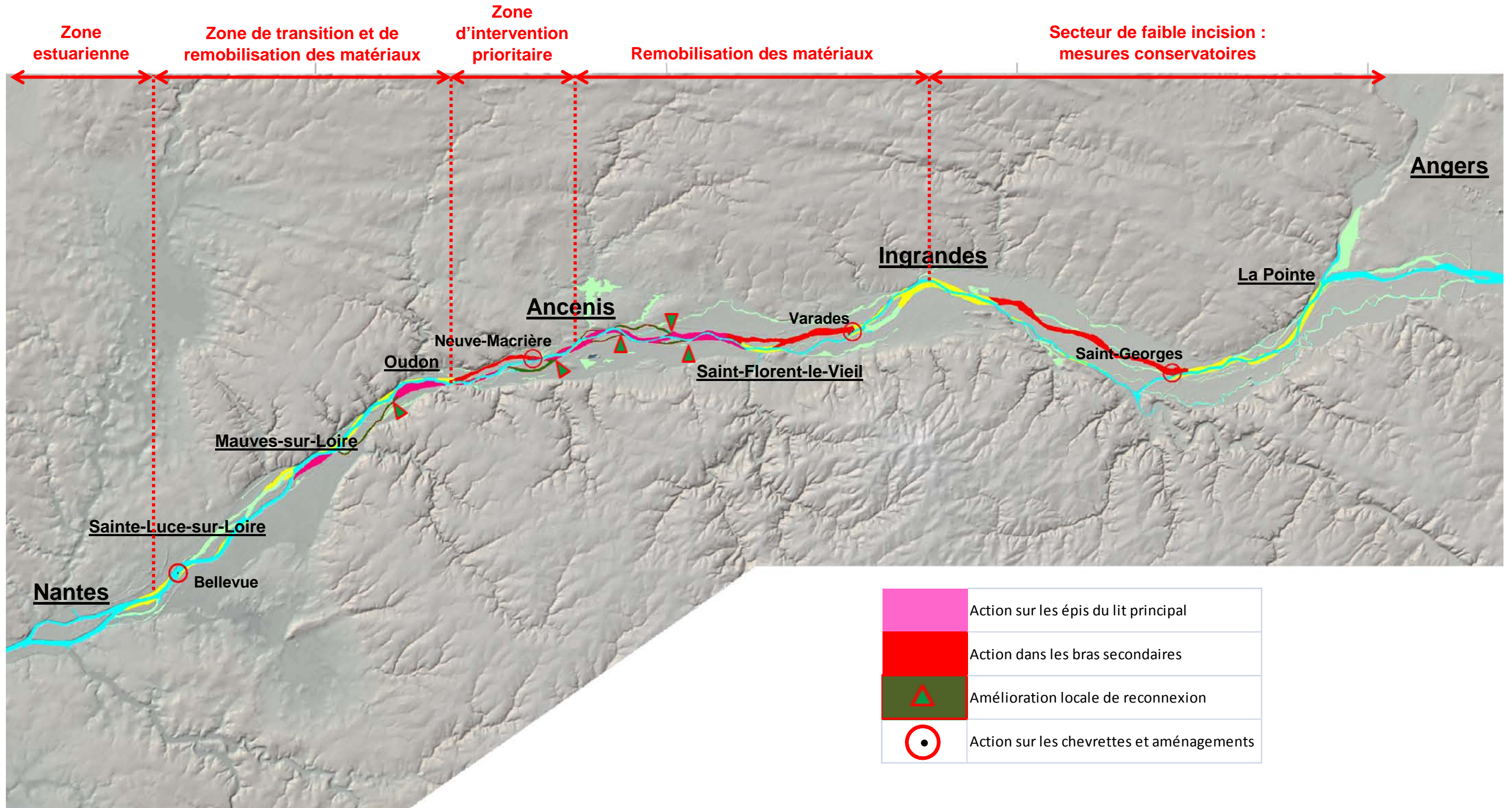
Secteur géographique	Actions	Effet attendu	Proposition d'ordonnement
<p>La Pointe - Ancenis</p>	<p>Mise en place d'un dispositif de suivi de l'évolution de la connexion des bras de St Georges et de Varades en vue d'affiner les actions pour améliorer le transit sédimentaire dans ces bras secondaires:</p> <ul style="list-style-type: none"> - suppression des systèmes d'épis ou des chaussées traversantes - réaménagement de la chevrette amont du bras de Varades - réaménagement de la chevrette de l'Alleud, en amont du bras de St Georges 	<p>Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès d'écoulement – Amélioration des milieux environnementaux</p>	<p>4</p>
	<p>Raccourcissement des épis dans le bras principal de Loire entre les ponts de Saint Florent-le-Vieil et d'Ancenis (13 km) Amélioration locale de la connexion des bras de l'île Delage, des Vinettes, du Bernardeau et des Babins</p>	<p>Remobilisation des matériaux – Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès d'écoulement – Amélioration des milieux environnementaux</p>	<p>4</p>
<p>Ancenis - Oudon</p>	<p>Réalisation d'un chenal pilote dans le bras de l'île de Neuve-Macrière ;</p>	<p>Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès d'écoulement – Amélioration des milieux environnementaux</p>	<p>1</p>
	<p>Réaménagement de la chevrette barrant le bras de</p>	<p>Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès</p>	

	l'île de Neuve-Macrière	d'écoulements	
	Rechargement du bras principal au droit de l'île de Neuve-Macrière par des matériaux non érodables	Lutte contre l'incision du lit	

Définition des actions et effets attendus sur le lit et les lignes d'eau (suite)

Secteur géographique	Actions	Effet attendu	Proposition d'ordonnement
Ancenis - Oudon	Suppression des épis dans le bras principal entre les ponts d'Ancenis et d'Oudon (8 km)	Remobilisation des matériaux – Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès d'écoulement – Amélioration des milieux environnementaux	1 / 2
	Amélioration locale de la connexion du bras de la Pierre de Drain, du bras des Brevets et de la boire de la Patache	Amélioration des milieux environnementaux	2
	Reprise d'érosion sur les berges de l'île Neuve-Macrière	Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès d'écoulement – Amélioration des milieux environnementaux	
Oudon – Sainte Luce-sur-Loire	Réalisation de l'aménagement du lit à Bellevue visant à créer une perte de charge à l'étiage et à diminuer les pentes hydrauliques en amont.	Lutte contre l'incision –Rehaussement immédiat de la ligne d'eau en amont	2
	Raccourcissement des épis de la grève Saint Simon (amont du pont de Mauves-sur-Loire – rive gauche) et de l'île Perdue en aval du pont d'Oudon Amélioration locale de la connexion des boires Chapoin, d'Anjou, de St-Nicolas et du Cellier	Remobilisation des matériaux – Lutte contre l'incision du lit – Diversification des faciès d'écoulements	3

Plan de situation des actions proposées



	Action sur les épis du lit principal
	Action dans les bras secondaires
	Amélioration locale de reconnexion
	Action sur les chevrettes et aménagements

3.2.4. Calendrier général de l'opération

Le calendrier ci-après propose un phasage des actions établi sur la base de deux CPER (Contrat de Plan Etat Région) 2014-2020 (phasage 1 et 2) et 2021-2027 (phasage 3 et 4), et en respectant au mieux les contraintes suivantes :

- ❑ **Contraintes sectorielles.** Les actions à mener prioritairement concernent le secteur médian situé entre Ancenis et Oudon, qui apparaît le plus exposé au risque d'incision. L'aménagement de Bellevue, qui nécessitera une longue phase d'études et de concertation, ne pourra être engagé avant 5 ans.
- ❑ **Contrainte financières.** Les dépenses devront être si possible réparties dans le temps, afin de faciliter la mobilisation des financements et garantir le bon déroulement des travaux.
- ❑ **Contraintes sédimentaires.** On prendra soin de ne « libérer » les matériaux situés entre les épis ou dans les bras secondaires, qu'après avoir mené les actions permettant de favoriser les conditions de dépôt en aval. Pour ce faire, on réalisera le démantèlement des épis dans le secteur d'Oudon et de Mauves que lorsque l'on sera en situation de réaliser l'aménagement de Bellevue. De même, le décorsetage des épis entre Ancenis et Saint-Florent-le-Vieil ne se fera qu'après avoir réalisé les travaux de décorsetage du lit entre Ancenis et Oudon.
- ❑ **Cadre réglementaire.** L'opération sera soumise à de nombreuses procédures réglementaires pour lesquelles une évaluation globale des impacts des travaux sera nécessaire. Dans ce cadre, il conviendra de mettre en avant la pertinence d'un phasage des actions, permettant une réalisation progressive des travaux.

Le phasage suivant est proposé:

❑ CPER 2014- 2021 :

Il sera consacré à la réalisation des études détaillées, au lancement des procédures réglementaires et à la réalisation des actions prioritaires portant sur

- le décorsetage du lit sur le secteur médian Ancenis-Oudon,
- l'opération sur le site de Bellevue.

❑ CPER 2021- 2027 :

Il concernera principalement

- la finalisation de l'opération de Bellevue et le démantèlement des épis dans le lit à Oudon et Mauves,
- le raccourcissement des épis sur le secteur Ancenis - Saint Florent-le-Vieil,
- la réouverture des autres bras de Varades et de Saint-Georges.

3.2.5. Coût général du programme

Le coût global de l'opération s'élève à 63 M€ TTC et se décompose comme suit (l'estimation chiffrée est détaillée au § 5.1.) :

000	ETUDES				10 400 000
100	SECTEUR ANCENIS-LOUDON				9 600 000
200	SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-ANCENIS				6 400 000
300	SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-LA POINTE				1 000 000
400	SECTEUR LOUDON - MAUVES SUR LOIRE				2 300 000
500	AMENAGEMENT DE BELLEVUE				14 400 000
600	ENTRETIEN				800 000
	Divers et imprévus (15% coût de l'opération)				6 600 000
	MONTANT TOTAL DES TRAVAUX (€HT)				52 000 000
				TVA 19.6%	10 192 000
				MONTANT TOTAL TTC	62 100 000

Les dépenses sont estimées à un montant moyen annuel de 4,5 M €TTC et varient entre 1,1 M €TTC (en particulier les deux premières années du programme correspondant au lancement des études) et 11 M €TTC correspondant à la phase de réalisation de l'aménagement de Bellevue.

Planification des actions et des dépenses prévisionnelles annuelles

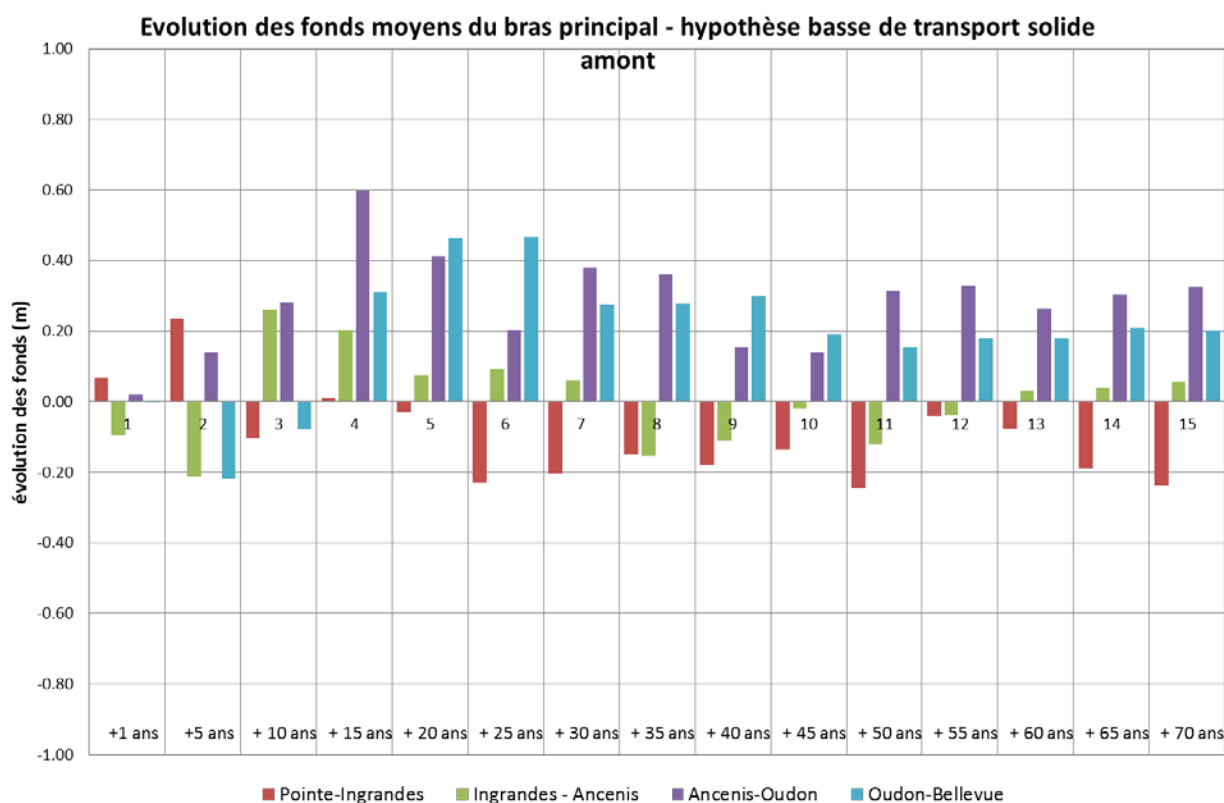
DESIGNATION	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
PROCEDURES REGLEMENTAIRES														
- Concertation et cadrage des procédures réglementaire avec les services de l'état														
- consultation des bureaux d'études														
- Réalisation des dossiers (Etude d'impact globale, Notice d'incidence Natura 2000, Espèces protégées, Sites classés, Défrichement,...)														
- Instruction administrative														
ETUDES ET MAITRISE D'ŒUVRE														
- consultation des bureaux d'études														
Secteur Oudon - Bellevue (lot 1)														
- Etude hydraulique préalable sur modèle physique et modèle mathématique														
- Maîtrise d'œuvre (Etudes)														
- dossier d'autorisation (DLE) et instruction														
- Maîtrise d'œuvre (travaux)														
Secteur Ancenis - Oudon (lot 2)														
- Maîtrise d'œuvre (Etudes)														
- dossier d'autorisation (DLE) et instruction														
- Maîtrise d'œuvre (travaux)														
Secteur amont : La Pointe - Ancenis (lot 3)														
- Maîtrise d'œuvre (Etudes)														
- dossier d'autorisation (DLE) et instruction														
- Maîtrise d'œuvre (travaux)														
EVALUATION ET SUIVI DES ACTIONS														
Mise en place du dispositif de suivi et établissement de l'état de référence														
Suivi de l'évolution du lit														
REALISATION DES TRAVAUX														
Secteur Oudon - Bellevue (lot 1)														
Aménagement de Bellevue														
Raccourcissement des épis du banc de Mauves sur Loire (amont du pont – rive droite)														
Raccourcissement des épis du banc de l'île Perdue en aval du pont de Oudon														
Amélioration locale de reconnexion des boires Chapoin et d'Anjou														
Secteur Ancenis - Oudon (lot 2)														
Réouverture du bras secondaire de l'île de Neuve Macrière (réaménagement chevette amont et curage du bras)														
Suppression des épis dans le bras principal aval (moitié aval)														
Suppression des épis dans le bras principal (moitié amont)														
Amélioration locale de reconnexion du bras des Brevets														
Rechargement du bras principal														
Reprise d'érosion sur les berges de l'île														
Secteur amont : La Pointe - Ancenis (lot 3)														
Raccourcissement des épis dans le bras principal de Loire entre les ponts de Saint Florent et d'Ancenis (13 km)														
Amélioration locale de reconnexion des bras de l'île Dalage, des Vignettes, du Bernardeau et des Babins														
Réouverture du bras de Varades (suppression des épis et aménagement de la chevette amont)														
Reouverture du bras de Saint Georges (aménagement de la chevette de l'Aireud, suppression épis aval, rétablissement épis)														
AUTRES ACTIONS (VNF)														
- Opérations de dévégétalisation dans le lit														
- Actions sur les seuils du Fresne														
ENTRETIENS														

- Maitrise d'œuvre du programme
- Réalisation des études
- Maitrise oeuvre des travaux
- Evaluation et suivi des actions
- Réalisation des travaux
- Autres action en cours
- Entretien du lit et des ouvrages

3.3. LES EFFETS TRANSITOIRES

Le graphique ci-dessous illustre l'évolution des fonds moyens en Loire selon le découpage par secteur morphologique.

Il met en évidence une évolution des fonds se faisant sur une période de plusieurs décennies. On observe ensuite une relative stabilité des fonds. Le secteur Oudon-Bellevue se caractérise par une évolution rapide des fonds sur environ 15 ans après réalisation de l'aménagement proposé.



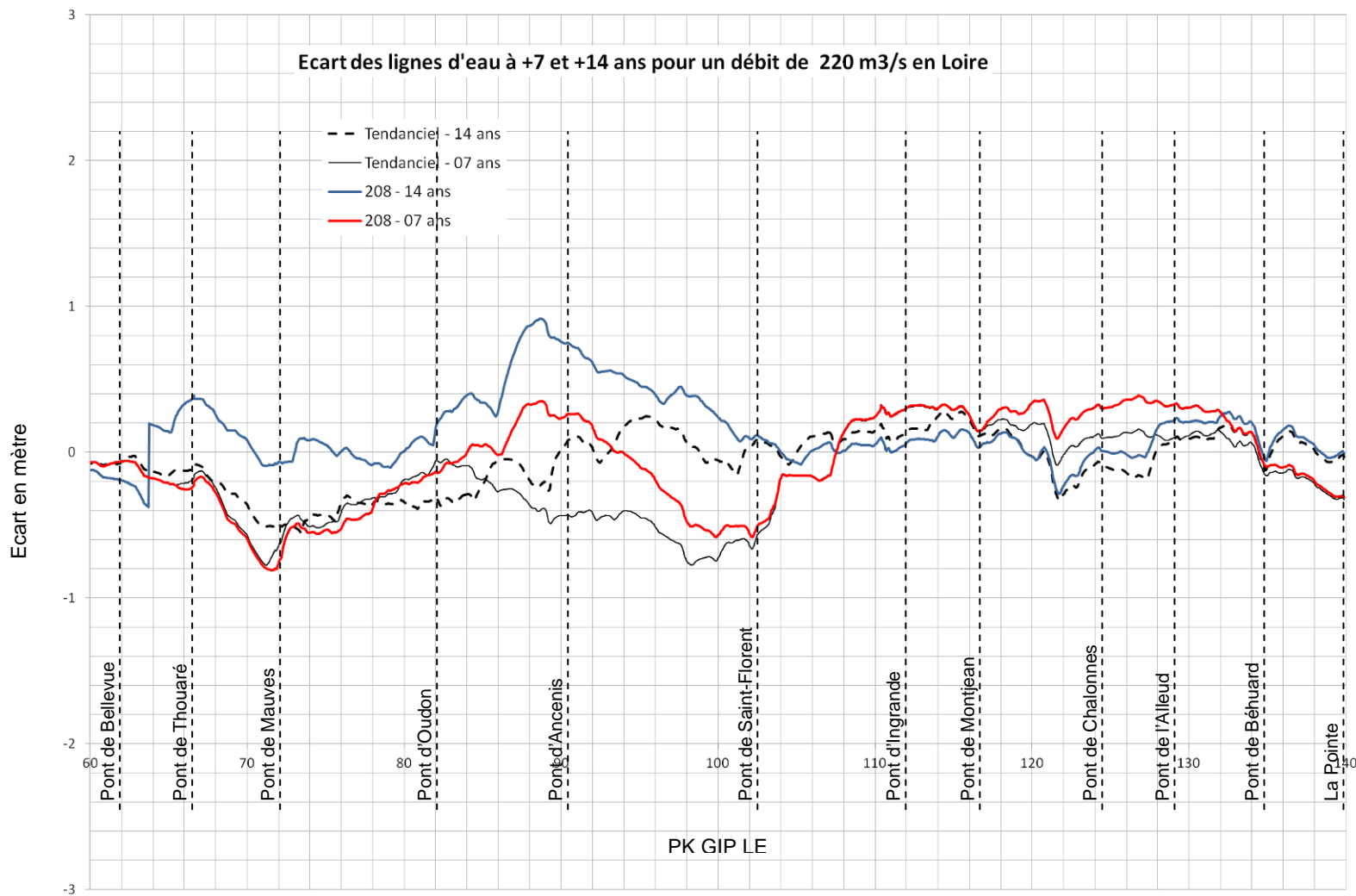
Les courbes ci-dessous montrent les résultats des simulations de l'évolution des lignes d'eau à 7 et 14 ans pour les débits de 220 m³/s, 850 m³/s et 2260 m³/s.

On observe une variation des évolutions des lignes d'eau plus importante à l'aval qu'à l'amont du fait bien évidemment de l'importance des travaux qui y sont réalisés. Ainsi les aménagements au niveau du bras principal de Neuve-Macrière génèrent un rehaussement de la ligne d'eau pouvant atteindre le mètre à l'étiage après aménagement de Bellevue pour redescendre à une vingtaine de centimètres à long terme, c'est-à-dire à l'horizon 40 ans.

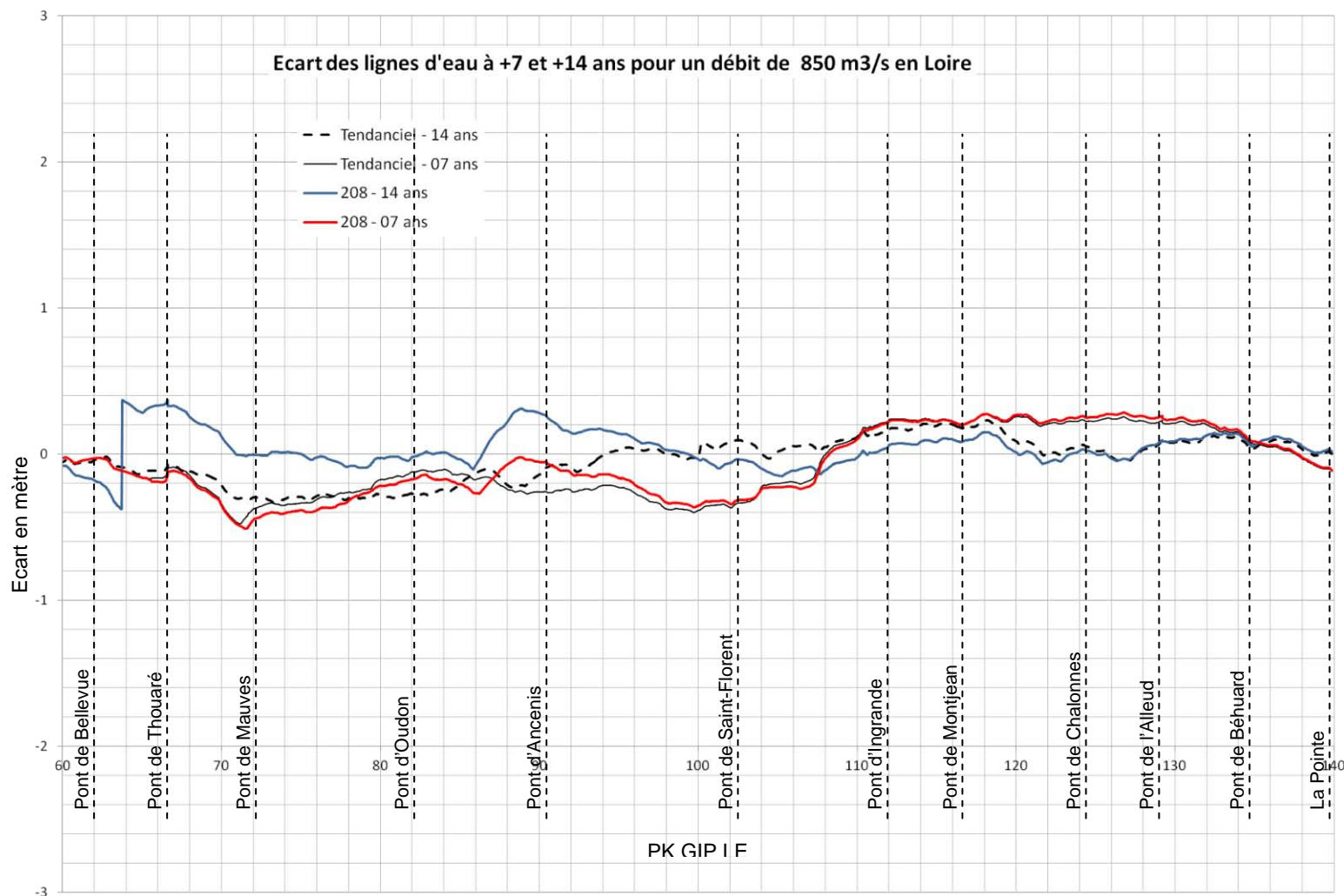
On notera également que l'évolution de la ligne d'eau directement à l'aval de l'aménagement de Bellevue risquera d'être défavorable en phase transitoire pour devenir légèrement supérieure à celle du scénario tendanciel à long terme.

On rappelle que ces évolutions intermédiaires seront fortement dépendantes de l'hydrologie réellement constatée.

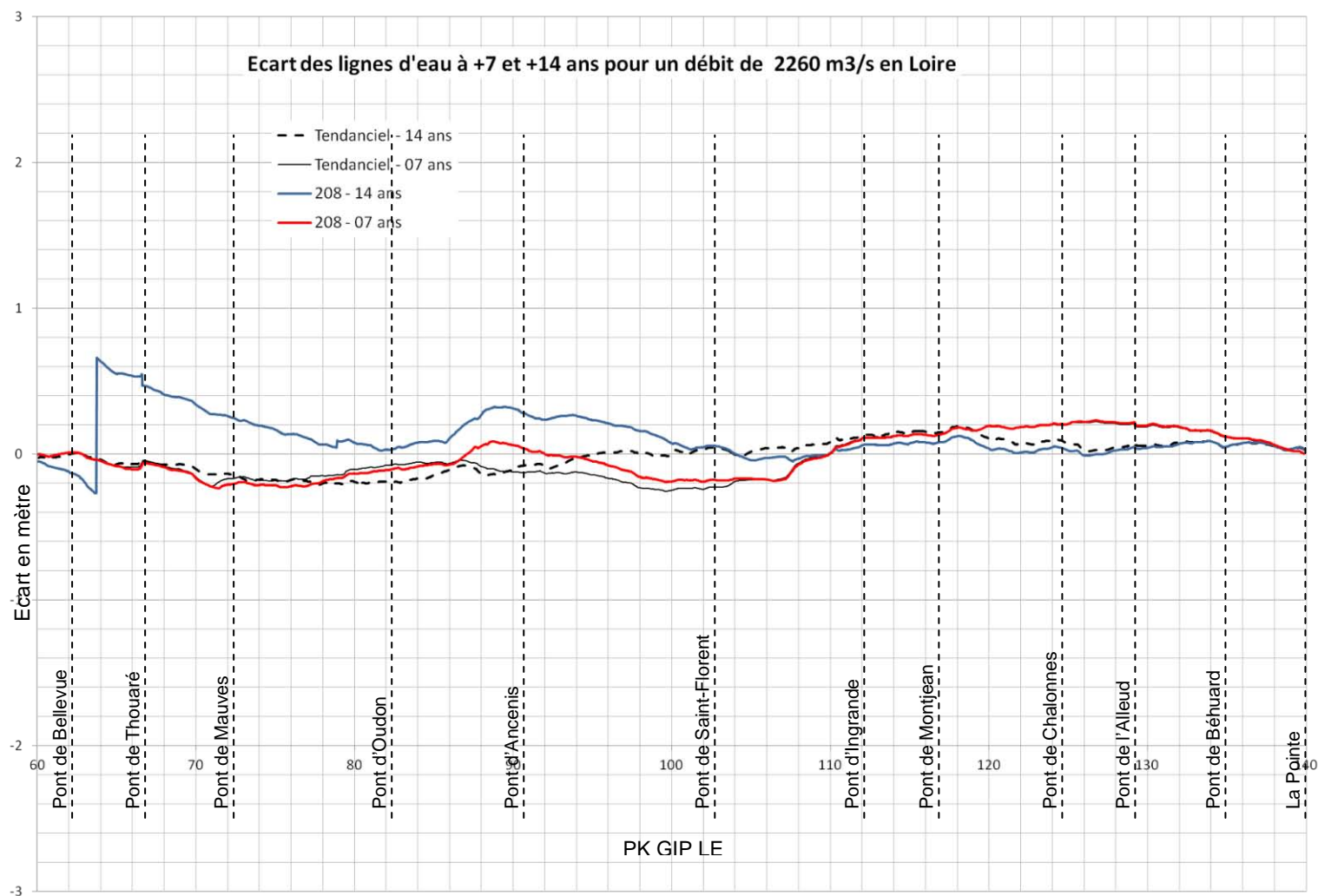
Evolution des lignes d'eau d'étiage pour le programme proposé



Evolution des lignes d'eau d'étiage pour le programme proposé



Evolution des lignes d'eau d'étiage pour le programme proposé



3.4. LES EFFETS A LONG TERME SUR LES FONDS ET LES LIGNES D'EAU

Le programme ainsi défini a été simulé par le modèle pour trois débits caractéristiques de Loire (étiage, module et crue annuelle).

Les résultats de simulation sont indiqués sur la figure ci-après pour les débits de 220 m³/s, 850 m³/s et 2260 m³/s.

Ils appellent les principales observations ci-après :

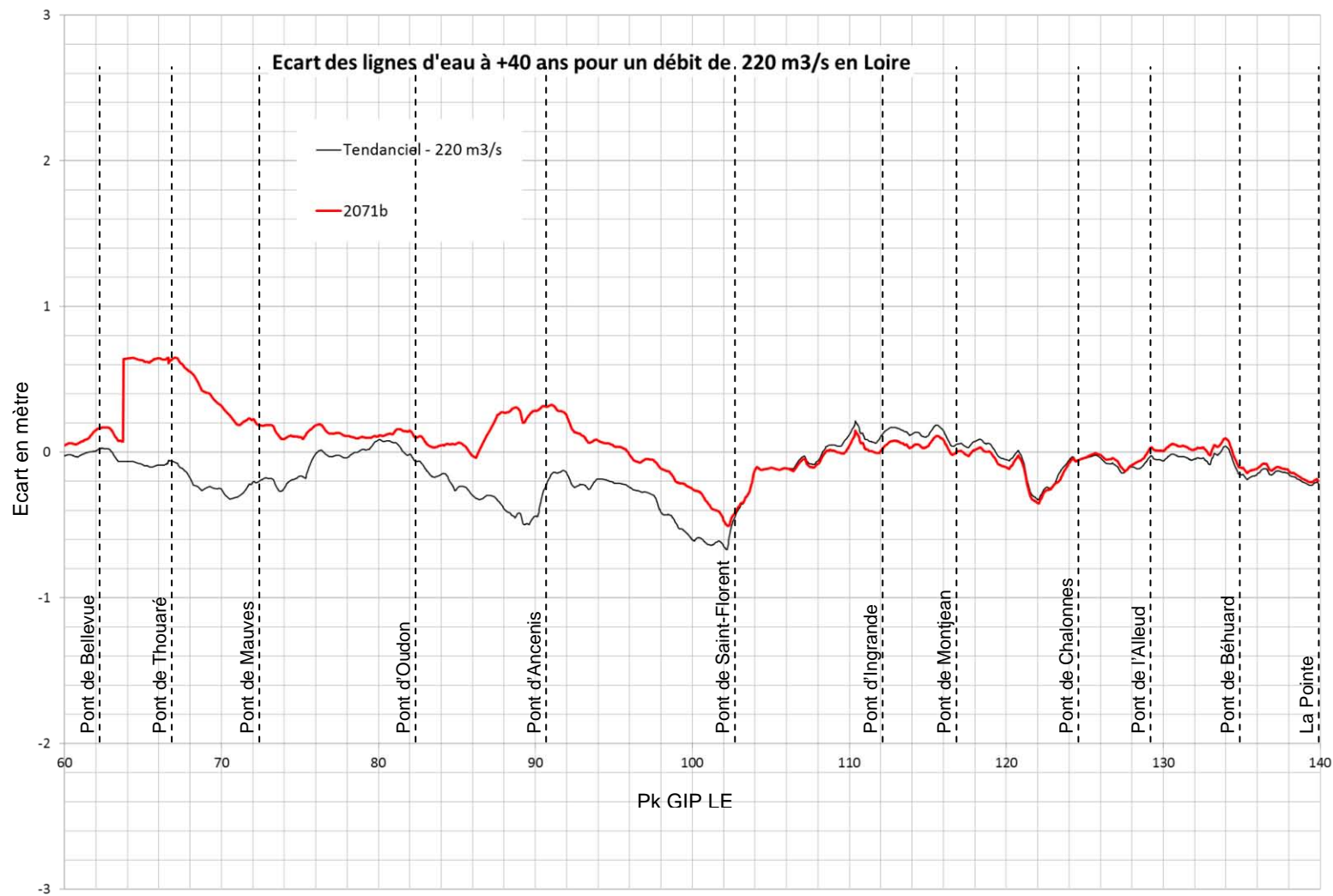
- Le relèvement de la ligne d'eau par rapport au scénario tendanciel atteint au maximum 0,70 m en aval du pont d'Ancenis pour le débit d'étiage et 0,25 m au module.
- Par rapport au scénario tendanciel, le programme d'actions autorise un relèvement de la ligne d'eau en aval de Saint-Florent-le-Vieil à l'étiage, en aval d'Ancenis au module et en aval du Marillais pour le débit de crue annuelle. Le tableau ci-dessous indique les valeurs de relèvement de la ligne d'eau pour les débits testés en quelques points caractéristiques du fleuve.

Ecart (m) entre ligne d'eau

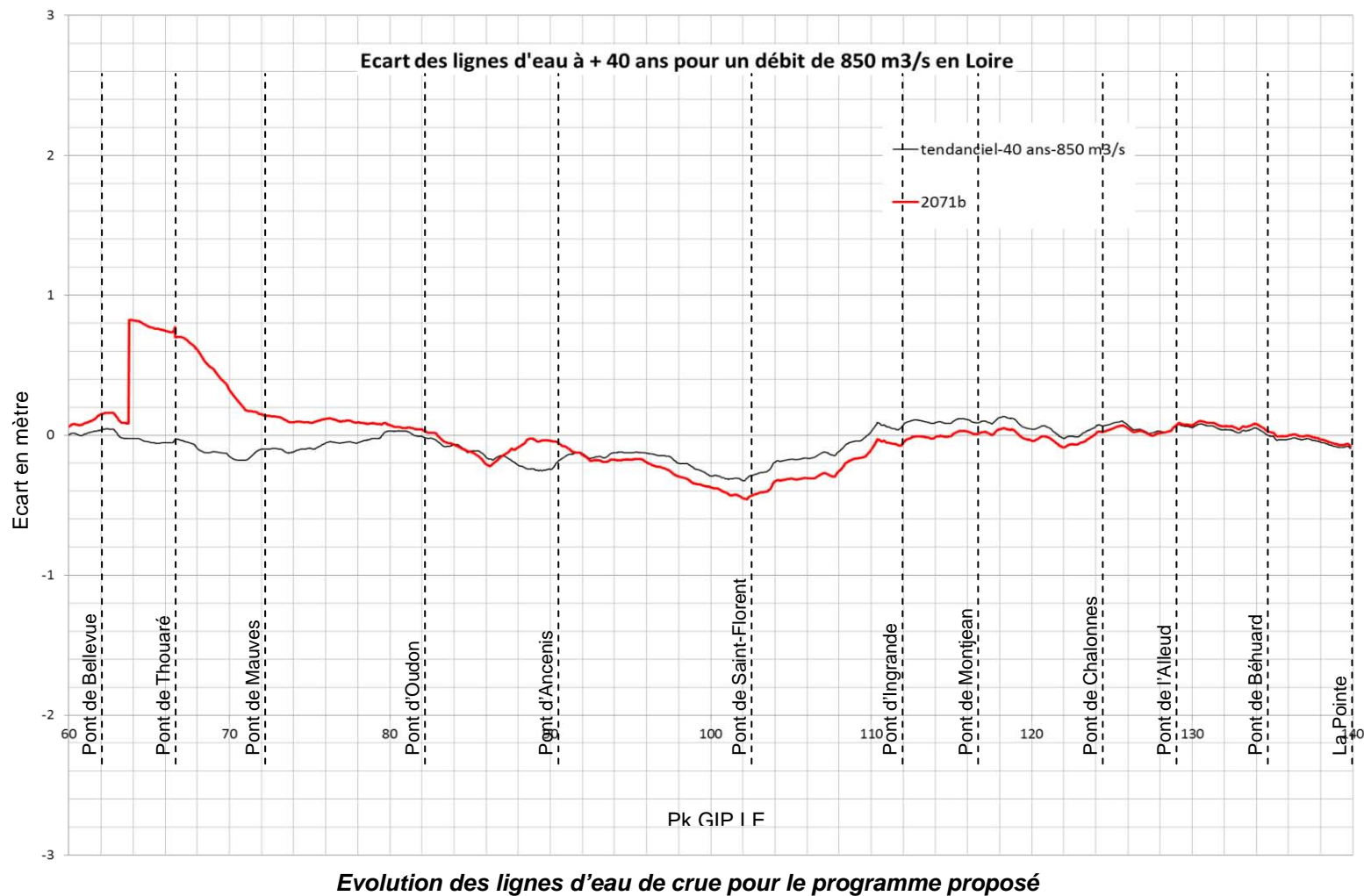
calculée pour le programme d'actions au bout de 40 ans et ligne d'eau en l'absence de travaux (situation actuelle et tendancielle après 40 ans)

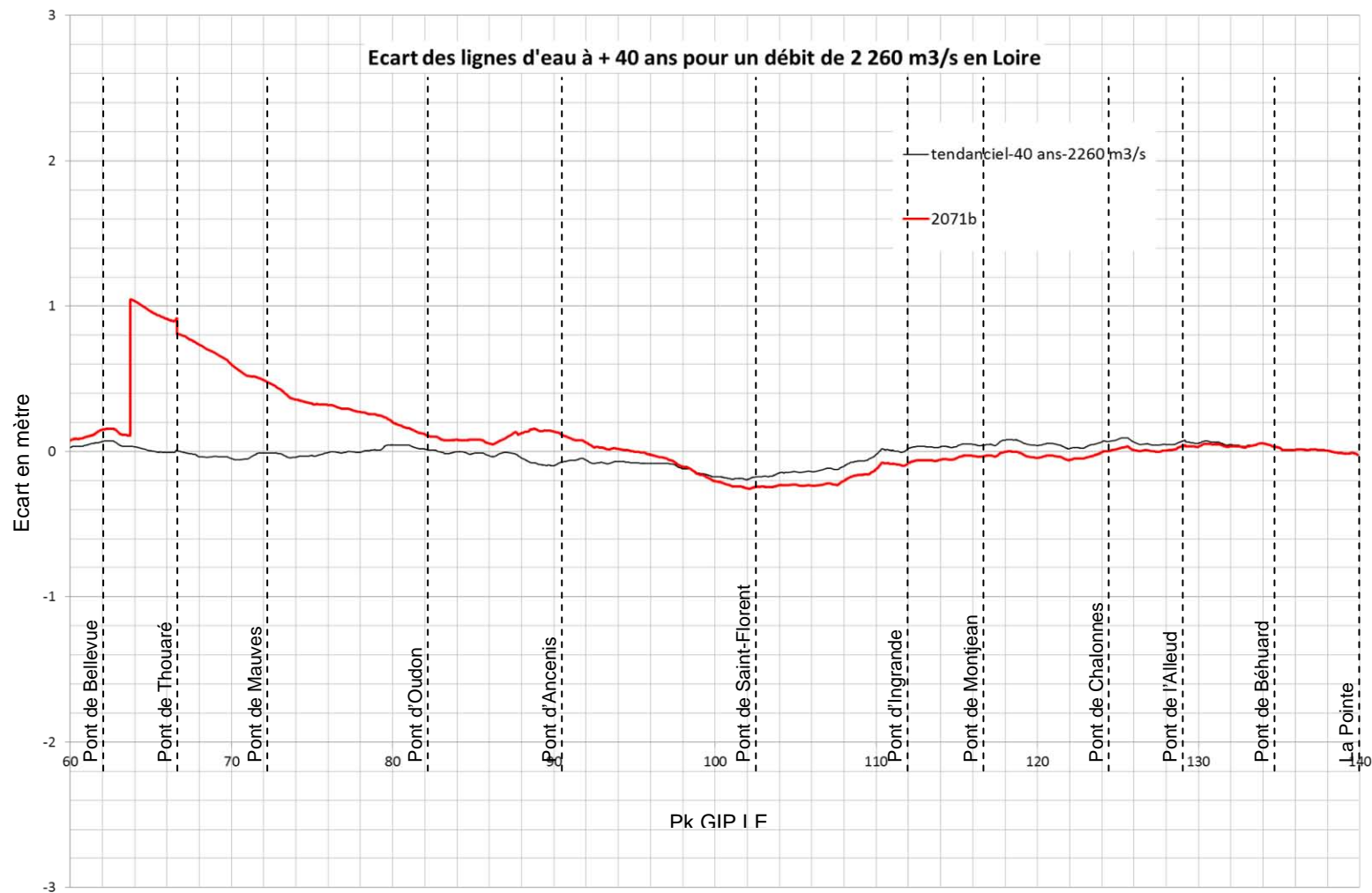
Site	PK GIP	220 m ³ /s		850 m ³ /s		2260 m ³ /s	
		Ecart/actuel	Ecart/ tendanciel	Ecart/actuel	Ecart/ tendanciel	Ecart/actuel	Ecart/ tendanciel
La Pointe	139.87	-0.20	+0.02	-0.08	+0.01	-0.02	+0.01
La Poissonnière	131.0	+0.04	+0.07	+0.09	+0.02	+0.05	-0.02
Montjean- sur-Loire	117.0	0.00	-0.06	+0.02	-0.08	-0.03	-0.08
Ingrandes	112.0	+0.01	-0.11	-0.05	-0.13	-0.08	-0.1
Saint Florent- le-Vieil	103.0	-0.37	+0.01	-0.41	-0.14	-0.24	-0.07
Le Marillais	99.0	-0.21	+0.29	-0.35	-0.11	-0.16	-0.01
Ancenis	90.50	+0.31	+0.58	-0.06	+0.13	+0.11	+0.18
Oudon	81.0	+0.14	+0.07	+0.05	+0.02	+0.16	+0.12
Mauves	72.0	+0.22	+0.43	+0.15	+0.25	+0.49	+0.49
Thouaré	66.5	+0.64	+0.72	+0.74	+0.79	+0.90	+0.9
Bellevue	62.0	+0.16	+0.15	+0.15	+0.11	+0.15	+0.08

Evolution des lignes d'eau d'été pour le programme proposé



Evolution des lignes d'eau du module pour le programme proposé





3.5. EFFET SUR LE BILAN SÉDIMENTAIRE ET L'ÉVOLUTION DES FONDS

3.5.1. Rappel du bilan sédimentaire à 40 ans sans intervention dans le lit (scénario tendanciel)

Si aucune action n'est entreprise dans le lit de la Loire, les termes du bilan sédimentaire établi après 40 ans, peut se décrire comme suit :

Ensemble du secteur d'étude

- Volume d'érosion dans le bras principal : - 1,5 Mm³
- Volume de dépôt des bancs entre les épis : + 0,15 Mm³
- Volume de dépôt dans les bras secondaires : + 1,2 Mm³

Par secteur

	Bras principal (Mm³)	Systèmes d'épis (Mm³)	Bras secondaires (Mm³)
La Pointe – Montjean-sur-Loire	- 0,4	0	+ 0,35
Montjean-sur-Loire – Saint-Florent-le-Vieil	+ 0,3	- 0,15	+ 0,15
Saint-Florent-le-Vieil – Ancenis	- 0,7	+ 0,1	0,0
Ancenis – Oudon	- 0,7	- 0,05	+ 0,5
Oudon - Bellevue	0	+ 0,25	+ 0,2
Total	- 1,5	+ 0,15	+ 1,2

Ces valeurs font ressortir un **volume d'érosion de 1,5 Mm³ de matériaux** (37 000 m³/an) qui quittent le lit principal en 40 ans. Durant la même période, un volume presque équivalent se dépose dans les bras secondaires et les systèmes d'épis (environ 33 000 m³/an).

3.5.2. Bilan sédimentaire du programme d'actions

Les termes du bilan sédimentaire peuvent se décrire comme suit après 40 ans, période au-delà de laquelle on ne note plus d'effet des actions sur l'évolution des fonds.

Par rapport au scénario tendanciel

Ensemble du secteur d'étude

- Volume de dépôt dans le bras principal : 2,2 Mm³
- Volume d'érosion des bancs entre les épis : - 2,3 Mm³
- Volume d'érosion dans les bras secondaires : - 0,15 Mm³

Par secteur

	Bras principal (Mm³)	Systèmes d'épis (Mm³)	Bras secondaires (Mm³)
La Pointe – Montjean-sur-Loire	- 0,1	0	+ 0,05
Montjean-sur-Loire – Saint Florent-le-Vieil	- 0,15	- 0,3	- 0,05
Saint-Florent-le-Vieil – Ancenis	+ 0,3	- 0,9	0,0
Ancenis – Oudon	+ 0,9	- 0,8	- 0,35
Oudon - Bellevue	+ 1,2	- 0,3	+ 0,2
Total	+ 2,2	- 2,3	- 0,15

Les résultats du bilan sédimentaire par rapport au scénario tendanciel montrent que les volumes de sables libérés par les actions de remodelage des épis et de réouverture des bras, restent en grande partie dans le bief en amont de Bellevue, contribuant ainsi à la stabilisation des fonds voire à leur relèvement.

par rapport à la situation actuelle

Ensemble du secteur d'étude

- Volume de dépôt dans le bras principal : 0,6 Mm³
- Volume d'érosion des bancs entre les épis : - 2,1 Mm³
- Volume de dépôt dans les bras secondaires : 1,1 Mm³

Par secteur

	Bras principal (Mm³)	Système d'épis (Mm³)	Bras secondaires (Mm³)
La Pointe – Montjean-sur-Loire	- 0,5	0	+ 0,4
Montjean-sur-Loire – Saint Florent-le-Vieil	+ 0,14	- 0,4	+ 0,1
Saint-Florent-le-Vieil – Ancenis	- 0,4	- 0,8	0,0
Ancenis – Oudon	+ 0,2	- 0,8	+ 0,15
Oudon - Bellevue	+ 1,2	- 0,1	+ 0,40
Total	+ 0,6	- 2,2	+ 1,1

Les résultats du bilan sédimentaire par rapport à la situation actuelle mettent en évidence un déstockage significatif des bancs entre les épis. En parallèle, les actions de décorsetage du lit permettent de déposer 0,6Mm³ de sable dans le bras principal. Les résultats du modèle mettent en évidence l'absence d'impact des actions sur le bilan sédimentaire dans les bras secondaires. Ces résultats traduisent la difficulté à remobiliser naturellement les matériaux dans ces bras par simple intervention sur les chevrettes et justifient des actions mécaniques comme la réalisation de chenaux pilotes.

3.5.3. Evolution des fonds

Le bilan sédimentaire décrit précédemment se traduit sur l'évolution des fonds de la façon suivante :

Ecart situation tendancielle (+40 ans) par rapport à la situation actuelle

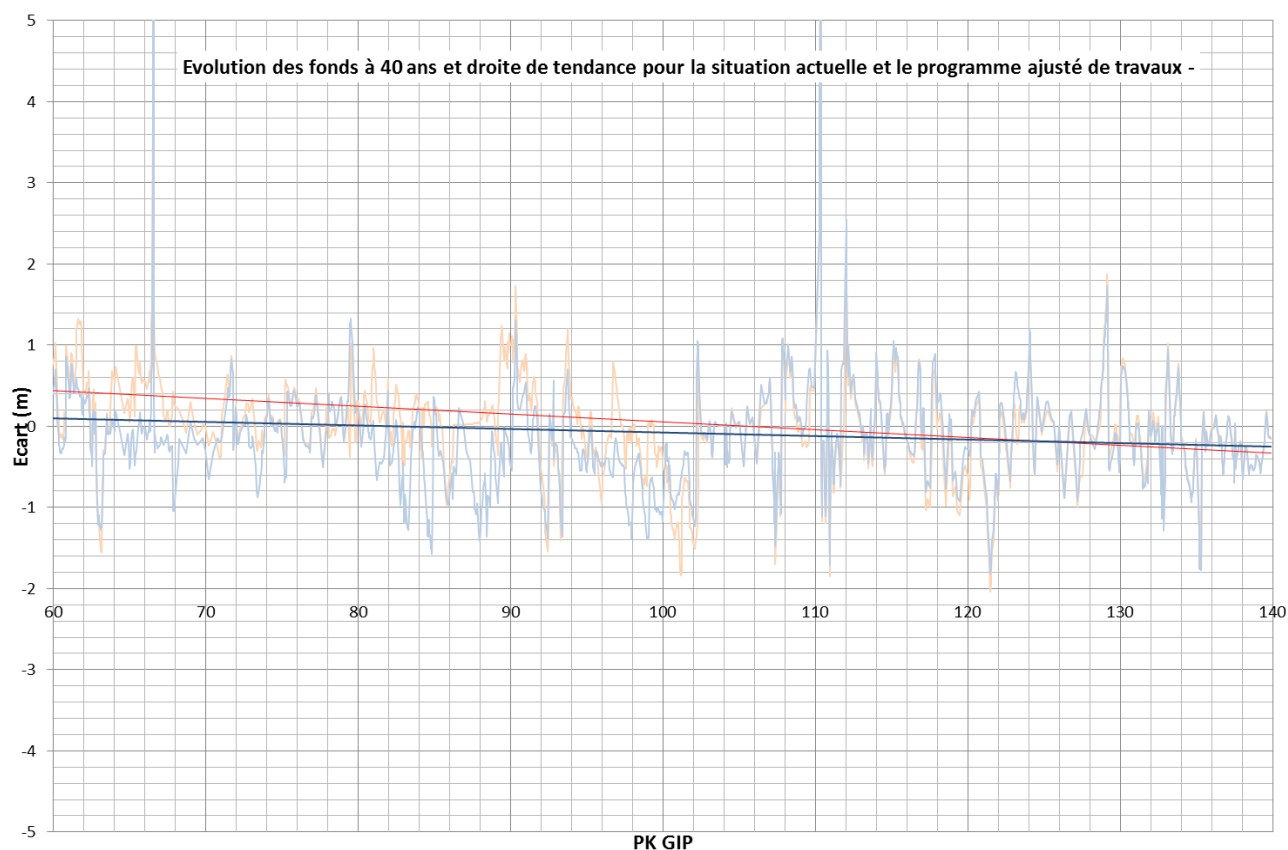
	Ecart/situation actuelle (cm)⁴
La Pointe – Montjean-sur-Loire	- 5
Montjean-sur-Loire – Saint Florent-le-Vieil	0
Saint-Florent-le-Vieil – Ancenis	- 40
Ancenis – Oudon	- 40
Oudon - Bellevue	- 10

Ecart situation après travaux au bout de 40 ans par rapport aux situations tendancielle et actuelle

	Ecart/situation actuelle (cm)¹	Ecart/scénario tendanciel (cm)¹
La Pointe – Montjean-sur-Loire	- 15	- 15
Montjean-sur-Loire – Saint Florent-le-Vieil	- 10	- 10
Saint-Florent-le-Vieil – Ancenis	- 35	+ 10
Ancenis – Oudon	+ 15	+ 60
Oudon - Bellevue	+ 30	+ 40

Le profil en long montrant la tendance d'évolution des fonds est indiqué sur la figure ci-après (situation actuelle en bleu, programme en rouge).

⁴ (Valeurs indicatives représentatives des tendances à l'échelle sectorielle mais ne constituant pas la moyenne exacte des écarts constatés)



Le programme d'actions favorise un réengrèvement des fonds depuis l'aval vers l'amont. En amont de Saint-Florent-le-Vieil, l'absence d'actions significatives dans le bras principal limite les évolutions qui seront de toute manière peu marquées (cf. scénario tendanciel).

4. EVALUATION DU PROGRAMME D' ACTIONS

4.1. MILIEU PHYSIQUE

4.1.1. Ligne d'eau

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean-sur-Loire – Saint-Florent	La pointe – Monjean-sur-Loire
Ligne d'eau (/tendanciel)	de + 1 m à l'étiage à + 20 cm en crue (fonction de l'ouvrage à optimiser)	Étiage : + 20 à + 70 cm Module : + 0 à + 25 cm	Étiage : + 50 à + 20 cm Module : 0 à -10 cm	Etiage : ± 5 cm Module : -10 cm	Etiage : ± 5 cm Module : - 10 à 0 cm

Les résultats obtenus sur les lignes d'eau sont en deçà des attentes qui avaient été exprimées par le groupe de travail acteurs-usagers et qui visaient un relèvement de la ligne d'eau à 850 m³/s, de + 1,30 m, pour la restauration des fonctions écologiques.

Le réengrèvement du bras principal sera en effet modéré et n'entraînera pas systématiquement une remontée des lignes d'eau pour les principales causes ci-après et qui ont été détaillées dans le rapport de phase 1 :

- le décorsetage du bras principal (suppression des épis) va dans un premier temps libérer des matériaux et donc provoquer une augmentation des sections et donc un étalement des écoulements et une baisse ponctuelle des lignes d'eau. Le réengrèvement attendu du lit à long terme ne sera pas systématiquement suffisant pour entraîner une remontée importante des lignes d'eau ;
- la réouverture des bras secondaires entrainera une augmentation de la capacité hydraulique du lit et donc limitera les effets sur la remontée des lignes d'eau en particulier pour le module et les débits de hautes eaux.

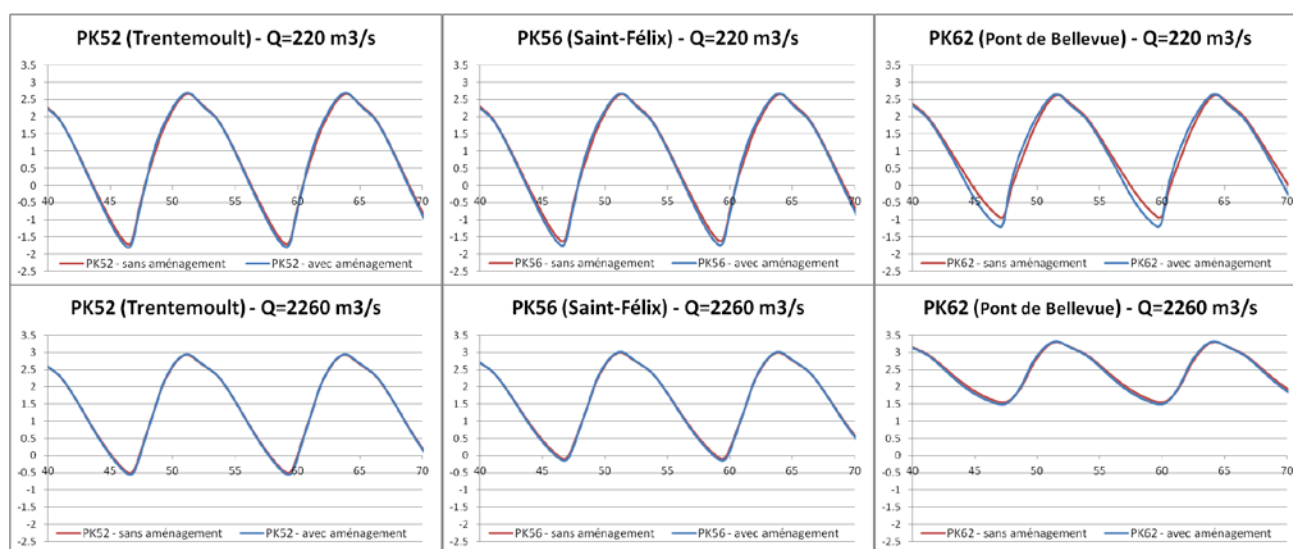
Les résultats issus du modèle sont à prendre néanmoins avec une certaine prudence. En effet, la ligne d'eau est calculée en considérant les écoulements répartis sur une largeur au miroir moyenne obtenue après décorsetage du lit et évolution des fonds. La réalité sera plus complexe. Un ou plusieurs bras d'étiage devraient se reformer avec des hauteurs d'eau en étiage sans doute supérieures à la hauteur d'eau donnée par les calculs (du fait de l'hétérogénéité du nouveau chenal que ne peut pas rendre compte le modèle).

Par rapport au scénario tendanciel, le programme d'actions autorise un relèvement de la ligne d'eau en aval de Saint-Florent-le-Vieil à l'étiage, en aval d'Ancenis au module et en aval du Marillais pour le débit de crue annuelle. Le tableau au paragraphe 4.2 indique les valeurs de relèvement de la ligne d'eau pour les débits testés en quelques points caractéristiques du fleuve.

En dehors de la zone l'influence de l'aménagement de Bellevue, le relèvement de la ligne d'eau par rapport au scénario tendanciel atteint au maximum + 0,70 m en aval du pont d'Ancenis et décroît jusqu'à + 0,20 m à l'aval de Saint-Florent-le-Vieil pour le débit d'étiage et de + 0,25 m à - 0,10 m au module.

4.1.2. Marée

L'aménagement de Bellevue étant situé en zone marnante, son influence sur la propagation de la marée a été testée avec le modèle hydraulique.



Impact de l'aménagement de Bellevue sur la propagation de la marée à l'aval en étiage et en crue

Les calculs hydrauliques mettent en évidence un faible effet de l'aménagement sur les caractéristiques de la marée (abaissement des basses mers de l'ordre de 10 cm à Nantes, à l'étiage). Il convient également de vérifier à l'aide du modèle hydrosédimentaire en 3D, l'effet de l'aménagement sur la salinité et la turbidité dans l'estuaire.

4.1.3. Morphologie

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean – Saint-Florent	La pointe – Montjean-sur-Loire
Morphologie	+ 30 ha de largeur de bande active (14 % de 290 ha)	+ 160 ha de largeur de bande active (103 % de 155 ha) + 90 ha du bras de l'île de Neuve-Macrière	+ 70 ha de largeur de bande active (63 % de 110 ha)	+ 75ha dans le bras de Varades (112 % de 67 ha)	+ 320 ha du bras de Saint-Georges

Les résultats du bilan sédimentaire par rapport au scénario tendanciel montrent que les volumes de sables libérés par les actions de remodelage des épis et de réouverture des bras, restent en grande partie dans le bief en amont de Bellevue, contribuant ainsi à la stabilisation des fonds voire à leur relèvement.

Le programme d'actions favorise un réengrèvement des fonds depuis l'aval vers l'amont. En amont de Saint-Florent-le-Vieil, l'absence d'actions significatives dans le bras principal limite les évolutions qui seront de toute manière peu marquées (cf. scénario tendanciel).

Le décorsetage du lit rendra au fleuve un espace de liberté permettant la formation de bancs de sable mobiles et favorisant la diversification des écoulements et des faciès sédimentaires. La largeur de bande active rendue mobile au droit des systèmes d'épis passe ainsi localement de 130 de mètre à plus de 300 mètres au droit d'Ancenis. **Au total c'est une surface de près de 180 ha qui sera rendue au fleuve entre Oudon et Le Marillais, soit 70% de la surface actuelle sur cette portion de bief**, auxquels s'ajouteront près de 80 ha pour le traitement des bancs de Mauves et de Oudon et les 90 ha du bras de l'île de Neuve-Macrière.

Un test de sensibilité sur l'évolution de la bathymétrie aval a été réalisé avec le modèle hydro-sédimentaire. Le résultat montre qu'il n'y a pas d'impact visible de l'évolution des fonds de l'estuaire, et à fortiori des dragages dans la zone d'évitage, sur la morphologie de la Loire en amont de Bellevue après aménagement.

Sur certains secteurs, l'élargissement de la bande active par remodelage des épis va permettre d'abaisser les vitesses d'écoulement au droit de certains tronçons de remblai ferroviaire adossés à des berges fragiles. De ce fait, il serait intéressant d'interroger RFF sur ses attentes, dans le cadre de la phase d'optimisation de l'aménagement.

4.2. FONCTIONS ET USAGES

4.2.1. Navigation

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean – Saint-Florent	La pointe – Montjean-sur-Loire
Navigation	<ul style="list-style-type: none"> Les hauteurs d'eau resteront supérieures à 1m, valeur seuil souhaitée par le groupe de travail acteurs-usagers La mobilité des bancs entre Oudon et Saint-Florent-le-Vieil nécessitera un suivi plus fréquent de l'évolution des fonds et des modifications du tracé du chenal de navigation à l'étiage 				

La présence de hauts fonds limite les possibilités de navigation à l'étiage en fonction du tirant d'eau des bateaux. Les secteurs où la navigation est la plus contrainte se trouvent en position médiane, d'Oudon à Saint-Florent-le-Vieil, et à l'amont, de Chalonnnes à La Pointe.

Comme le montre la figure de l'évolution des lignes d'eau d'étiage au paragraphe 4.2, la baisse locale des niveaux d'eau d'étiage par rapport au tendanciel ne dépasse pas les 10 cm. En intégrant l'évolution des fonds, les profondeurs d'eau disponibles peuvent fortement évoluer du fait du comblement de certaines fosses. Sur les secteurs identifiés comme contraints pour la navigation, les profondeurs disponibles à l'étiage ne sont pas modifiées à l'amont et peuvent localement être améliorées à l'aval de Saint-Florent-le-Vieil. En amont d'Oudon, les hauteurs d'eau pourraient localement diminuer de 20 cm **sans toutefois être inférieures à 1 m, valeur seuil souhaitée par le groupe de travail acteurs-usagers**, pendant 75% de la période estivale.

A noter que la mobilité des bancs entre Oudon et Saint-Florent-le-Vieil nécessitera un suivi plus fréquent de l'évolution des fonds pour le balisage du chenal de navigation à l'étiage.

Compte tenu de l'aménagement prévu sur le site de Bellevue, un balisage spécifique du pont de Bellevue et de l'ouvrage sera à prévoir.

4.2.2. Crue

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean – Saint-Florent	La pointe – Montjean-sur-Loire
Crue	<ul style="list-style-type: none"> Impact modéré sur les niveaux de crue et conditionné par l'optimisation de l'aménagement de Bellevue en phase de conception détaillée : + 20 cm pour un débit de Loire centennal ; niveaux de crue inférieurs à la crue de référence de 1910 				

L'impact sur les crues est surtout lié à la perte de charge générée par l'aménagement de Bellevue. **Cet impact restera modéré** car après optimisation, l'aménagement produit un relèvement des niveaux de crue en amont

inférieur à 35 cm pour une crue annuelle et de l'ordre de 20 cm pour un débit de crue de type centennale, ce qui donne des niveaux de crue inférieurs à la crue de référence de 1910.

On pourra chercher à réduire encore ces valeurs en phase de conception détaillée.

4.2.3. Environnement

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean-sur-Loire – Saint-Florent	La pointe – Montjean-sur-Loire
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de l'inondabilité potentielle des boires de la Pinsonnière et de la Bridonnière +6ha en crue (+23%) - L'aménagement de Bellevue intègre les recommandations de Larinier et Steinbach (2003) pour assurer une bonne franchissabilité piscicole 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la continuité hydraulique du bras de l'île de Neuve-Macrière (90ha) - Amélioration de l'inondabilité potentiel des boires Patache et de l'île Mouchet +1.5ha en crue (+12%) - Amélioration locale de reconnexion des bras des Brevets et de l'île Delage (45ha) 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration locale de reconnexion des bras des Vinettes, du Bernardeau et des Babins (57ha) 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des écoulements dans le bras de Varades 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des écoulements dans le bras de Saint-Georges

Le programme d'actions vient renaturer des habitats qui, du fait de l'incision du lit, s'étaient continentalisés : développement de la végétation sur les grèves, dans les bras secondaires. Il vient modifier sensiblement cette trajectoire du bief et aura une incidence sur l'évolution des habitats. Si les habitats du lit mineur (grèves sableuses) vont ainsi être favorisés, certains habitats qui se sont développés avec l'incision du lit vont voir leurs surfaces se réduire avec des incidences potentielles pour certaines espèces qui se sont implantées (rôle des genêts notamment).

Pour apprécier les effets positifs ou négatifs de ces évolutions, il sera nécessaire de réaliser un bilan écologique global, conduit à l'échelle du bief et tenant compte des trajectoires des milieux et espèces, intégrant les gains en termes de fonctionnement hydromorphologique et leur incidence pour les milieux du lit mineur. Si l'impact du programme sur certains habitats ou espèces majeurs apparaît comme trop préjudiciable pour certaines espèces, il pourra être envisagé d'adapter certaines actions. Les épis présents sur la grève St Simon à Mauves pourraient par exemple être moins raccourcis que prévu pour limiter la perte de surface végétalisée.

Le bilan écologique global pourra être complété par des évaluations locales, intégrant les actions du programme « annexes fluviales ».

Par ailleurs, si le programme permet d'améliorer les lignes d'eau par rapport au scénario tendanciel, il n'améliorera pas, ou peu, la connectivité des annexes hydrauliques en amont d'Oudon. Ainsi les surfaces potentiellement en eau resteront sensiblement les mêmes.

- **Les bras secondaires**

La programmation proposée **améliorera la continuité hydraulique du bras de l'île Neuve-Macrière** actuellement déconnecté à l'étiage. L'augmentation des débits attendus dans ce bras et sa fréquence de mise en eau se traduira en particulier par une plus grande diversité des habitats aquatiques et de meilleurs échanges biologiques avec le bras principal. Ce phénomène concerne également les bras des Brevets, de l'île Delage, des Vinettes, du Bernardeau et des Babins, mais dans une moindre mesure puisque seule leur connectivité au lit mineur sera améliorée. Il faudra une évaluation de l'influence d'une reprise des écoulements dans ces bras sur les habitats locaux pour faire une évaluation a posteriori.

Enfin, l'amélioration des écoulements dans les bras de Varades et de Saint-Georges aura un impact difficile à quantifier. L'influence de cette amélioration sur les habitats et les espèces floro-faunistiques dépendra très fortement des périodes concernées (en relation avec le cycle biologique des espèces),

- **Les boires**

Seules les boires en amont de Bellevue et aux abords de l'île Neuve-Macrière, vont profiter d'une amélioration de la connectivité avec la Loire par une augmentation significative des niveaux d'eau (entre 80 et 40 cm à 850 m³/s aval du PK 70). On n'atteint toutefois pas les attentes initiales du groupe de travail, à savoir 1,3 m minimum de remontée des niveaux d'eau pour 850 m³/s. Entre cette hausse modérée et un effet très localisé, l'influence du projet sur la reconnectivité des annexes hydrauliques est donc modeste. Sans travaux spécifiques, ces annexes hydrauliques continueront à présenter les mêmes dysfonctionnements environnementaux liés aux mauvaises connections hydrauliques, à l'exception de quelques boires et bras secondaires présentés ci-après.

S'agissant des boires abords de l'île Neuve-Macrière :

Surface potentielle en eau (en ha)						
Nom de la boire	module (850 m3/s)			crue (2260 m3/s)		
	Tendanciel	Programme	Gain	Tendanciel	Programme	Gain
Boire de la Bridonnière	0.0	0.0	0.0	26.2	31.0	5.0
Boire de la Patache	0.8	0.8	0.0	9.3	9.7	0.4
Boire de l'île Mouchet	0.0	0.0	0.0	3.0	4.1	1.1

Les deux premières boires présentent un intérêt majeur pour la reproduction du brochet. Si cette fréquence de connexion est améliorée, cela signifie que les géniteurs auront accès plus facilement aux zones de pontes, qu'ils pourront également sortir de la boire après la fraie, et que les juvéniles auront plus de chances de retrouver le lit de la Loire en fin de période de maturation. Notons toutefois que la boire de la Patache est actuellement perchée à 1,5 m au-dessus des niveaux d'eau de Loire pour un débit de 850 m³/s. L'augmentation de la fréquence de connexion devrait être faible sans travaux associés pour cette boire. La boire de la Bridonnière est déjà alimentée au débit de 850 m³/s, les travaux ne feront qu'améliorer la situation existante.

- **Le lit principal**

Dans le lit principal, les actions menées sur les épis permettront d'augmenter l'espace de liberté du fleuve de 70% entre Oudon et Saint-Florent-le-Vieil. Le méandrage du lit d'étiage dans cet espace libéré devrait permettre la reconstitution de mosaïques d'habitats plus hétérogènes et plus intéressantes. Cette mosaïque peut permettre une meilleure diversité locale des espèces benthiques et démersales, dont les poissons. La bonne qualité écologique actuelle de la Loire laisse cependant penser que cette amélioration des conditions d'habitats sera difficile à évaluer : on assure principalement une meilleure résilience des milieux aquatiques.

La restauration d'un milieu plus dynamique entraînera la formation d'habitats plus favorables aux espèces d'intérêt communautaire. Notamment, l'avifaune nicheuse (sterne, petit gravelot) y trouvera des grèves sableuses plus isolées.

- **La libre circulation des poissons**

Dans la partie estuarienne aval, la migration de la civelle se fait principalement par un comportement de nage passive (migration portée) où l'individu profite des courants de flot pour progresser en évoluant dans les masses d'eau. Le secteur de Bellevue constitue d'ores et déjà la limite de ce comportement passif : à partir de ce point et sur le reste de la zone d'étude, les civelles commencent alors une migration active et nagée pour leur permettre une colonisation progressive des masses d'eau continentales. Elles se concentrent alors préférentiellement en berge et profitent des rugosités qui limitent ou annulent le courant et qui fournissent des abris hydrauliques. Dans ce cadre, l'aménagement de Bellevue, qui augmente ces rugosités en berge et au fond, sans créer de seuil hydraulique, ne devrait pas avoir d'influence sur la migration. Si les équipements mis en place sont en enrochements non jointifs, cela permettra même d'augmenter les abris hydrauliques. En raison des augmentations significatives de vitesses de courant du lit principal, il est toutefois possible que ce secteur participe à retarder la migration, créant artificiellement une augmentation des densités locales en civelles. Dans ces conditions, et afin de préserver la ressource, il faudra mettre en place une réglementation de la pêche civelière sur ce secteur visant à éviter la surpêche. Si aucune accumulation de civelle n'est notée, cette réglementation n'aura pas lieu d'être. Dans tous les cas, un suivi régulier des densités de civelles sur les premières années de mise en œuvre devra être fait.

Les recommandations faites par Larinier et Steinbach en 2003 sur l'impact possible d'ouvrages à perte de charge peuvent être reprises en partie ici pour l'aménagement proposé. **Pour assurer une bonne franchissabilité de l'aménagement, une grande partie du débit d'étiage sera concentrée dans le lit vif afin de limiter les débits dans les parties latérales et y rencontrer des vitesses « acceptables ». Pour les débits plus importants, la franchissabilité sera favorisée par le recouvrement par les eaux de l'aménagement, diminuant ainsi fortement la perte de charge, qui demeurera très éloignée des conditions critiques** (LARINIER, 2003).

En première approche, l'aménagement étudié répond à ces recommandations et est plutôt adapté aux enjeux de migration mais il faudra bien intégrer les exigences de la civelle, considérée comme « dimensionnante », lors de sa conception détaillée.

Pour le saumon d'atlantique dont le rythme d'activité est largement basé sur le cycle tidal, les modélisations montrent que si l'aménagement de Bellevue ne modifie pas le phénomène de renverse des courants, il peut augmenter localement les vitesses notamment lorsqu'il n'y a plus de renverse de courant (à partir de 1000 m³/s) augmentant localement les vitesses, qui passeront ainsi, pour un débit de 2260 m³/s, de 1,25 à 1,6 m/s au flot et de 2,3 à 2,6 m/s au jusant. L'aménagement va vraisemblablement modifier localement le comportement du

saumon et sa répartition selon les phases de la marée mais pas sa capacité de franchissement, qui se fera plus ou moins rapidement sur le secteur.

De manière générale, une bonne articulation du programme d'action sur le lit avec d'autres annexes hydrauliques comme la boire du Cellier, les boires de la Varenne, le bras de l'île Delage, le bras du Bernardeau, etc sera également à rechercher. En particulier, il faudra veiller à contrôler la quantité de sédiments entrant dans les boires et ne pas dégrader les conditions d'écoulement rencontrées actuellement dans ces annexes.

4.2.4. Accès aux îles où des usages ont été identifiés

Le tableau ci-dessous recense les accès aux îles potentiellement impactés par les travaux et les usages identifiés sur ces îles.

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean-sur-Loire – Saint-Florent	La pointe – Montjean-sur-Loire
Accès aux îles où des usages ont été identifiés	<p>Ile Moron et île Dorelle</p> <p>Usage agricole, habitations, loisir</p> <p>Concernée par la reconnexion des Boires Chapoin et St Nicolas</p>	<p>Ile Neuve et île Macrière</p> <p>Usage agricole</p> <p>Concernée par la suppression du système épis et de chevrettes du bras de Neuve-Macrière</p>	-	<p>Ile Moquart</p> <p>Usage agricole, habitations</p> <p>concernée par le rétablissement du transit sédimentaire du bras de Varades et le réaménagement de la chevette amont du bras de Varades</p>	<p>Ile Monsieur, île d'Ardessais, île Pouzet, île aux Prunes, île de Montravers, île Neuve et île Touchais</p> <p>Usage agricole, habitations</p> <p>l'ouverture du Bras de Saint-Georges aura une influence sur leurs accès</p>

Les usages identifiés en première analyse par VNF sur les îles concernées par la réouverture des bras secondaires devront faire l'objet d'une analyse plus fine afin de vérifier s'il y a besoin de maintenir les accès aux îles pour l'activité agricole notamment et définir les modalités d'accès.

4.3. FAISABILITÉ

4.3.1. Procédures réglementaires

Les actions préconisées tentent de répondre aux mesures actées dans le SDAGE Loire-Bretagne :

- restaurer la connectivité latérale,
- restaurer la morphologie du lit mineur pour restaurer les habitats aquatiques,
- restaurer la fonctionnalité des rivières et leurs annexes,

- relever la ligne d'eau de la Loire à l'étiage...

L'opération sera pour autant soumise à de nombreuses procédures réglementaires principalement issues des codes de l'urbanisme de l'environnement, du patrimoine et du code forestier.

Compte tenu de la nature des travaux, le programme sera soumis à l'avis de l'autorité environnementale (DREAL de Bassin Loire Bretagne) et aux principales dispositions suivantes :

- La concertation au titre de l'article L300-2 du code de l'Urbanisme (opération d'aménagement susceptible de modifier le cadre de vie, l'activité économique et réalisée à l'initiative d'organismes publics).
- Le décret n° 2011-2019 du 29 décembre 2011 portant réforme des études d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements. Ce décret prévoit que les travaux de reprofilage et de régularisation des cours d'eau sont soumis aux études d'impact quel que soit le montant des travaux. En première analyse, et à la lecture de l'article R.122-2 du code de l'environnement et de son annexe, une étude d'impact semble nécessaire dans la mesure où une partie du profil en travers de la Loire est modifié avec des zones approfondies. Cela renvoie à l'alinéa 21 de cette annexe :
21° Extraction de minéraux ou sédiments par dragage marin ou retrait de matériaux lié au curage d'un cours d'eau si les travaux sont listés à l'article R. 214-1 du même code et précisant les travaux soumis à autorisation.

Compte tenu de l'impact global attendu sur l'hydrosystème entre La Pointe et Nantes, une étude d'impact portant sur l'ensemble des actions proposées sera très certainement nécessaire, même si la réalisation du programme complet est étalée sur 12 ans.

La réalisation de l'étude d'impact devra s'appuyer sur de nombreuses investigations de terrain dont la réalisation des inventaires faune/flore approfondis répartis sur les 4 saisons. Il convient à ce stade de prévoir un délai de 1 an minimum pour réaliser les études et un délai de 1 à 2 an pour l'instruction administrative des dossiers, l'(es) enquête(s) publique(s), et l'obtention des arrêtés d'utilité publique et d'autorisation de travaux.

- L'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique nécessaire pour les acquisitions foncières éventuelles (article R 11-4 du code de l'expropriation pour utilité publique) et le code de l'environnement (article L123-1). L'enquête nécessite la constitution au préalable du dossier d'enquête préalable à la Déclaration d'Utilité Publique et des dossiers de mise en compatibilité des PLU ;
- La loi sur l'eau (les travaux sont soumis au régime d'autorisation conformément à la nomenclature de l'article R214-1 du code de l'environnement) ;
- La déclaration d'intérêt général (article L211-7 du code de l'environnement). Elle permet d'entreprendre des travaux dans les propriétés privées, présentant un caractère d'intérêt général et avec de l'argent public.
- Dans le cadre de la Loi n°1930-05-02 du 2 mai 1930 ayant pour objet de réorganiser la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque, la commission des sites sera potentiellement amenée à donner un avis sur les travaux se situant en limite de site classé (Parc du Château de Juigné (Ancenis) : au bord de la Loire ; de Chalonnes au Ponts de Cé : sites classés sur tout le cours de la Loire).

En marge de ces procédures, il conviendra également de tenir compte du classement de la vallée et de mesures de protections s'y rapportant (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

(ZNIEFF), Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO), Arrêtés préfectoraux de Protection de Biotope (APB), zone Natura 2000, paysages protégés). Des dossiers spécifiques seront à prévoir (dossier d'incidence Natura 2000, demande de dérogation des espèces protégées, consultation de la commission départementale de la nature, des paysages et des sites (CDNPS)).

Le fleuve étant une rivière domaniale, les actions dans le lit et sur les berges seront également concernées par le code général de la propriété des personnes publiques. La limite théorique du domaine public étant défini par la hauteur des eaux coulant à pleins bords avant de déborder, il sera néanmoins nécessaire d'avoir également l'accord des propriétaires privés pour intervenir au-delà de cette limite (en particulier pour les actions de reprise d'érosion sur les berges). A défaut d'accord avec les propriétaires, il conviendra de disposer d'un arrêté pris après une enquête publique organisée dans les conditions prévues par le code de l'expropriation pour cause d'utilité publique.

4.3.2. Ingénierie de conception

Secteur	Oudon – Bellevue	Ancenis – Oudon	Saint-Florent – Ancenis	Montjean-sur-Loire – Saint-Florent	La pointe – Montjean-sur-Loire
Ingénierie de conception	<ul style="list-style-type: none"> - Remodelage des épis relativement aisé - Aménagement de Bellevue : nécessité de mener des études de conception poussée avec mise en place d'un modèle physique - Réutilisation possible des enrochements des épis remodelés 	<ul style="list-style-type: none"> - Remodelage des épis et suppression de chevrette relativement aisés - Rechargement : recherche nécessaire de ressource en matériaux suffisante avec la bonne granulométrie - Réutilisation possible des enrochements des épis remodelés 	<ul style="list-style-type: none"> Remodelage des épis suppression de chevrette relativement aisés 	<ul style="list-style-type: none"> Reprise des chevrettes relativement aisée 	<ul style="list-style-type: none"> Reprise des chevrettes relativement aisée

La réalisation des travaux nécessitera une phase d'études détaillées permettant de préciser les dispositions techniques définitives des aménagements en particulier concernant les deux secteurs de l'île Neuve-Macrière et de Bellevue.

Il apparaît nécessaire de réaliser des études hydrosédimentaires locales sur modèle physique et/ou modèle mathématique bidimensionnel, afin de confirmer les choix d'aménagement proposés et d'optimiser le dimensionnement des ouvrages. Ces études concerneront essentiellement :

- L'aménagement de Bellevue
- La réouverture du bras de l'île de Neuve-Macrière

Concernant le dimensionnement et la conception de l'aménagement de Bellevue et dans une moindre mesure des actions visant à restaurer la continuité sédimentaire dans les bras secondaires, il conviendra de mettre en œuvre des modèles hydrauliques numériques et/ou physiques permettant d'appréhender localement le comportement des alluvions dans le secteur de réaménagement (risque de dépôt et/ou d'affouillement) et de caractériser finement les conditions d'écoulements : perte de charge, pentes de la ligne d'eau, champs des vitesses,... Ces modèles devront permettre d'optimiser les formes et le calage altimétrique des ouvrages à concevoir.

Les formulations et/ou les modèles numériques permettant de caractériser les conditions d'écoulement et le transport solide en tenant compte de la mobilité des lits à sables et à gravier commencent à produire des résultats opérationnels. La sensibilité des résultats aux choix des données d'entrée et du type de formulation, peut rendre néanmoins l'interprétation des résultats encore délicate pour décider des choix de dimensionnement et de conception.

Les modèles physiques présentent sans doute l'avantage d'une meilleure représentativité des résultats par rapport à la réalité très complexe de la sédimentologie du fleuve. Néanmoins, compte tenu de la granulométrie des alluvions ($d_{50} = 1 \text{ mm}$) et de l'étendue des secteurs d'aménagement (environ 2km pour Bellevue), les modèles à réaliser devront être de grande taille (20 m de longueur environ pour Bellevue en considérant une échelle de modèle au 1/100) et peuvent nécessiter une distorsion de densité (au 1/100, la taille des alluvions dans le modèle réduit serait de $10\mu\text{m}$) pour respecter les lois de comportement des grains.

Au stade actuel de la définition du programme d'action, les deux types de modèles (physique et numérique) sont à considérer. Une étude de faisabilité technico économique pour la mise en œuvre de tels outils est préconisée avant d'arrêter le choix final.

5. COÛT DU PROGRAMME D' ACTIONS ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

5.1. MONTANT DES TRAVAUX

5.1.1. Prix unitaires

Les prix unitaires utilisés pour le chiffrage du programme d'actions sont reportés dans le tableau ci-après.

N°	Action	Unité	Coût (€ HT)
1	Maitrise d'œuvre	%	12.0%
2	dossiers réglementaires	Forfait	500 000
3	Investigations géotechniques	Forfait	300 000
4	Portage MOA	an	100 000
5	Mise en place dispositif d'évaluation et suivi	Forfait	4 200 000
6	divers et imprévus	%	15.0%
7	Supression des épis	ml	450.0
8	arasement et remise en état des chevrettes barant l'amont des bras secondaires	ml	600.0
9	Curage mécanique des bancs et/ou bras	m ³	10.0
10	dévégétalisation des bancs	m ²	1.5
11	Reprise d'érosion des berges	ml	350.0
12	concassage des enrochements issus des épis	m ³	3.5
13	recharge du lit avec matériaux de Loire	m ³	12.0
14	recharge du lit avec matériaux extérieurs	m ³	30.0
15	fourniture et mis en œuvres enrochements	m ³	50.0
16	mise en œuvre matériaux en remblai	m ³	5.0
17	matériaux de transition	m ³	40.0
18	Terrassement pour ancrage des ouvrages	m ³	7.5
19	pieux morts pour épis	unité	35.0
20	fascinage des épis	ml	50.0
21	matériaux terreux	m ³	30.0
22	Géotextile	m ²	5.0
23	Entretien des ouvrages	%	1.0

- ❑ **prix n°1 : maîtrise d'œuvre d'étude et de travaux** comprenant également les études techniques détaillées de dimensionnement des actions (modélisation mathématique et/ou physique). Sont en particulier incluses dans ce prix, les études détaillées de l'aménagement de Bellevue.
- ❑ **prix n°2 : montage des dossiers réglementaires.** Ils comprennent l'ensemble des procédures relatives au code de l'environnement, de l'urbanisme et si nécessaire de l'expropriation (voir § 4.3.1 sur les procédures réglementaires)
- ❑ **prix n°3 : investigations géotechniques.** L'aménagement de Bellevue nécessitera de mener des investigations géotechniques visant à reconnaître la nature des terrains où seront mis en place les

aménagements. Ces investigations devront se faire sur barge en étiage et durant les périodes de basse mer. Elles devront permettre de préciser les conditions d'ancrage des ouvrages.

- ❑ **prix n°4 : portage Maîtrise d'ouvrage.** Le coût de maîtrise d'ouvrage a été évalué en considérant un montant annuel forfaitaire de 100 000 € HT. Il représente les coûts de salaire et de frais administratif pour la mise en place d'une cellule de projet.
- ❑ **Prix n°5 : mise en place et suivi du dispositif d'évaluation du programme d'actions.** Le coût total correspondant est évalué en première approche à 4,2 M € TTC sur 14 ans, soit 300 000 € TTC/an environ.
- ❑ **Prix n°6 : divers et imprévus.** Le coût correspondant intègre les prix généraux des phases travaux (études d'exécution, installation des chantiers, mise en place des accès, problématiques réseaux, ...) ainsi que les provisions liées aux incertitudes sur les prix et les quantités au stade actuel des études préliminaires.
- ❑ **Prix n°7 à 22.** Ils correspondent aux prix unitaires de fourniture et de mise en œuvre des matériaux pour la réalisation des travaux. Ils ont été utilisés pour l'évaluation au mètre linéaire (ml) de certains ouvrages figurant dans les tableaux récapitulatifs.
- ❑ **Prix n°23 : entretien.** Le coût correspondant intègre les prix d'entretien des aménagements réalisés sur les chevrettes et l'ouvrage de Bellevue

5.1.2. Montant global de l'opération

Le montant des travaux secteur par secteur est indiqué dans les chapitres suivants. Le coût global de l'opération s'élève à 62,1 M€ TTC et se décompose comme suit

000	ETUDES				10 400 000
100	SECTEUR ANCENIS-LOUDON				9 600 000
200	SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-ANCENIS				6 400 000
300	SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-LA POINTE				1 000 000
400	SECTEUR LOUDON - MAUVES SUR LOIRE				2 300 000
500	AMENAGEMENT DE BELLEVUE				14 400 000
600	ENTRETIEN				800 000
	Divers et imprévus (15% coût de l'opération)				6 600 000
	MONTANT TOTAL DES TRAVAUX (€HT)				52 000 000
	TVA 19.6%				10 192 000
	MONTANT TOTAL TTC				62 100 000

Le montant des prix généraux se décompose comme suit.

Rubrique	DESIGNATION	U	QUANTITES	Prix unitaire (€HT) ou (%)	Montant Total (€HT)
000	ETUDES				
001	Maîtrise d'œuvre (phase étude)	%	33 800 000.00	12%	4 056 000
002	Procédures réglementaires (montage et suivi des dossiers)	Forf.	1.00	500 000.00	500 000
003	Investigations géotechniques	Forf.	1.00	300 000.00	300 000
004	Portage des dossiers (Maîtrise d'ouvrage)	an	14.00	100 000.00	1 400 000
005	Mise en place des opérations d'évaluation et suivi des travaux	an	14.00	300 000.00	4 200 000
	MONTANT TOTAL HT : ETUDES				10 456 000
	MONTANT TOTAL TTC				12 505 376

5.2. LE SECTEUR AVAL DE OUDON À BELLEVUE

5.2.1. Définition des actions

Les actions prévues portent sur :

- le raccourcissement des épis des bancs de l'île Perdue à Oudon et de Mauves-sur-Loire (bancs rive gauche en amont du pont). Ces systèmes d'épis totalisent un linéaire de 7100 m d'ouvrage, dont 3500 m pour Oudon et 3600 m pour Mauves ;
- la dévégétalisation des bancs et si nécessaire le creusement de bras secondaires dans les bancs actuels afin de favoriser la mise en eau partielle de ces marges alluviales et leur érosion progressive par les écoulements de hautes eaux ;
- la réalisation de l'aménagement de Bellevue.

5.2.2. Le raccourcissement des épis sur les bancs de Oudon et de Mauves-sur-Loire

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	x
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	x
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	x

Les simulations sur modèle mathématique montrent que compte tenu du caractère perché des bancs de l'île Perdue et de Mauves-sur-Loire, un simple arasement des épis ne sera pas efficace. Il sera donc nécessaire de les supprimer ou de les raccourcir d'au moins la moitié de leur longueur actuelle.

Les figures ci-après représentent sur les deux secteurs d'Oudon et de Mauves-sur-Loire, les épis raccourcis ainsi que la partie du banc actuel devant être prioritairement dévégétalisée pour favoriser la remobilisation des matériaux en période de crue.

Les épis seront raccourcis sur les $\frac{3}{4}$ de leur longueur, de telle sorte à ne garder que le dernier quart correspondant à l'ancrage en berge.

Le démantèlement des épis représente ainsi un linéaire total de :

- 2838 m à Mauves-sur-Loire sur un total de 3490 m d'épis
- 2477 m à Oudon sur un total de 3473 m

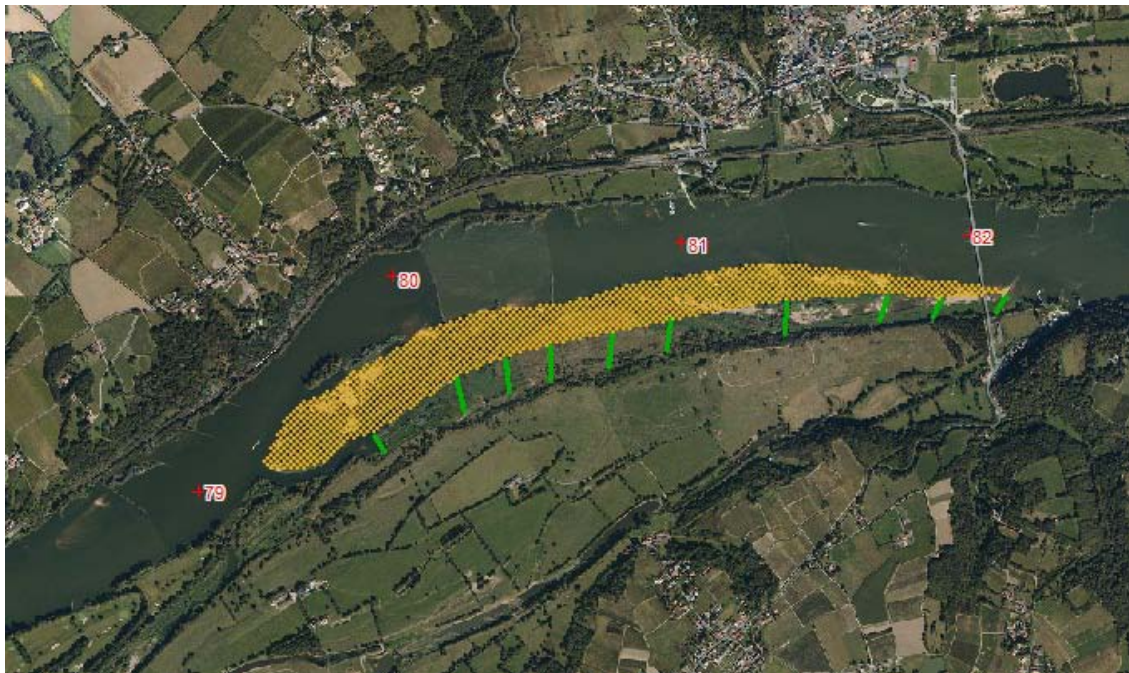
En considérant un volume d'enrochement de 6 à 8 m³/ml d'épis, le démantèlement des épis représente environ 30 000 à 40 000 m³ de blocs.

Ces blocs pourront être utilement employés pour la réalisation des duits et tenons de l'aménagement de Bellevue.

Banc de l'île Perdue (Oudon)



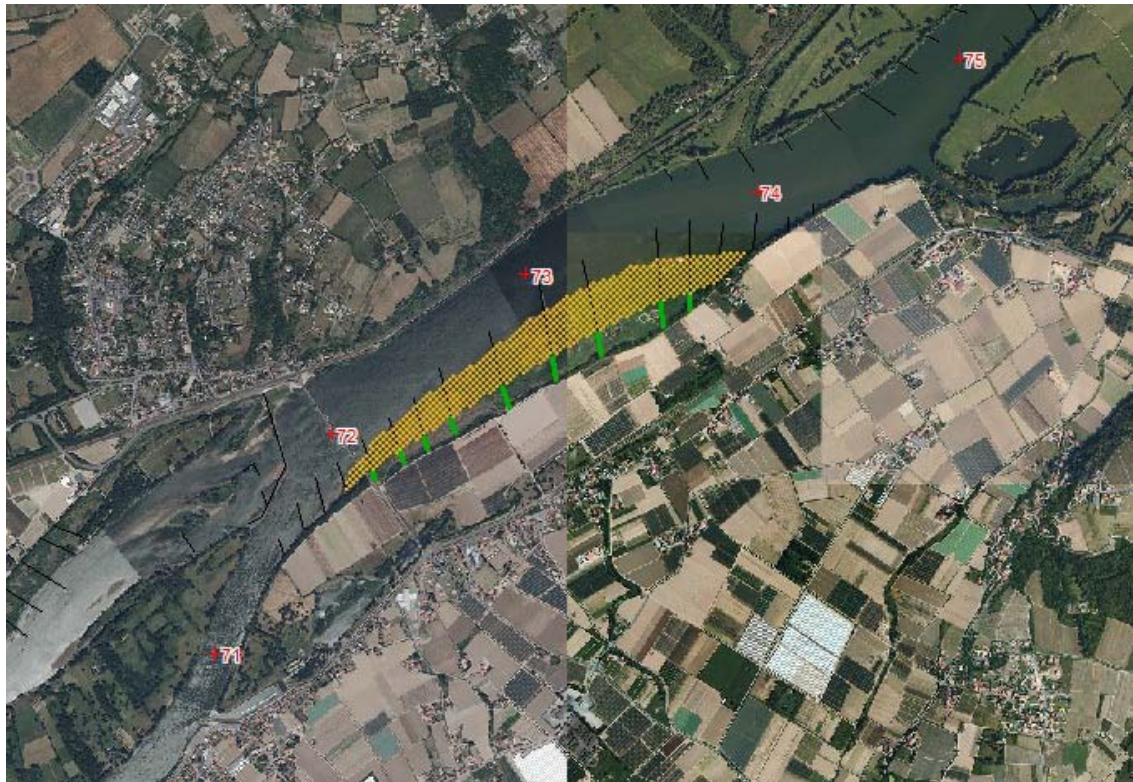
Secteur d'Oudon (échelle 1/25 000)



Banc de Mauves-sur-Loire



Secteur de Mauves (échelle 1/25 000)



5.2.3. Aménagement de Bellevue

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	

L'étude hydraulique détaillée et les pièces graphiques présentant l'aménagement sont reportées en annexe du rapport. L'aménagement est destiné à créer une perte de charge proche de 1 mètre en période d'étiage, comprise entre 0,5 et 1,0 m jusqu'au débit de plein bord et diminuant ensuite avec l'augmentation du débit en Loire, afin de limiter le rehaussement des lignes d'eau pour les débits débordant en lit majeur.

Le relèvement de la ligne d'eau amont est obtenu en combinant plusieurs actions :

- Contraction des écoulements entre deux duits submersibles ancrés en berge par des tenons transversaux. Cet aménagement aura pour effet de concentrer les vitesses d'écoulement dans le chenal central de largeur réduite (environ 1/3 de la largeur totale du lit) et de réduire les vitesses de part et d'autre de ce chenal, par augmentation de la rugosité du lit (aménagement des casiers créés par les tenons transversaux et duits longitudinaux).
- Augmentation de la pente générale du fond. Elle est obtenue par mise en place de rampes sous fluviales correctement positionnées et dont la côte de radier permet une élévation progressive des fonds atteignant 2,0 mètres en amont.
- remblaiement du fond avec des matériaux associant les alluvions sableuses de Loire et des résidus de concassage des épis (0-80mm). La granulométrie moyenne des matériaux sera définie pour éviter leur migration vers l'aval en période de crue et de jusant en période de vives eaux.

Afin de limiter les impacts négatifs sur la navigation, l'environnement, le paysage et éviter une réflexion de l'onde marée pouvant être préjudiciable à la zone portuaire, l'aménagement sera réalisé sur un linéaire total de 1200 m environ. La profondeur du chenal tient compte des contraintes de navigation actuelle liées au passage du sablier, le « Saint Germain ». La modification de cette contrainte pourrait amener à modifier la conception de l'aménagement lors des études détaillées, notamment dans le tracé du chenal et de sa profondeur admissible.

5.2.4. Conditions de faisabilité

Le débouché aval du chenal central devra faire l'objet d'une vigilance particulière et être conçu de telle manière à ne pas entraîner des risques d'affouillement pour les piles du pont de Bellevue.

De même à l'aval, la question du risque d'affouillement des piles de ponts dans la traversée de Nantes, résultant de la réduction de transport solide, devra être analysée lors de la conception détaillée de l'aménagement. Ce risque devrait a priori être faible dans la mesure où l'aménagement ne va pas arrêter complètement le transport solide.

Le sablier Saint Germain, nécessitant des tirants d'eau de l'ordre de 4,50 m, avait servi de bateau de projet pour la définition de la première esquisse de l'aménagement. Avec l'arrêt de l'exploitation de ce navire par la STFMO en juin 2013, il sera nécessaire de définir un ou plusieurs nouveaux bateaux de projet.

Les vitesses supérieures à 2 m/s calculées au jusant par le modèle au niveau du chenal resserré ne sont pas jugées gênantes pour les pêcheurs, ces derniers s'accommodant aujourd'hui des vitesses de 3,2 m/s mesurées au droit de St Florent-le-Vieil. Le franchissement de l'aménagement par les poissons et en particulier par les civelles n'est pas jugé problématique.

Les ouvrages devront être évolutifs pour pouvoir être modifiés assez aisément suivant les évolutions constatées sur les lignes d'eau, afin de maintenir le contrôle des lignes d'eau d'étiage.

La conception de l'aménagement de Bellevue devra s'inscrire dans une réflexion globale intégrant les possibilités d'amélioration du fonctionnement des bras secondaires situés à proximité : bras de l'île Clémentine, de Thouaré, de Monty et de la Sauterelle. Le périmètre d'étude sera donc élargi à cet ensemble.

Un balisage spécifique pour la navigation permettant de délimiter le chenal principal sera à réaliser (perches disposées le long des duits submersibles).

L'aménagement devra faire l'objet dans tous les cas, d'une étude détaillée sur modèle numérique et/ou sur modèle physique (voir également § 4.3.2) permettant de prendre en compte l'ensemble des usages et des contraintes (tenue des ouvrages existants et à créer dans le lit, respect des conditions de navigation, franchissabilité piscicole, ...).

5.2.5. Coût

Le coût des actions est décomposé comme suit :

Rubrique	DESIGNATION	U	QUANTITES	Prix unitaire (€HT) ou (%)	Montant Total (€HT)
400	SECTEUR OUDON - MAUVES SUR LOIRE				
401	Raccourcissement des épis du banc de Mauves sur Loire (amont du pont – rive droite)	ml	2 838.00	450.00	1 277 100
402	Raccourcissement des épis du banc de l'île Perdu en aval du pont de Oudon	ml	2 477.00	450.00	1 114 650
	MONTANT TOTAL HT : SECTEUR OUDON - MAUVES SUR LOIRE				2 391 750
	MONTANT TOTAL TTC				2 860 533

500	AMENAGEMENT DE BELLEVUE				
501	Dhuis submersibles longitudinaux en enrochements	ml	3 430.00	2 096.88	7 192 281
502	Tenons transversaux en enrochements	ml	3 270.00	945.00	3 090 150
503	Rampes sous fluviales en enrochements	m ³	16 800.00	50.00	840 000
504	rechargement du chenal d'étiage avec alluvions de Loire	m ³	84 300.00	12.00	1 011 600
505	rechargement superficiel avec matériaux (5/80)	m ³	78 750.00	30.00	2 362 500
506					
	MONTANT TOTAL HT : AMENAGEMENT DE BELLEVUE				14 496 531
	MONTANT TOTAL TTC				17 337 851

5.3. LE SECTEUR COMPRIS ENTRE ANCENIS ET OUDON

5.3.1. Définition des actions

Ce secteur correspond à une zone de forte incision pour laquelle un décorsetage du lit est envisagé avec une action complémentaire de rechargement du bras principal. Les différentes actions prévues portent donc sur :

Le réaménagement de la chevette amont de l'île Neuve-Macrière

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	x
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	x

Chevette actuelle et ensablement amont du bras de l'île de Neuve-Macrière



- Longueur actuelle : 870 m
- Cote actuelle : 4,75 m NGF
- Cote d'étiage : 2.80m NGF (PK87.80)

Cet ouvrage contrôle actuellement les écoulements dans le bras de l'île de Neuve-Macrière et assure également l'accès à l'île. Les écoulements sont actuellement surversants au-dessus de la chaussée submersible pour un débit proche de 800 m³/s supérieur au module interannuel. La cote d'arase relativement élevée, proche de 4.90 m, limite ainsi les débits entrant dans le bras.

Deux solutions sont proposées :

- Baisser la cote d'arase actuelle, légèrement au-dessus de la ligne d'eau d'étiage moyen (220 m³/s), soit à la cote de 2.50 m NGF sur une longueur de 120 m. Cette solution condamne de fait, l'accès à l'île dès que le niveau d'étiage est dépassé soit plus de 9 mois par an.
- Maintenir l'accès à l'île jusqu'au module interannuel. Cela revient à baisser la cote actuelle de la chaussée submersible de 4.90 m à 4.10 m NGF et de mettre en place un ouvrage traversant sous la

chaussée dont le radier sera légèrement au-dessus de l'étiage. Cette solution permet de rétablir des écoulements dans le bras pour les débits courant tout en maintenant un accès à l'île.

Une protection en enrochements en tête de l'île de Neuve-Macrière est prévue afin d'assurer l'ancrage de la chevrette réaménagée.

Afin d'améliorer l'entonnement des écoulements vers le bras secondaire, il peut être proposé soit de réaliser un duit submersible destiné à « guider » les écoulements vers la brèche réaménagée en raccourcissant également les épis actuels (solution N°1), soit de supprimer les épis situés au droit de la chevrette actuelle en ne gardant pour certains qu'une courte longueur (solution N°2) ; les vues en plan correspondantes sont reportées en annexe.

Les ouvrages devront être évolutifs pour pouvoir être modifiés assez aisément suivant les évolutions constatées sur les lignes d'eau, afin de maintenir le contrôle des lignes d'eau d'étiage.

☐ Le creusement d'un chenal pilote dans le bras secondaire

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	x
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	x
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	x

Afin de limiter les terrassements, on procédera à un creusement en deux temps.

- 1ère phase : réalisation du chenal aval de pente proche de la pente générale du fleuve (0.0002m/m). Ce creusement associé à l'ouverture de la chevrette amont devrait permettre d'accroître les vitesses d'écoulement dans le bras et favoriser un processus d'érosion régressive.
- 2ème phase : réalisation du chenal amont à forte pente (0.1%). Il aurait pour effet d'augmenter la capacité hydraulique du bras et de supprimer ainsi le contrôle amont provoqué par l'ensablement actuel du bras.

☐ La suppression des épis dans le bras principal entre Ancenis et Oudon

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	x
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	x

Le démantèlement des épis sur ce secteur représente un linéaire total d'ouvrage de près de 8500 m et représente environ 50 000 m³ d'enrochements. Les travaux permettront également de faciliter la reconnexion des bras des Brevets et de l'île Delage.

❑ Le rechargement du bras navigable

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	X
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	

Les simulations réalisées avec le modèle mathématique montrent le gain sur les lignes d'eau actuelles, d'un rechargement du fond du lit actuellement incisé, avec des matériaux pas ou peu érodables. On viendra donc recharger le lit de la façon suivante :

- dans les fosses profondes : remblaiement des fosses avec les alluvions provenant du creusement du chenal pilote.
- couche correspondante à l'horizon situé entre - 1,0 et - 2,0 m de profondeur : remblaiement avec des matériaux mélangés provenant du concassage des enrochements issus du démantèlement des épis et des alluvions du chenal secondaire de l'île Neuve-Macrière.
- couche superficielle : remblaiement avec les alluvions du chenal secondaire.

De cette façon, l'opération de remblaiement permettra de rétablir une continuité du transport solide tout en maintenant les fonds à un niveau suffisant pour assurer un bon contrôle des lignes d'eau en particulier en étiage.

❑ Démantèlement des protections existantes en enrochements des berges de l'île de Neuve-Macrière

Des anciennes protections en enrochements maintiennent encore les berges de l'île en particulier côté bras navigable. Ces protections seront démantelées progressivement après suppression des épis, de façon à recréer les conditions d'érosion naturelle des berges et ainsi améliorer leur qualité écologique.

5.3.2. Conditions de faisabilité

Le rechargement dans le bras principal devra suivre une stratégie d'intervention permettant de bénéficier au mieux du retour d'expérience de la première phase de travaux, compte tenu du caractère expérimental de l'opération. La stratégie d'intervention visera à minimiser l'impact des travaux sur les poissons du fait de l'intervention sur une grande longueur du chenal principal.

La présence sur le secteur d'annexes hydrauliques (boires de Drain et de la Patache, bras des Brevets et de la Pierre de Drain) plaide pour la conception d'un projet intégré, tenant compte des différents objectifs de restauration et en articulation forte avec le programme « annexes fluviales ».

La stratégie d'intervention sur ce secteur devra tenir compte des 2 lots de pêche présents juste en amont du bras secondaire, dans les systèmes d'épis en « triangle ».

5.3.3. Coût

Le coût des actions est décomposé comme suit :

Rubrique	DESIGNATION	U	QUANTITES	Prix unitaire (€HT) ou (%)	Montant Total (€HT)
100	SECTEUR ANCENIS-LOUDON				
101	Terrassements en déblai pour réalisation du chenal pilote dans le bras secondaire de l'île Neuve Macrière (phases 1 et 2), y compris le démantèlement du gué existant	m ³	200 000.00	10.00	2 000 000
	Suppression des épis dans le bras principal aval	ml	3 726.00	450.00	1 676 700
102	Suppression des épis dans le bras principal amont	ml	3 126.00	450.00	1 406 700
103	Concassage des enrochements provenant du démantèlement des épis	m ³	47 964.00	3.50	167 874
104	Rechargement du bras principal avec alluvions de Loire provenant des matériaux de curage du bras secondaire	m ³	150 000.00	12.00	1 800 000
105	Rechargement du bras principal avec mélange concassé provenant des épis +alluvions de Loire provenant des matériaux de curage du bras secondaire	m ³	100 000.00	12.00	1 200 000
106	Démolition chevette existante en amont du bras de l'île Neuve Macrière	ml	280.00	450.00	126 000
107	Reconstruction chevette de l'île Neuve Macrière	ml	280.00	2 807.50	786 100
108	Protections tête amont de l'île pour ancrage chevette	ml	200.00	1 023.00	204 600
109	Reprise d'érosion sur les berges de l'île	ml	1 000.00	350.00	350 000
	MONTANT TOTAL HT : SECTEUR ANCENIS-LOUDON				9 717 974
	MONTANT TOTAL TTC				11 622 697

5.1. LE SECTEUR COMPRIS ENTRE ANCENIS ET SAINT-FLORENT-LE-VIEIL

5.1.1. Actions envisageables dans le lit principal

Raccourcir les épis actuels dans le bras principal entre Saint-Florent-le-Vieil et Ancenis (13 km)

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	x
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	x
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	x

Au stade de la définition du programme d'actions, le montant des travaux est établi en considérant le raccourcissement des épis sur la moitié de leur longueur.

5.1.2. Actions envisageables dans le bras de Varades

Compte tenu du fonctionnement jugé relativement satisfaisant du bras de Varades, il est proposé la logique d'intervention suivante :

- Retenir un objectif de réouverture sans définir dans le détail à ce stade les moyens pour y parvenir ;
- Etre en veille sur l'évolution des chevrettes et intervenir si nécessaire pour stabiliser les ouvrages et préserver ainsi le fonctionnement actuel ;
- Suivre l'évolution dans le temps de ce bras du point de vue des milieux et prévoir un suivi hydraulique global comme celui des seuils du Fresne-Ingrandes ;
- Décider en fin de programme s'il y a lieu d'intervenir sur ces bras pour en améliorer l'alimentation ;
- Mener une éventuelle concertation locale pour définir un niveau d'alimentation optimal de ces bras

Les actions présentées ci-dessous ne sont qu'une possibilité d'intervention sur ce secteur. Ce sont celles qui ont servi de base à l'évaluation du programme d'actions. Elles consisteraient ainsi à :

Réaménager la chevette barrant le bras de Varades

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	

Caractéristiques actuelles de la chevette

- Longueur actuelle : 1150 m
- Longueur de la brèche centrale : 150 m
- Cote actuelle : 6,2 m NGF
- Cote d'étiage (220 m³/s) : 6,78m NGF (PK 107.55) ; 6,72 m NGF (PK 107.0)

Cette dernière serait réaménagée au droit de la brèche actuelle de façon à permettre une surverse au-dessus de l'ouvrage au-dessus du débit d'étiage (220 m³/s), soit à la cote de 6,80 m NGF).

Les ouvrages devront être évolutifs pour pouvoir être modifiés assez aisément suivant les évolutions constatées sur les lignes d'eau, afin de maintenir le contrôle des lignes d'eau d'étiage.

Supprimer le système d'épis dans le bras de Varades

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	X
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	X

Le linéaire d'épis à démanteler est de 5 600 mètres.



Système d'épis dans le bras de Varades

5.1.3. Coût

Le coût des actions est décomposé comme suit :

Rubrique	DESIGNATION	U	QUANTITES	Prix unitaire (€HT) ou (%)	Montant Total (€HT)
200	SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-ANCENIS				
201	Raccourcissement des épis dans le bras principal de Loire entre les ponts de Saint Florent et d'Ancenis (13 km)	ml	8 477.00	450.00	3 814 650
202	Réaménagement de la chevette amont du bras de Varades (fermeture de la brèche actuelle et arasement de l'ouvrage au-dessus de la cote d'étiage)	ml	250.00	600.00	150 000
203	Rétablissement du transit sédimentaire dans le bras secondaire de Varades : suppression des systèmes d'épis	ml	5 600.00	450.00	2 520 000
	MONTANT TOTAL HT : SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-ANCENIS				6 484 650
	MONTANT TOTAL TTC				7 755 641

5.2. LE SECTEUR AMONT COMPRIS ENTRE SAINT-FLORENT-LE-VIEIL ET LA POINTE

5.2.1. Définition d'actions envisageables

Comme pour le bras de Varades (voir précédemment), compte tenu du fonctionnement jugé relativement satisfaisant du bras de Saint-Georges, il est proposé de :

- Retenir un objectif de réouverture de ce bras sans définir dans le détail à ce stade les moyens pour y parvenir ;
- Etre en veille sur l'évolution des chevrettes et intervenir si nécessaire pour stabiliser les ouvrages et préserver ainsi le fonctionnement actuel ;
- Suivre l'évolution dans le temps de ce bras du point de vue des milieux et prévoir un suivi hydraulique global comme celui des seuils du Fresne-Ingrandes ;
- Décider en fin de programme s'il y a lieu d'intervenir sur ces bras pour en améliorer l'alimentation ;
- Mener une éventuelle concertation locale pour définir un niveau d'alimentation optimal de ces bras.

Les actions présentées ci-dessous ne sont qu'une possibilité d'intervention sur ce secteur. Ce sont celles qui ont servi de base à l'évaluation du programme d'actions. Elles consisteraient ainsi à :

Réaménager la chevette de l'Alleud afin d'assurer le contrôle de la ligne d'eau d'étiage

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	



Chevette de l'Alleud

L'ouvrage actuel contrôle la ligne d'eau à bas débit dans le bras principal amont. La brèche existante perturbe ce contrôle.

- Longueur actuelle : 1 050 m
- Longueur de la brèche centrale : 45 m
- Cote actuelle : entre 12,5 et 13,2 m NGF et brèche à 9,75 m
- Cote d'étiage : 10,82 m NGF (PK 129.6) ; 10,60 m NGF (PK 128.7)

Les travaux pourraient comprendre :

- la fermeture de la brèche ;
- l'arasement de la crête actuelle de l'ouvrage au-dessus de la ligne d'eau d'étiage ;
- la suppression de l'ouvrage situé en aval de la chevrette (ancien épi).

En première approche, l'ouvrage pourrait être reconstitué au droit des deux brèches actuelles. La cote d'arase pourrait être alors calée légèrement au-dessus de la ligne d'eau d'étiage moyen (220 m³/s) soit à 10,5 m NGF sur une longueur développée de 300 m.

Les ouvrages devront être évolutifs pour pouvoir être modifiés assez aisément suivant les évolutions constatées sur les lignes d'eau, afin de maintenir le contrôle des lignes d'eau d'étiage.

Supprimer les radiers et épis perturbant le transit sédimentaire dans le bras de Saint-Georges

Effets attendus	
Remobilisation des matériaux	
Lutte contre l'incision	x
Diversification des faciès d'écoulement	
Amélioration locale du fonctionnement des milieux	x



Epis en aval immédiat de la chevrette de l'Alleud



Chaussée dans le bras de Saint-Georges



Epis traversant en aval du bras de Saint-Georges

Les travaux pourraient consister t à

- supprimer les épis existants.
- rétablir l'accès à l'île par une chaussée submersible permettant le transit des matériaux.

5.2.2. Coût

Le coût des actions est décomposé comme suit :

Rubrique	DESIGNATION	U	QUANTITES	Prix unitaire (€HT) ou (%)	Montant Total (€HT)
300	SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-LA POINTE				
301	Réaménagement de la chevette de l'Alleud (fermeture de la brèche actuelle et arasement de l'ouvrage au-dessus de la cote d'étiage)	ml	350.00	600.00	210 000
302	Rétablissement du transit sédimentaire dans le bras secondaires de Saint Georges: suppression des systèmes d'épis ou des chaussées traversantes	ml	952.00	450.00	428 400
303	Reféction chaussée submersible accès île Saint Georges	ml	150.00	2 807.50	421 125
	MONTANT TOTAL HT : SECTEUR SAINT FLORENT-LE-VIEIL-LA POINTE				1 059 525
	MONTANT TOTAL TTC				1 267 192

6. SUIVI DES ACTIONS

Un dispositif de caractérisation de l'état des lieux initial et de suivi des actions réalisées est à mettre en place préalablement à la réalisation des travaux. Ce dispositif aura pour objectif d'une part de contribuer à l'évaluation des effets des travaux réalisés sur l'évolution du lit et des lignes d'eau et d'autre part d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve en particulier par l'acquisition de données mesurées (évolution des bancs, profondeur d'érosion, transport solide sur le fond,...). Celles-ci pourront être mises à profit pour optimiser les actions futures, notamment lors des études de projet pour l'aménagement de Bellevue.

Les principales dispositions à mettre en place sont récapitulées dans le tableau reporté en fin de chapitre et développées ci-après. Les mesures proposées sont à mettre en place sur l'ensemble du fleuve intéressé par le programme d'actions (de la Pointe à Sainte Luce-sur-Loire) et de manière plus spécifique au droit des zones d'intervention.

6.1. ETAT INITIAL

Etat des lieux topographiques

Avant la réalisation des premiers travaux, il importe de réaliser un état des lieux topographique et bathymétrique du lit qui constituera l'état de référence avant travaux. L'acquisition des données pourra se faire de différentes manières (voir ci-dessous). Dans tous les cas, il conviendra de privilégier des campagnes bathymétriques et topographiques en période favorable (étiage pour les levés topographiques et hautes eaux pour les levés bathymétriques) et si possible en s'attachant à réaliser les levés avec des débits et conditions de marées similaires :

- Levés laser aéroporté (LIDAR) : Ils permettent de disposer d'un semis de points des bancs émergés et des bras secondaires et de construire un modèle numérique de terrain permettant d'identifier et de quantifier les évolutions des fonds (érosion/dépôts) par comparaison avec les levés antérieurs. Un levé LIDAR sera à réaliser sur l'ensemble du bief entre La Pointe et Sainte Luce-sur-Loire.
- Bathymétrie : levés des fonds immergés par mesures au sondeur acoustique multifaisceaux et levé des lignes d'eau par GPS embarqué.
- Profils transversaux dans les zones de travaux. Des profils transversaux sont à lever ou à reconstituer perpendiculairement aux berges. Ces levés doivent être repérés par des bornes topographiques de façon à pouvoir être réalisés systématiquement aux mêmes points et selon les mêmes gisements. Dans les zones de travaux, les profils en travers seront à réaliser au minimum tous les 50 mètres.

L'état initial constituera l'état de référence permettant de définir les évolutions du lit après intervention.

Evaluation des habitats

Réalisation d'inventaires faune/flore approfondis répartis sur les 4 saisons nécessaires à la réalisation de l'étude d'impact.

6.2. SUIVI DE L'EFFICACITÉ

☐ Suivi topographique du lit et des secteurs d'intervention :

- Levés laser aéroporté (LIDAR) : tous les 5 ans après travaux et après une crue significative ;
- Levés Bathymétriques : tous les 5 ans après travaux et après une crue significative ;
- Profils topographiques des bras secondaires : tous les 2 ans après travaux.

Les levés topographiques et bathymétriques réalisés après les travaux permettront d'évaluer la cinétique d'évolution du lit et quantifier l'efficacité des actions (dégagement des bras secondaires, réengrèvement du bras principal).

☐ Prises de vue et interprétation des photographies aériennes et de terrain, pour le suivi des formes en plan

Dans le cadre du dispositif SIEL (Système d'Information et d'Evolution du Lit) mis en place par la DREAL Centre, des prises de vue du lit du fleuve à l'étiage sont réalisées plus ou moins régulièrement, depuis 1995, sur tout ou partie de la Loire entre Nevers et Nantes. Les images issues de ces prises de vues sont numérisées, géoréférencées, orthorectifiées puis assemblées sous forme de mosaïques de 3 à 4 km. Les traitements de ces données permettent de suivre les évolutions des entités morphologiques du lit (type de végétation sur les bancs, évolution des bancs et des bras secondaires).

Il conviendra de pérenniser ce suivi et valoriser les données en suivant plus particulièrement les zones ayant été décorsetées.

L'analyse diachronique des photographies aériennes permettra d'évaluer la dynamique des écoulements de Loire après travaux et les évolutions en plan du lit (diversification des facies d'écoulement, évolution des bancs et de la végétation) et de programmer les éventuelles opérations de dévégétalisation.

En complément, il est proposé de réaliser des clichés photographiques au sol selon des points fixes et géoréférencés. Ces photos seront comparées entre elles afin d'apprécier l'impact des travaux sur le paysage, l'évolution morphologique et l'évolution de la végétation sur le site.

☐ Suivi des lignes d'eau

Le suivi des lignes d'eau se fera de différentes manières :

- Mise en place d'échelles limnimétriques rattachées au système de nivellement général (RGF 93 et IGN 69). L'idéal serait de disposer d'échelles positionnées tous les kilomètres. A défaut, il conviendra de les positionner prioritairement dans les zones d'intervention au droit d'ouvrages stables (perré de navigation, quai,...), en eau pour les faibles débits et accessibles à la lecture visuelle depuis la berge. Ces échelles permettront de multiplier les observations à faible coût. Il faudra éviter l'implantation des échelles sur les piles qui peuvent poser des problèmes d'interprétation (écoulement rapidement varié le long de la pile).
- Mesure des lignes d'eau par GPS embarqué pour différentes conditions de débits et en privilégiant pour la moitié aval, les mêmes conditions de marée (basse mer de vives eaux moyennes par exemple).
- Les mesures de lignes d'eau devront être systématiquement rattachées à une mesure de débit de Loire, au coefficient et au moment de la marée.

Le suivi des cotes d'eau dans le temps rattaché au suivi des débits permettra d'évaluer les impacts des travaux sur les lignes d'eau (stabilité, rehaussement, baisse).

❑ **Mesure de la répartition des débits dans les différents bras**

Plusieurs modes opératoires sont à considérer :

- **Mise en place de stations hydrométriques permanentes** permettant d'enregistrer en continu l'évolution des niveaux d'eau. Pour ces stations il conviendra de procéder à des jaugeages régulièrement. Ces stations ont pour objectif de connaître les débits du fleuve sur la période de réalisation des travaux et au-delà. Il conviendra donc de privilégier des sections stables dans le temps. On retiendra plutôt les sections au droit des ponts (présence de radier et de sections stables). Au minimum, deux stations hydrométriques sont à prévoir : Montjean-sur-Loire (station existante) et Ancenis. Pour la station d'Ancenis, les jaugeages seront à réaliser en condition de basse mer.
- **Mesure par transect ADCP** de la répartition des débits dans les différents bras. Ces mesures seraient à réaliser au minimum une fois tous les ans ou deux ans après les travaux et ensuite espacer à tous les 5 ans, et pour 3 à 5 débits caractéristiques du fleuve (de l'étiage au débit de crue annuelle). Ces mesures seront à réaliser pour les bras principaux et les bras secondaires en privilégiant les secteurs d'intervention : bras de Saint-Georges, bras de Varades, bras de l'île de Neuve-Macrière.
- **Mise en place d'échelle au droit des chevrettes barrant l'amont des bras.** Ces ouvrages contrôlent les faibles débits et donc les écoulements en aval dans le bras secondaire mais également en amont dans le bras principal. Il est donc pertinent de pouvoir suivre les cotes d'eau au droit des chevrettes et d'établir la courbe de tarage des ouvertures qui seront réaménagées. Des échelles rattachées au système NGF seront donc à mettre en place systématiquement en amont et en aval immédiat de ces chevrettes afin de connaître les cotes d'eau et le dénivelé de la ligne d'eau. Ces échelles sont à fixer sur des supports facilement accessibles depuis la berge.

Les résultats de suivi permettront d'évaluer l'efficacité des actions de réouverture des bras secondaires en terme de redistribution des débits entre les bras du fleuve.

❑ **Evaluation des habitats**

Un suivi des paramètres permettant une caractérisation fonctionnelle des habitats naturels et de la biodiversité sera à mettre en place. Il concernera les habitats du lit principal mais également des bras secondaires et annexes.

Le suivi serait à réaliser tous les ans sur cinq ans après les travaux et ensuite espacer à tous les deux ans et portera sur :

- Localisation des espèces d'intérêt patrimonial et des espèces invasives ou à risque ;
- Suivi des habitats des bras secondaire, annexes et lit principal.

L'objectif est de caractériser, voire quantifier, l'évolution des conditions d'habitats en relation avec la remise en eau des milieux concernés

6.3. ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE

☐ **Suivi topographique des formes fluviales dans les zones d'aménagement et entre zones d'aménagement**

Ce suivi topographique sera à réaliser par levés de profils transversaux des bancs à partir des repères fixes (voir § ci-dessus) et par interprétation des levés LIDAR. Les profils terrestres peuvent être réalisés systématiquement tous les deux ans et les levés LIDAR après une crue significative ou à défaut tous les 5 ans.

Le suivi permettra de renseigner sur l'emplacement des dunes et des barres sédimentaires et leur influence sur l'évolution du lit après travaux.

☐ **Evaluation du transport solide en différents points de Loire**

Plusieurs investigations de terrain sont à envisager. Elles ont pour objectif d'apprécier la dynamique de mobilisation des matériaux (profondeur de mobilisation des alluvions, répartition spatiale des mouvements de matériaux) et de quantifier les mécanismes de transport sur le fond.

On retiendra :

- **Les chaînes d'érosion.** technique permettant d'instrumenter une zone d'aménagement (bras secondaire par exemple) et de quantifier l'épaisseur des sédiments remaniés lors d'une crue. Un tel dispositif est à privilégier dans les bras de l'île de Neuve-Macrière et de Varades.
- **Les dispositifs de mesure du transport solide** de type de ceux mis en œuvre par l'Université de Tours. Il comporte différents types d'échantillonneurs iso-cinétiques de la charge de fond et en suspension (BTMA, bouteille de Delft) et de bennes (USBM54...) déployés à partir de barges.

Le dispositif ne permettra pas de fournir des résultats immédiats pour le suivi des impacts des travaux dans le lit. Il devrait par contre répondre au manque de connaissance actuel sur l'évaluation du transport solide.

6.4. SUIVIS SPÉCIFIQUES AUX ÉTUDES DÉTAILLÉES DE BELLEVUE ET DU SECTEUR DE L'ÎLE DE NEUVE-MACRIÈRE

Des investigations spécifiques de terrain seront à lancer pour les besoins des études détaillées des aménagements de Bellevue et du secteur de l'île de Neuve-Macrière. Elles portent sur :

- l'état des lieux topographiques et bathymétrique des zones d'intervention ;
- le relevé précis des lignes d'eau et des débits pour différentes hydrologies de Loire ;
- les caractérisations granulométriques des sédiments ;
- la mesure des champs de vitesse ;
- les investigations géotechniques permettant de caractériser l'épaisseur du manteau alluvial, la nature et le toit du substratum, ...

Comme signalé plus haut, il est possible que l'aménagement de Bellevue contribue à retarder la migration des alvins d'anguilles, créant artificiellement une augmentation des densités locales en civelles. Un suivi régulier des densités de civelles sur les cinq premières années devra être mis en œuvre. Compte tenu de la complexité de la problématique et du site, un protocole de suivi spécifique pourra être élaboré en concertation avec l'ONEMA et le CRESCO.

PROPOSITION DE DISPOSITIF D'ÉVALUATION ET DE SUIVI DU PROGRAMME D' ACTIONS

Mesures	Grandeur(s) suivi(es)	Objectif	Secteur	périodicité (*)	observations	Coût indicatif
ETAT INITIAL						
- Levés LIDAR	Suivi topographique du lit et des secteurs d'intervention	L'état initial constituera l'état de référence permettant de définir les évolutions du lit après intervention.	ensemble du bief	Etat initial	Nouvelle campagne bathymétrique réalisée début 2013	350 000 € HT
- Levés Bathymétriques			ensemble du bief	Etat initial		200 000 € HT
- Inventaires faune/flore	Inventaires faune/flore	Réalisation d'inventaires faune/flore approfondis répartis sur les 4 saisons nécessaires à la réalisation de l'étude d'impact.	ensemble du bief	Etat initial		200 000 € HT
SUIVI DE L'EFFICACITE						
- Levés LIDAR	Suivi topographique du lit et des secteurs d'intervention	Les levés topographiques et bathymétriques réalisés après les travaux permettront d'évaluer la cinétique d'évolution du lit et l'efficacité des actions (dégagement des bras secondaires, réengrèvement du bras principal).	ensemble du bief	tous les 5 ans après travaux et après une crue significative (crue de plein bord)		1 400 000 € HT
- Levés Bathymétriques			ensemble du bief	tous les 5 ans après travaux et après une crue significative (crue de plein bord)		800 000 € HT
- Profils topographiques des bras secondaires			zones de travaux	tous les 2 ans après travaux		140 000 € HT
- Interprétation des photographies aériennes	Suivi morphologique du lit (évolution de la végétation et des principales entités morphologiques)	L'analyse diachronique des photographies aérienne permettra d'évaluer la dynamique des écoulements de Loire après travaux et les évolutions en plan du lit (diversification des faciès d'écoulement, évolution des bancs et de la végétation) et de programmer les éventuelles opérations de dévégétalisation.	ensemble du bief	tous les 2 ans après travaux	données a priori disponibles (SIEL)	35 000 € HT
- Echelles limnimétriques dans le bras principal de Loire	Suivi des lignes d'eau	Le suivi des cotes d'eau dans le temps rattaché au suivi des débits permettra d'évaluer les impacts des travaux sur les lignes d'eau (stabilité, réhaussement, baisse).	ensemble du bief	3 à 4 fois par an	échelles à mettre en place idéalement tous les km	40 000 € HT
- Mesures de lignes d'eau par GPS embarqué			ensemble du bief	Etat initial, tous les 5 ans après travaux et après une crue significative (crue de plein bord)	ligne d'eau pour trois débits caractéristiques : étiage, module et crue annuelle.	100 000 € HT
- Station hydrométrique à Montjean et Ancenis	Suivi des débits dans le bras principal	Les deux stations permettront de reconstituer les chroniques de débits en Loire et de rattacher les mesures de lignes d'eau aux débits du fleuve.	ensemble du bief	continue	mise en place d'une sonde de mesure continue des niveaux d'eau	15 000 € HT
- Transect ADCP	Suivi de la répartition des débits entre les différents bras de Loire	Les résultats de suivi permettront d'évaluer l'efficacité des actions de réouverture des bras secondaires en terme de redistribution des débits entre les deux bras du fleuve.	zones de travaux	tous les 2 ans après travaux et après une crue significative (crue de plein bord)	mesures à réaliser pour trois débits caractéristiques : étiage, module et crue annuelle.	140 000 € HT
- Mise en place d'échelles limnimétriques au droit des chevrettes barant l'amont de bras			chevrettes de l'Alleud, Varades, Neuve-Macrière	3 à 4 fois par an		40 000 € HT
- Caractérisation fonctionnelle des habitats naturels et de la biodiversité	Analyse fonctionnelle des habitats	Suivi de l'évolution des conditions d'habitats en relation avec la remise en eau des milieux concernés	annexes fluviales	tous les ans sur 5 ans après les travaux et ensuite espacer à tous les deux ans		420 000 € HT
- Mesures des paramètres caractéristiques (H,V,D50)						
ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE						
- Chaines d'érosion	Estimation du transport solide sur le fond	Le dispositif ne permettra pas de fournir des résultats immédiats pour le suivi des impacts des travaux dans le lit. Il devrait par contre répondre au manque de connaissance actuel sur l'évaluation du transport solide.	bras secondaires réaménagés	variable en fonction des crues	dispositif à mettre en place en début de programme	150 000 € HT
- Dispositif de mesure du transport solide			bras principal de Loire (Possonnière, Ingrandes, Ancenis)	mesures à réaliser à différents débits		210 000 € HT

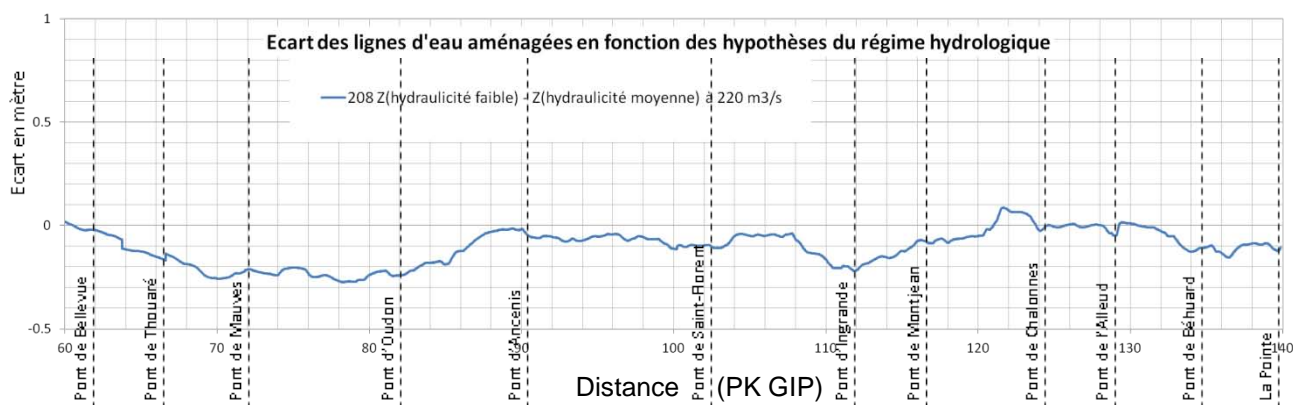
(*) valeur indicative devant être réajusté en fonction des évolutions constatées

7. ROBUSTESSE DU PROGRAMME D'ACTIONS

7.1. LE RÉGIME HYDROLOGIQUE

La période 1965-2005 a été retenue pour étudier les différents scénarios. Elle correspond à une hydraulicité moyenne du fleuve. Des analyses complémentaires ont été réalisées sur la série de débits compris entre 1945 et 1985, représentative d'une période plus sèche.

L'effet d'une variation des cycles hydrologiques sur l'évolution de la ligne d'eau peut être évalué à ± 25 cm. C'est ce que montrent les résultats présentés sur le graphe ci-dessous à partir des simulations réalisées sur deux chroniques différentes 1945-1985 (hydraulicité faible) et 1965- 2005 (hydraulicité moyenne).



Ecart des lignes d'eau d'étiage calculé pour deux hypothèses d'hydraulicité différentes, faible et moyenne ($Z_{\text{étiage}}(\text{hydraulicité faible}) - Z_{\text{étiage}}(\text{hydraulicité moyenne})$)

Selon les études sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (projet ICC-HYDROQUAL), l'évolution future des débits devrait tendre vers une hydraulicité encore plus faible que celle testée ici. En effet, le débit moyen sur la période projetée 2025-2045 serait d'environ $550 \text{ m}^3/\text{s}$, contre $850 \text{ m}^3/\text{s}$ sur 1945-1985 et $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ sur 1965-2005.

On pourra donc s'attendre à tendre vers un même équilibre mais avec une évolution plus lente des fonds.

7.2. LA CHARGE SOLIDE PROVENANT DE L'AMONT

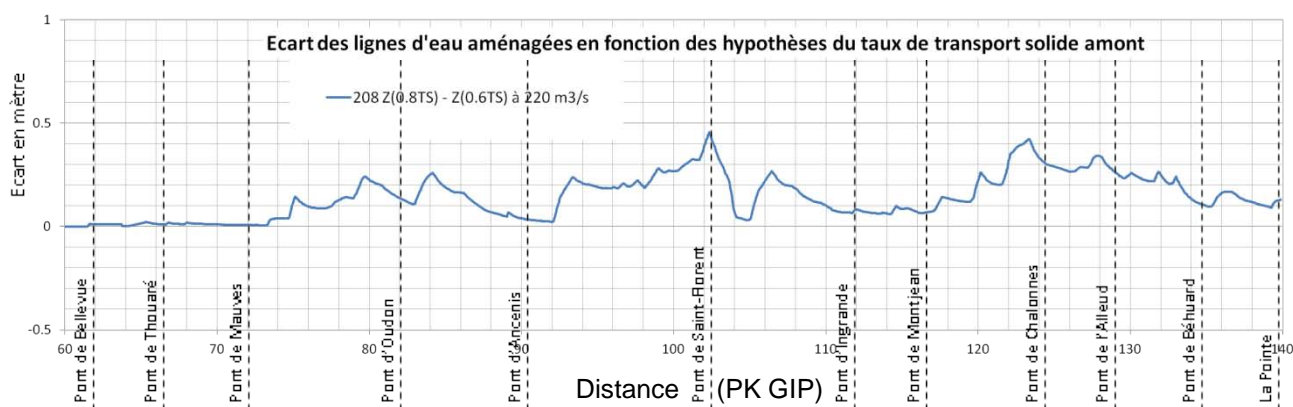
La charge solide transportée par le fleuve en amont de la zone d'étude influencera plus ou moins fortement les résultats attendus du programme d'action. En effet, plus la charge solide provenant de l'amont sera forte, plus il sera possible de bénéficier de ce volume de matériaux pour recharger le lit du fleuve. A l'inverse avec une charge solide annuelle réduite, il sera nécessaire de mobiliser davantage les gisements de matériaux existants dans les bras secondaires ou piégés dans les systèmes d'épis.

Afin de prendre en compte l'incertitude qui affecte la connaissance de cette charge solide amont, deux hypothèses haute et basse ont été retenues. Ces dernières reposent respectivement sur un volume annuel de

matériaux correspondant à 80% et 60% de la capacité théorique de charriage déterminé en amont de la zone d'étude par la formulation de Meyer Peter Muller.

La moyenne interannuelle de matériaux rentrant dans le bief d'étude est ainsi estimée entre 270 000 et 360 000 m³/an.

La variation des apports solides amont entraîne des écarts sur les lignes d'eau d'étiage à long terme. Ainsi, la prise en compte de l'hypothèse haute de transport solide va donner lieu à des lignes d'eau 20 à 40 cm plus hautes que celles obtenues pour l'hypothèse basse de transport solide. Ceci s'explique par des dépôts plus importants sur les fonds du fait d'apports de matériau plus importants venant de l'amont.



Ecart des lignes d'eau d'étiage calculé pour deux hypothèses d'apport solide différentes, faible et moyenne ($Z_{\text{étiage (apport haut)}} - Z_{\text{étiage (apport faible)}}$)

7.3. L'INFLUENCE DU NIVEAU MARIN

La Loire en aval d'Ancenis est soumise aux cycles des marées. Afin de prendre en compte leur influence sur le transport des matériaux, une condition limite aval a été reconstituée à la station du Pellerin permettant de respecter le bilan sédimentaire de la Loire pour un cycle de marée moyenne.

Une condition limite aval prenant en compte la surélévation du niveau marin, liée au réchauffement climatique, a également été testée. La valeur retenue dans la présente étude est prise égale à +20 cm à échéance 2040 (hypothèse de calcul retenue par SOGREA⁵ pour la Loire aval, sur la base des recommandations de l'ONERC⁶).

Comme pour le scénario tendanciel, l'élévation du niveau moyen de la mer de +0.20 m n'a pas d'effet sensible sur le bilan sédimentaire du fleuve. On note seulement un très léger effet bénéfique sur le fond du lit avec une diminution de l'incision de 1 à 3 cm entre Ancenis et Oudon

⁵ SOGREA, Memo, *Hypothèses à prendre en compte pour l'évaluation des scénarios tendanciel et morphologique de restauration de la Loire estuarienne*, juin 2010

⁶ ONERC, Note de synthèse, *Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles*, février 2010

7.4. CONCLUSION

Si les incertitudes liées au changement climatiques ou aux apports de charges solides amont peuvent modifier sensiblement les résultats des lignes d'eau, elles ne remettent pas en cause le programme d'action tel qu'il est présenté aujourd'hui.

En revanche, il sera intéressant d'affiner les résultats en tenant compte des acquisitions de données prévues dans le programme de suivi des actions, notamment celle visant à améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve et sur la quantification des apports solides amont.

ANNEXES

- Etude hydraulique du site de Bellevue
- Pièces graphiques des actions proposées (plans et vues de détail)