



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



RAPPORT DE PHASE 1

Tome 1 : Rapport

 hydratec groupe setec 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_1-V1_VF.docx					
Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations
V0	18/01/2013	CTB / PPE	CTB	138 + annexes	Emission initiale (Rapport principal + 4 annexes)
V1	19/12/2013	CTB / PPE	PPE	138p + 6 annexes	Prise en compte des observations du GIP LE

SOMMAIRE

1. CADRE GENERAL.....	6
1.1. CONTEXTE ET RAPPEL DU CONSTAT	6
1.2. OBJECTIFS DE RESTAURATION.....	7
1.3. PRESENTATION DE LA DEMARCHE ENGAGEE PAR LE GIP LE.....	8
2. METHODOLOGIE GENERALE ET CONDUITE DE L'ETUDE	10
2.1. APPROCHE GENERALE	10
2.1.1. Phase 1	10
2.1.2. Phase 2	11
2.2. DONNEES D'ENTREE.....	12
2.2.1. Bathymétrie et topographie du lit.....	12
2.2.2. Hydrologie.....	12
2.2.3. Apports solides amont	13
2.2.4. Granulométrie des alluvions	14
2.2.5. Marées.....	15
2.3. OUTILS DE CALCUL	17
2.3.1. Principes généraux.....	17
2.3.2. Description du modèle hydraulique.....	17
2.4. SUIVI DE L'ETUDE	23
2.4.1. Comité d'expert.....	23
2.4.2. Comité de pilotage.....	23
3. INVESTIGATIONS DE TERRAIN.....	24
3.1. OBJECTIF.....	24
3.2. GRANULOMETRIE DES BANCs	24
3.3. LIGNES D'EAU	25
4. CONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE HYDROSEDIMENTAIRE.....	26
4.1. CONSTRUCTION DU MODELE	26
4.1.1. Données de bases	26
4.1.2. Construction des domaines 2D des systèmes d'épis.....	26
4.1.3. Construction du domaine filaire.....	26
4.1.4. Implémentation des singularités.....	26
4.2. CALAGE	27
4.2.1. Données utilisées.....	27
4.2.2. Calage de la partie amont (La Pointe – Anetz)	27
4.2.3. Calage de la partie aval (Ancenis – Nantes)	28
4.2.4. Synthèse des résultats	28
4.3. EXPLOITATION DU MODULE HYDRO SEDIMENTAIRE.....	30
4.3.1. Traitement de l'hydrogramme amont.....	30
4.3.2. Traitement de la condition limite aval.....	30
4.3.3. Diamètre caractéristique des alluvions.....	30
4.3.4. Principaux calculs réalisés.....	30

5.	EVOLUTION PROBABLE DU LIT SANS INTERVENTIONS (SCENARIO TENDANCIEL)	32
5.1.	PARAMETRES MORPHOLOGIQUES DU LIT ACTUEL	32
5.1.1.	Granulométrie des alluvions	32
5.1.2.	Structures des pentes du chenal principal	33
5.1.3.	Altimétrie des bras secondaires.....	35
5.1.4.	Singularités.....	37
5.1.5.	Seuils du Fresne-sur-Loire	37
5.2.	PREVISIONS SUR 75 ANS DE L'EVOLUTION DES FONDS	38
5.3.	CONCLUSIONS.....	39
6.	LEVIERIS POSSIBLES D'INTERVENTION DANS LE LIT ET REPONSES SEDIMENTAIRES.....	41
6.1.	STOCK ALLUVIAL PRESENT DANS LE LIT	41
6.1.1.	Méthodologie générale.....	41
6.1.2.	Estimation du volume piégé entre épis et dans les principaux bras secondaires	43
6.1.3.	Volumes nécessaires pour le réengrèvement du lit principal	45
6.1.4.	Comparaison du stock alluvial avec les volumes nécessaires pour le réengrèvement du lit principal	45
6.1.5.	Mobilisation actuelle des matériaux dans le lit.....	51
6.2.	DEFINITION DES CONDITIONS DE REEQUILIBRAGE DU BIEF SUR LE LONG TERME	52
6.3.	EVALUATION DES ACTIONS DEJA REALISEES	54
6.3.1.	Remodelage des épis entre la pointe et le pont de l'Alleud	54
6.3.2.	Seuils du Fresne-sur-Loire	54
6.4.	LES TYPES D' ACTIONS ENVISAGEABLES.....	57
6.4.1.	Le remodelage des systèmes d'épis	57
6.4.2.	L'ouverture des bras secondaires.....	59
6.4.3.	La création de pertes de charges localisées	60
6.4.4.	La réalisation de seuils à échancrure dans le bras navigable.....	63
6.4.5.	Les rampes sous-fluviales.....	64
6.4.6.	La reprise d'érosion sur les berges	65
6.5.	CONSEQUENCES SUR LES STRATEGIES POSSIBLES D'INTERVENTION.....	65
7.	CONSTRUCTION DES SCENARIOS D' ACTIONS ET INCIDENCE SUR LES LIGNES D'EAU	68
7.1.	DEFINITION DES SCENARIOS D' ACTIONS.....	68
7.2.	ANALYSE DES BILANS SEDIMENTAIRES ET DE L'EVOLUTION DES FONDS	73
7.2.1.	Programmation 201 :	73
7.2.2.	Programmation 202 :	74
7.2.3.	Programmation 203 :	76
7.2.4.	Programmation 204 :	77
7.2.5.	Programmation 205 :	79
7.2.6.	Programmation 206 :	80
7.2.7.	Synthèse des fonds et bilan sédimentaire à long terme.....	82
7.3.	ANALYSE DES LIGNES D'EAU	86
7.3.1.	Méthodologie adoptée	86
7.3.2.	Evolution de la ligne d'eau d'étiage.....	86
7.3.3.	Evolution des lignes d'eau au module	87
7.3.4.	Evolution des lignes d'eau pour le débit de crue annuelle	88
7.4.	LES PRINCIPALES CAUSES DES EVOLUTIONS CONSTATEES.....	92

7.4.1.	<i>Les principales causes possibles des évolutions de ligne d'eau</i>	92
7.4.2.	<i>Bilan sédimentaire et évolution des fonds</i>	92
7.4.3.	<i>Répartition des débits entre les différents bras</i>	96
7.4.4.	<i>Erosion des bancs entre les épis</i>	98
7.5.	CONCLUSIONS	103
8.	CONSTRUCTION DU PROGRAMME D'ACTIONS	106
8.1.	ANALYSES DE SENSIBILITE	106
8.1.1.	<i>Remodelage des épis</i>	106
8.1.2.	<i>Réouverture des bras</i>	107
8.2.	PROPOSITION D'UNE PROGRAMMATION D'ACTIONS VISANT A STABILISER LE LIT	111
8.2.1.	<i>Définition du programme</i>	111
8.2.2.	<i>Effets sur les lignes d'eau</i>	115
8.2.3.	<i>Effet sur l'évolution des fonds</i>	115
8.3.	AMENAGEMENTS COMPLEMENTAIRES	115
8.3.1.	<i>Principes</i>	115
8.3.2.	<i>Bilan sédimentaire</i>	116
8.3.3.	<i>Lignes d'eau</i>	116
8.4.	CONCLUSIONS	117
9.	ANALYSE DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	124
9.1.	PREAMBULE	124
9.2.	DANS LE LIT MINEUR	124
9.2.1.	<i>Les peuplements piscicoles</i>	124
9.2.2.	<i>Les poissons migrateurs amphihalins</i>	125
9.2.3.	<i>La moule d'eau douce Unio crassus</i>	127
9.3.	DANS LE LIT MAJEUR : FONCTIONNALITE DES ANNEXES HYDRAULIQUES	127
9.3.1.	<i>Les habitats</i>	127
9.3.2.	<i>Les espèces</i>	127
9.3.3.	<i>Biodiversité dans les annexes</i>	128
9.3.4.	<i>Annexes hydrauliques et reproduction du brochet</i>	131
10.	CRITERES D'EVALUATION A PRENDRE EN COMPTE POUR LA CONSTRUCTION DU PROGRAMME D'ACTIONS	135
10.1.	MILIEU PHYSIQUE	135
10.1.1.	<i>Lignes d'eau</i>	135
10.1.2.	<i>Morphologie</i>	135
10.2.	FONCTIONS ET USAGES	135
10.2.1.	<i>Navigation</i>	135
10.2.2.	<i>Crues</i>	135
10.2.3.	<i>Environnement</i>	136
10.3.	FAISABILITE REGLEMENTAIRE	136
10.4.	ROBUSTESSE DES PROGRAMMES VIS-A-VIS D'UNE VARIATION DES DONNEES D'ENTREE	137
10.4.1.	<i>Le régime hydrologique</i>	137
10.4.2.	<i>La charge solide provenant de l'amont</i>	138
10.4.3.	<i>L'influence du niveau marin</i>	138
10.5.	COUTS	138

ANNEXES

- ☐ Annexe 1 : Campagne de prélèvements granulométriques réalisées en 2011
- ☐ Annexe 2 : Campagne de mesure des débits par transect ADCP et des lignes d'eau entre La Pointe et Bellevue
- ☐ Annexe 3 : Présentation du modèle hydrosédimentaire et de son architecture
- ☐ Annexe 4 : Résultats de calage du modèle hydrosédimentaire
- ☐ Annexe 5 : Bilans sédimentaires
- ☐ Annexe 6 : Cartographie des enjeux environnementaux

1. CADRE GENERAL

1.1. CONTEXTE ET RAPPEL DU CONSTAT

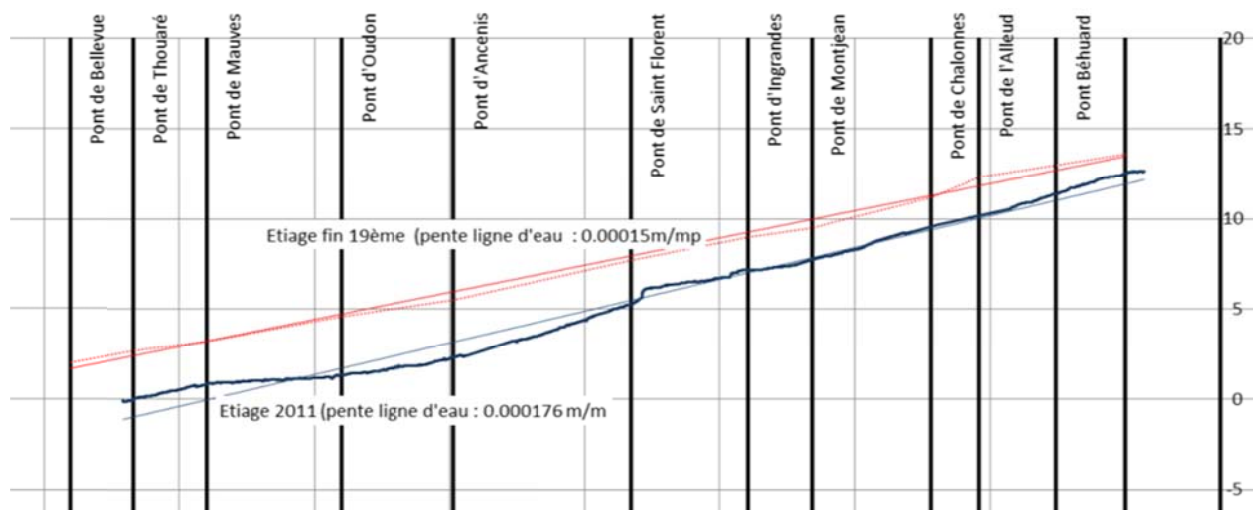
Le lit principal de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes présente une incision importante. Elle résulte de l'aménagement début 20^{ème} siècle d'un chenal de navigation au moyen d'épis et d'ouvrages de contrôle des bras secondaires puis des extractions de matériaux dans le lit du fleuve au 20^{ème} 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 graphe 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 annexes du lit mineur (bras secondaires, bras morts, basses vallées alluviales) et donc une évolution des fonctions écologiques associées à ces milieux.
- ❑ **Continuité transversale** : les bras secondaires et les 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 du fleuve sont des plaisanciers et des pêcheurs, auxquels s'ajoutent un transporteur de colis lourds qui remonte la Loire de manière très occasionnelle 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 actions 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 de phase 1.

2. METHODOLOGIE GENERALE ET CONDUITE DE L'ÉTUDE

2.1. APPROCHE GÉNÉRALE

2.1.1. 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 l'île 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 secondaire, 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 hydraulicité 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.

2.1.2.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.

Ces différents volets ont fait l'objet d'un rapport complet (phase 2).

2.2. DONNÉES D'ENTRÉE

2.2.1. Bathymétrie et topographie du lit

La topographie du lit mineur et des rives submersibles a été réalisée en 2009/2010. Elle est constituée par un semis de point disposé selon une maille régulière de 1mx1m. Le modèle hydrosédimentaire de la Loire a été construit à partir du semis de point ainsi constitué.

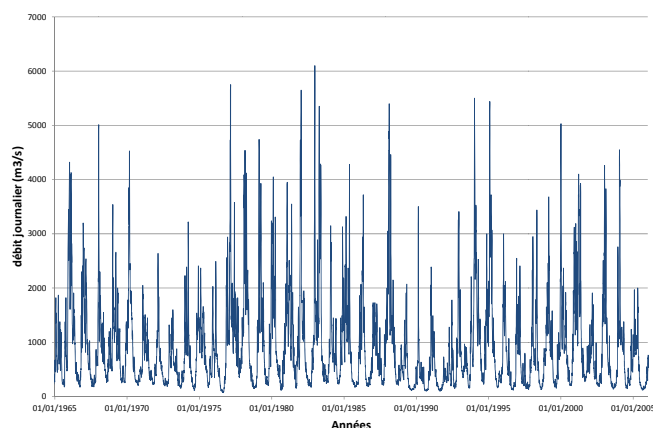
2.2.2. Hydrologie

Les chroniques de données utilisées sont constituées à partir des débits journaliers suivant :

❑ Période 1965-2005 – hydraulité moyenne

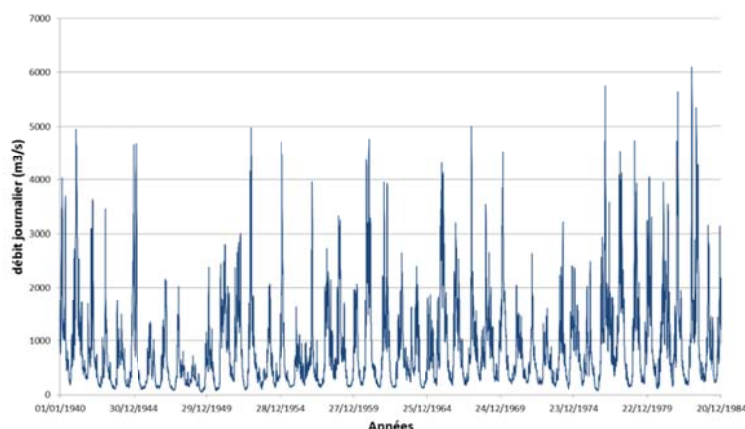
Elle se caractérise par un débit moyen journalier de 914 m³/s.

La chronique a été doublée afin de disposer d'une série de débits journaliers de 75 ans.



❑ Période 1965-1985 – hydraulité faible.

Elle se caractérise par un débit moyen journalier de 750 m³/s et peut être représentative d'une période plus sèche. Selon les études sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (projet ICC-HYDROQUAL), l'évolution future des débits devrait tendre vers une hydraulité encore plus faible que celle testée ici. En effet, le débit moyen sur la période projetée 2025-2045 serait d'environ 550 m³/s, contre 850 m³/s sur 1945-1985 et 1000 m³/s sur 1965-2005.



Sur ce dernier point, si les prévisions relatives au changement climatique montrent une diminution des débits annuels et des débits d'étiage, l'évolution des débits de crue est quant à elle très incertaine.

2.2.3. Apports solides amont

Aucune mesure du débit solide transporté par charriage n'a été faite en aval du bec de Maine. Dans ces conditions, les apports solides en provenance de l'amont ont été reconstitués par le calcul en appliquant la formulation de Meyer Peter Muller et en considérant les paramètres suivants :

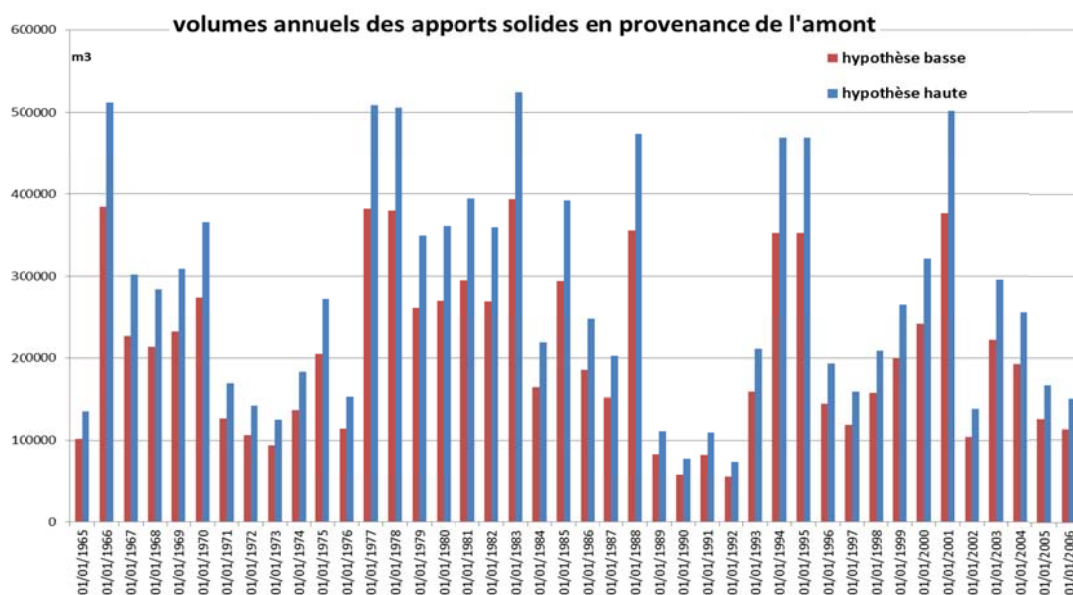
- diamètre médian des matériaux du bief amont : 1.2 mm,
- densité du matériau solide : 2.6
- contrainte critique de Shield : 0.047
- coefficient de Strickler : 35.
- largeur moyenne du lit actif: 300m
- pente moyenne du lit mineur : 0.00018, soit 0.18 m/km ;

Nous avons considéré par ailleurs le déficit sédimentaire du bief de Loire en amont de la zone d'étude (le fleuve en amont subit encore l'effet des prélèvements de matériaux dans le lit mineur qui se sont poursuivis jusque dans les années 90).

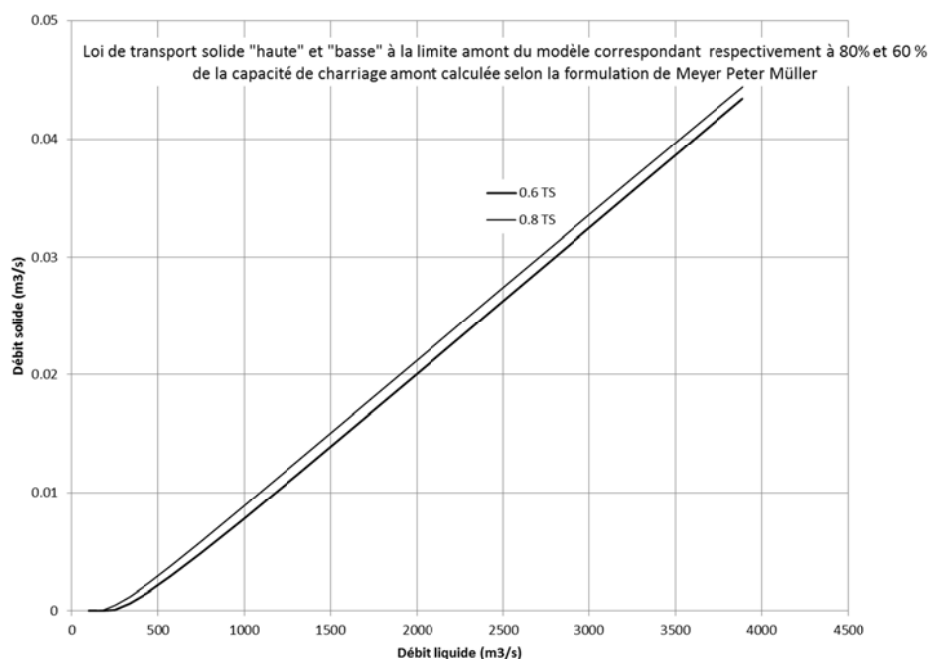
En conséquence, en aval du bec de Maine ne parvient qu'une fraction du volume solide correspondant à la capacité théorique amont de charriage du fleuve. Cette réalité se poursuivra tant que la continuité sédimentaire ne sera pas rétablie en amont, ce qui demandera encore plusieurs décennies. Nous considérerons donc deux hypothèses dénommées dans la suite du rapport « hypothèse basse » et « hypothèse haute » et correspondant pour chacune d'elle à une fraction respectivement égale à 60% et 80% de la capacité de charriage théorique calculée.

La figure ci-après illustre la variabilité des apports solides ainsi calculés pour les deux hypothèses « basse » et « haute » sur la période 1965 -2005

Les moyennes interannuelles obtenues sont respectivement de 210 000m³/an et 280 000 m³/an.



La loi de transport solide amont ainsi définie est indiquée sur la figure ci-après.



2.2.4. Granulométrie des alluvions

Les mesures réalisées dans le cadre des investigations précédentes, en particulier les campagnes de prélèvements réalisées dans le chenal en eau par Hydro-expert et Astérie en 1998 et 2006, et dans le cadre de la présente étude (voir §3.2), sur les bancs de sables dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaires, ont permis de caractériser les courbes granulométriques des sédiments.

Les résultats détaillés des campagnes de prélèvements figurent en annexe 1.

On peut distinguer :

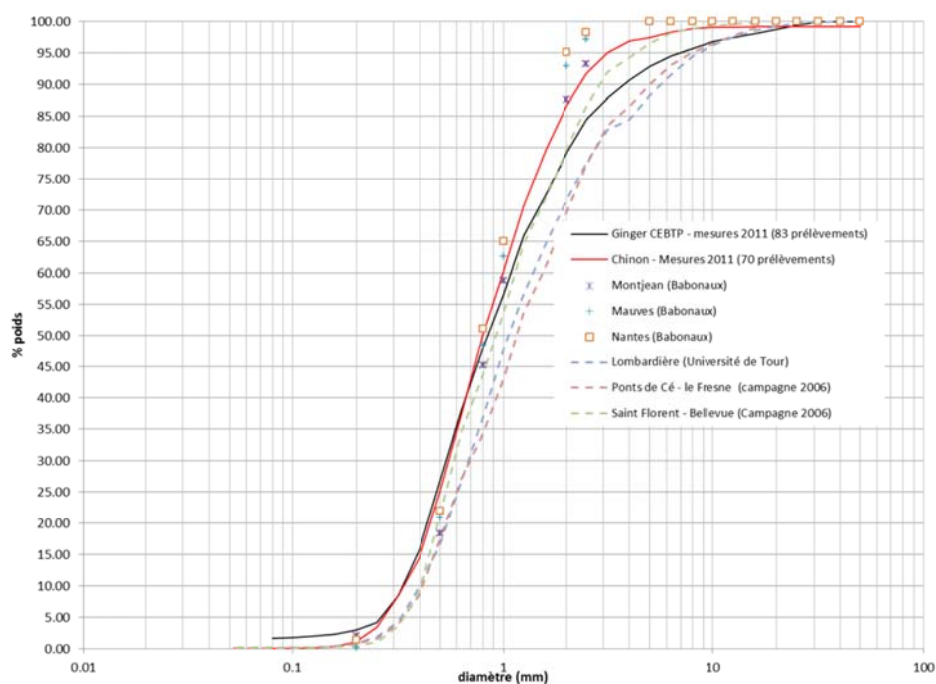
- ☐ Les sédiments dans le chenal principal en eau

	Diamètre (mm)
d30	0.75
d50	1.23
d90	5.06

- ☐ Les sédiments dans les marges alluviales (bras secondaires et systèmes d'épis)

	Diamètre (mm)
d30	0.55
d50	0.82
d90	2.92

Les courbes correspondantes sont données ci-après :



On retiendra un diamètre caractéristique d_{50} , égal à 1.2mm dans le chenal principal et de 0.8mm dans les marges alluviales.

2.2.5. Marées

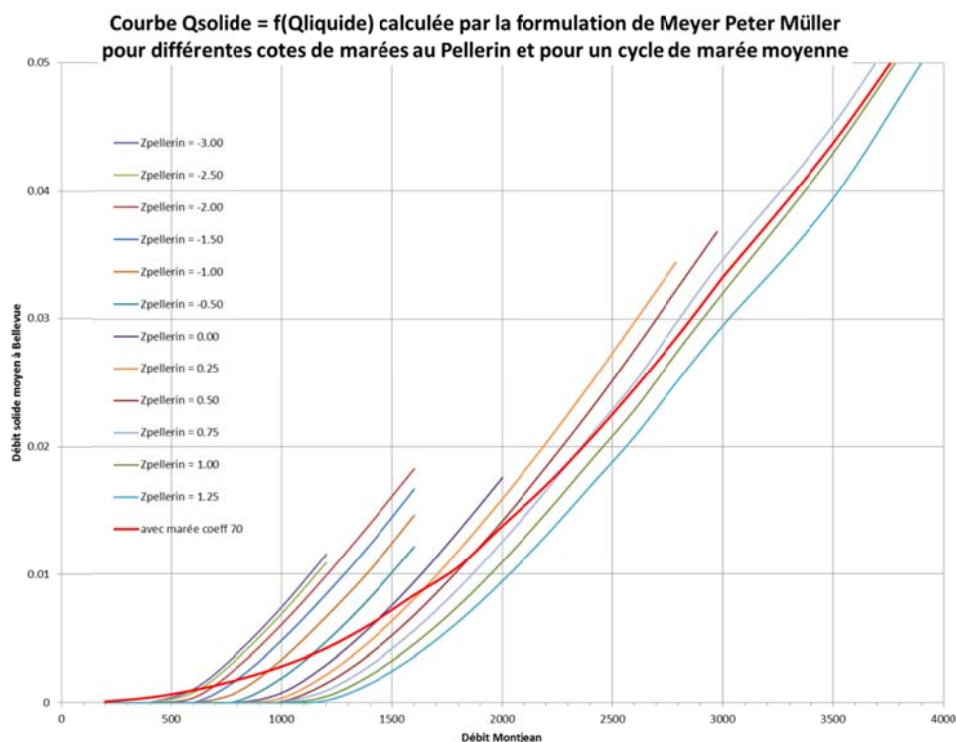
Le cycle des marées en période de vives eaux peut se faire sentir jusqu'en amont d'Ancenis. Cette influence se traduit pour un débit donné et pour un observateur se situant en un point donné du fleuve, par une variation des cotes d'eau au cours de la marée avec une diminution des pentes hydrauliques, durant le flot et une augmentation durant le jusant. On observe également sur une distance plus ou moins importante en fonction du coefficient de la marée, une inversion du courant du fleuve durant le flot.

Pour les calculs, la durée des chroniques à considérer (75 années) ne permet pas de considérer de façon explicite les cycles de marées. Cela conduirait en effet à devoir réduire les pas de temps et rallonger de façon importante les durées de calcul ; disposition difficilement compatible avec les délais de réalisation de l'étude.

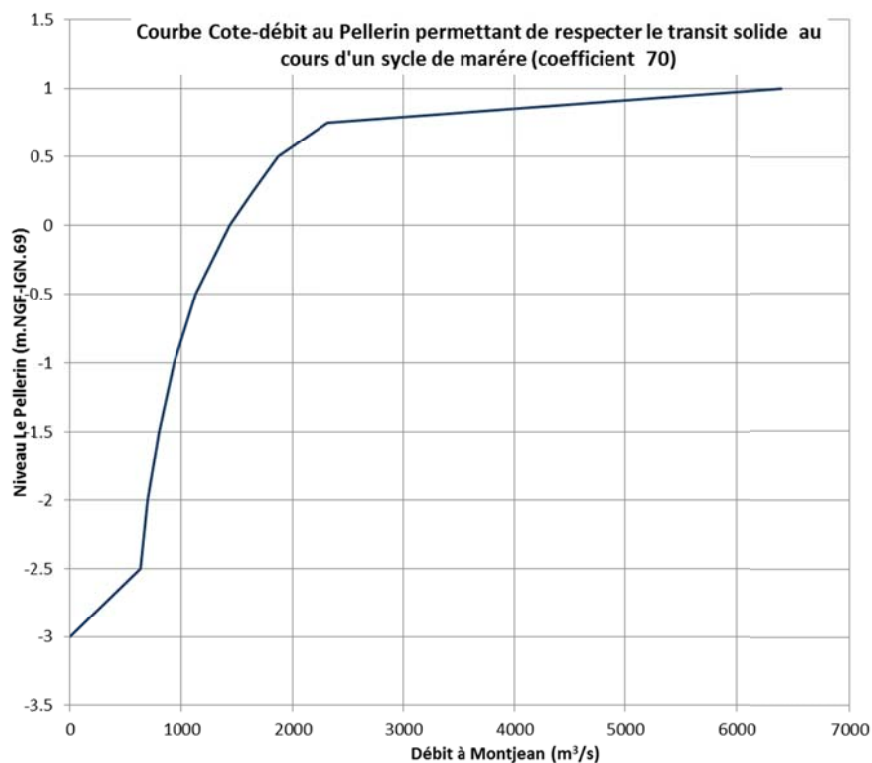
Afin de contourner cette difficulté, une condition de type $Z(Q)$, à la limite aval du modèle (station du Pellerin), a été reconstituée de façon à respecter le même transit solide aval en tenant compte des cycles de marée.

La démarche a été la suivante :

- ❑ Calcul des courbes $Q_{solide} = f(Q_{liquide})$ à la station du Pellerin pour différentes cotes de marée comprises entre -5.0 et 1.5 m IGN69.
- ❑ Calcul pour différents débits en Loire compris entre 200 et 6000 m³/s du débit solide moyen transitant à la station du Pellerin au cours d'un cycle de marée de moyennes eaux (coefficient 70).



- ❑ Définition des points d'intersection des courbes calculées pour différentes cotes en Loire avec la courbe $Q_{solide}=f(Q_{liquide})$ calculé pour un cycle de marée de moyennes eaux.
- ❑ Reconstitution de la courbe $Z(Q_{liquide})$ au Pellerin constitué par les points précédemment définis.



2.3. OUTILS DE CALCUL

Pour les besoins spécifiques de l'étude, un outil de modélisation hydrosédimentaire de la Loire entre le bec de Maine et la station du Pellerin à Nantes a été développé et mis en œuvre.

La présentation complète du modèle est détaillée en annexe 3. Nous indiquons dans les paragraphes qui suivent les caractéristiques essentielles pour une bonne compréhension des résultats qui seront présentés.

2.3.1.Principes généraux

Cet outil a pour principal objet de guider la réflexion hydro sédimentaire tout en permettant de préciser les tendances d'évolutions associées aux différents scénarios de restauration sur la Loire en amont de Nantes. C'est un outil global qui ne prétend pas décrire finement les processus détaillés d'échanges sédimentaires à l'échelle locale, a vocation à reproduire les transferts de sédiments le long des différents bras de Loire sur une échelle de temps comprise entre quelques semaines (analyse des perturbations engendrées par des épisodes de crues) et plusieurs dizaines d'années (analyse de la tendance d'évolution du lit suite à une perturbation majeure de l'équilibre morpho sédimentaire : chenalisation du lit mineur, dragages dans le lit vif, modification de lois de partage des débits entre bras etc.).

Le modèle est construit à l'aide du logiciel HYDRARIV. Les calculs hydrauliques et sédimentaires sont couplés à chaque pas de temps :

- ☐ le module hydraulique résout les équations de Barré de St Venant et calcule les nouvelles grandeurs hydrauliques en chaque nœud : débit, cote d'eau, vecteur vitesse.
- ☐ Le module sédimentologique calcule dans chaque maille le débit solide mobilisable à l'aide d'une loi empirique de transport et résout les équations de transport par convection-déposition-arrachement. La solution trouvée permet d'actualiser dans chaque maille les volumes de sédiment déposés ou arrachés en fond de lit, et donc les paramètres géométriques du modèle : sections géométriques pour les tronçons filaires du modèle, cote de fond des mailles pour les sous domaines bi dimensionnels.

Ce modèle présente deux particularités :

- ☐ Il juxtapose plusieurs types de schématisation : les algorithmes de résolution sont en conséquence adaptés à chaque sous domaine, et couplés pour résoudre un système global d'équations à chaque pas de temps,
- ☐ Les échelles de temps d'évolution des paramètres hydrauliques et sédimentaires sont très différentes : les pas de temps associés sont de l'ordre de l'heure au plus pour les calculs hydrauliques, et de plusieurs jours pour les calculs d'évolution des fonds via le module sédimentaire. Les algorithmes temporels ont en conséquence été adaptés pour tirer parti de cette différenciation.

2.3.2.Description du modèle hydraulique

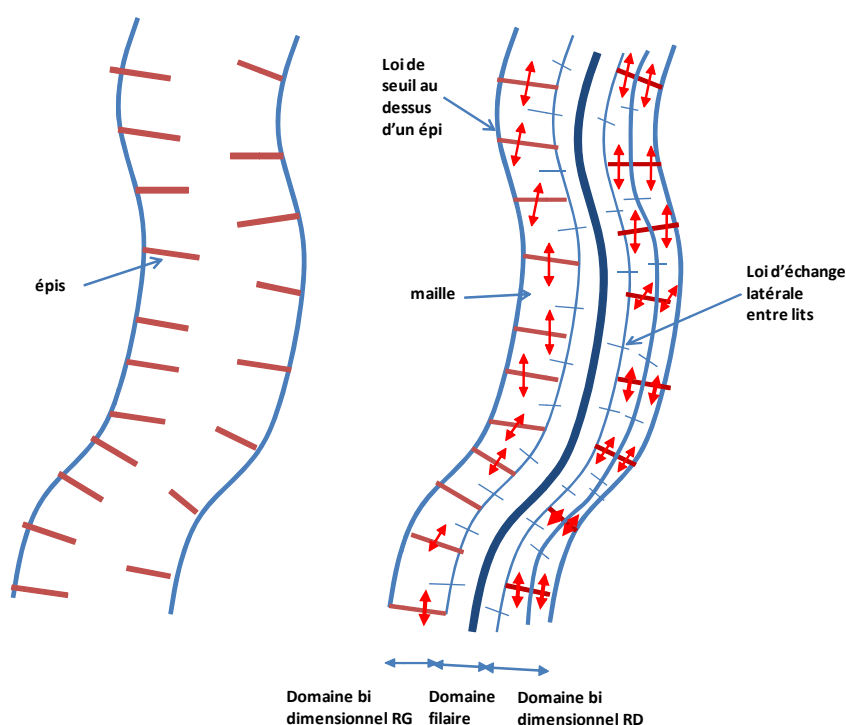
Le modèle s'étend géographiquement entre les Ponts-de-Cé à l'amont et le Pellerin à l'aval.

Les conditions limite amont sont données par l'hydrogramme de la Loire $Q(t)$ à Montjean et la courbe $Q_s(t)$ de débit sédimentaire associé.

La condition limite aval est donnée par une courbe marégraphique $Z(t)$ au Pellerin, adaptée à partir de celle de St Nazaire. Le flux sédimentaire en ce point est considéré comme sortant du modèle.

Le modèle intègre l'ensemble des bras principaux et secondaires de la Loire. La schématisation filaire est privilégiée le long de chacun d'eux : en chaque nœud de calcul est définie une section géométrique d'écoulement schématisée par un ensemble de couples de points cote-largeur. Les grandeurs calculées en chaque point sont : le débit longitudinal, la cote d'eau et la vitesse moyennée dans la section.

Le long des tronçons occupés par des épis la schématisation filaire est restreinte à la largeur du lit vif compris entre les épis. La zone occupée par les épis est schématisée par un maillage multi directionnel comme suit :



Chaque maille est décrite par un contour quadrangulaire ou triangulaire, une cote de fond moyenne et une cote d'eau au centre de gravité.

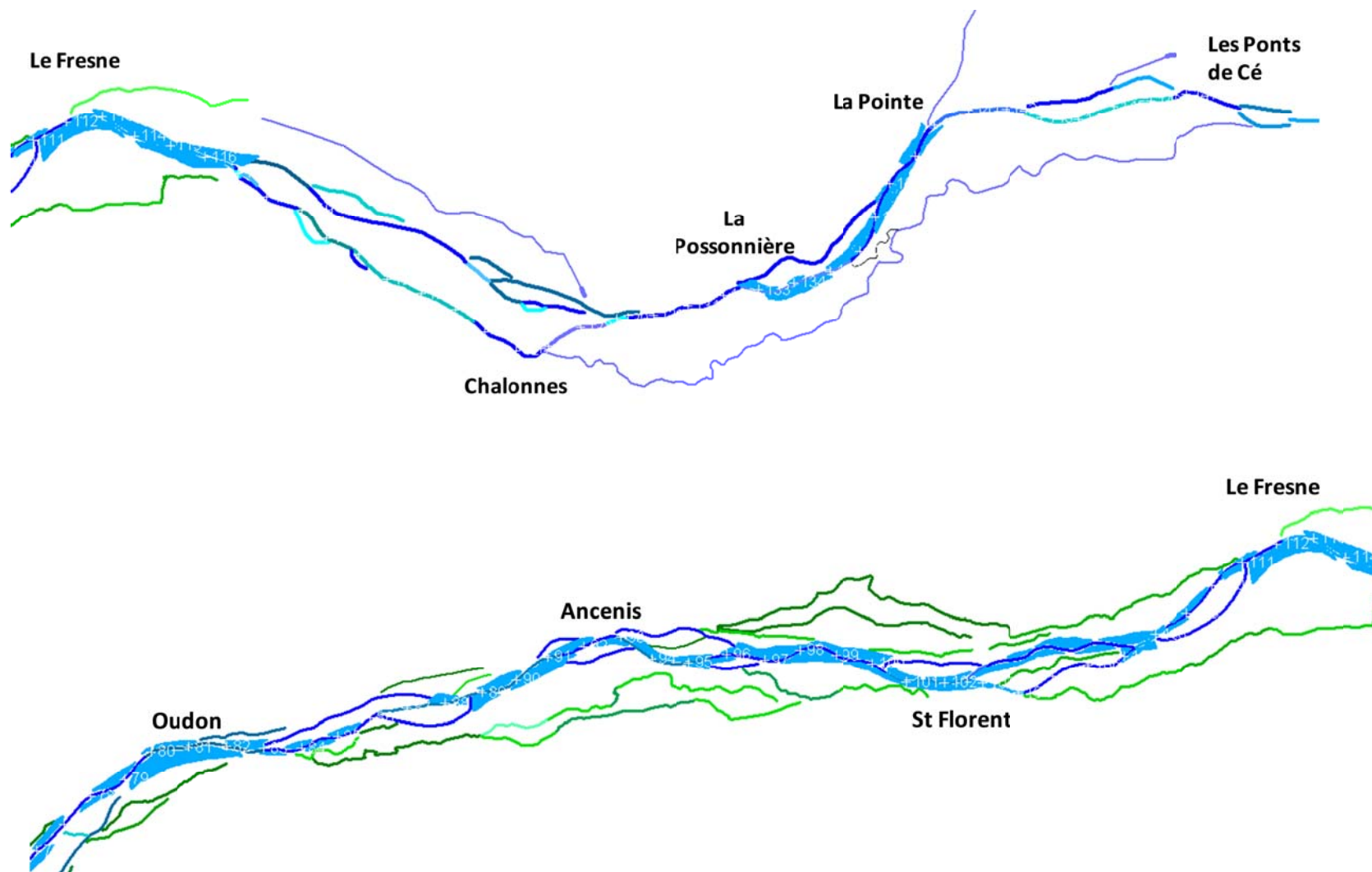
Les liaisons longitudinales schématisent les lois de perte de charge au droit du franchissement de chaque épi, exprimées par des lois de seuil équivalentes,

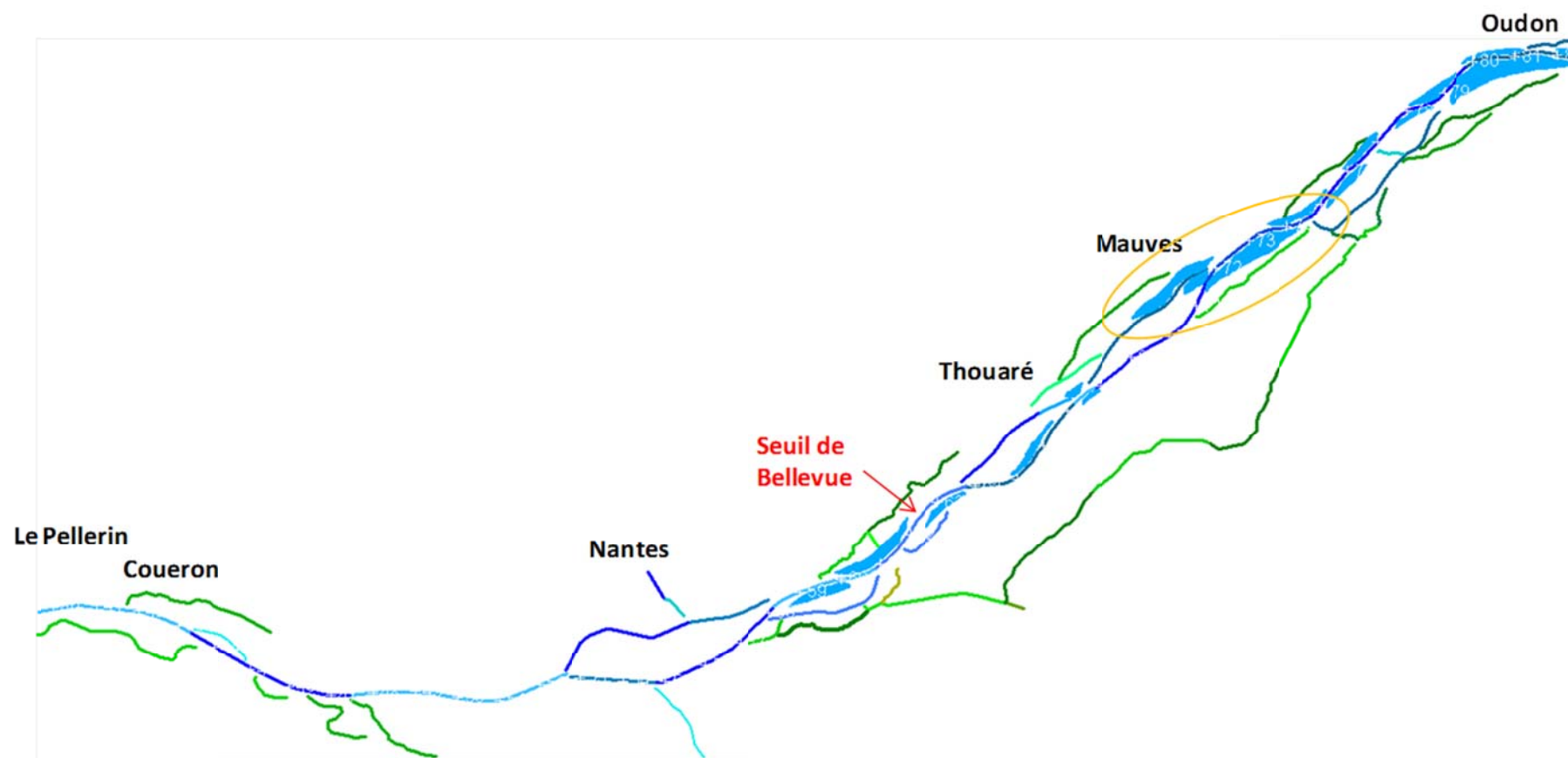
Les liaisons latérales entre les lits schématisent les échanges de débit et de quantité de mouvement entre les lits.

La longueur de chaque maille est de l'ordre de 200m. La largeur d'une maille est limitée à 40m afin de prendre en compte l'inclinaison des épis, ainsi que la pente transversale du fond.

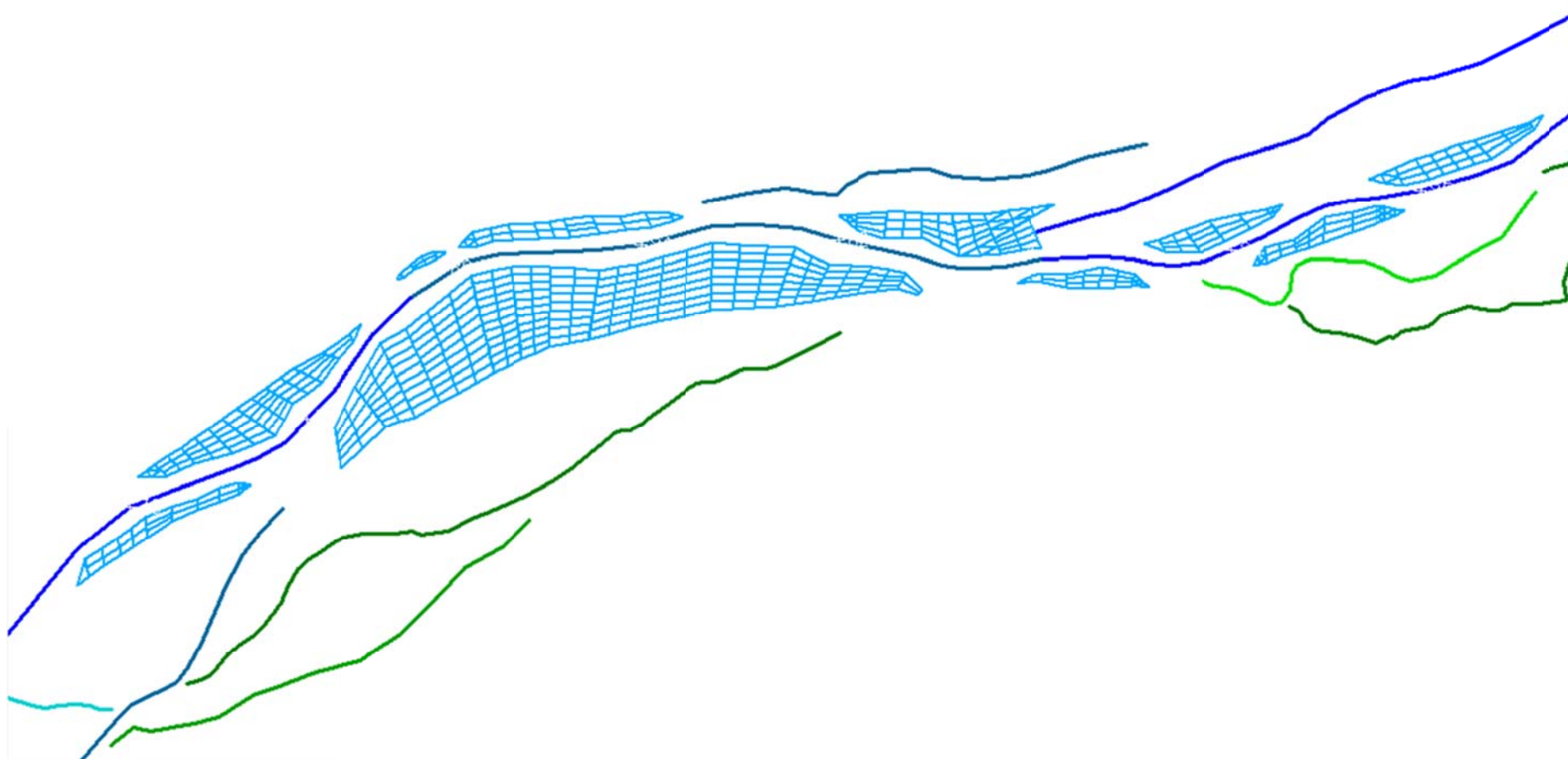
Les schémas pages suivantes reproduisent les axes d'écoulement modélisés le long des différents bras de Loire.

Les zones avec maillage 2D sont celles occupées par un système d'épis.

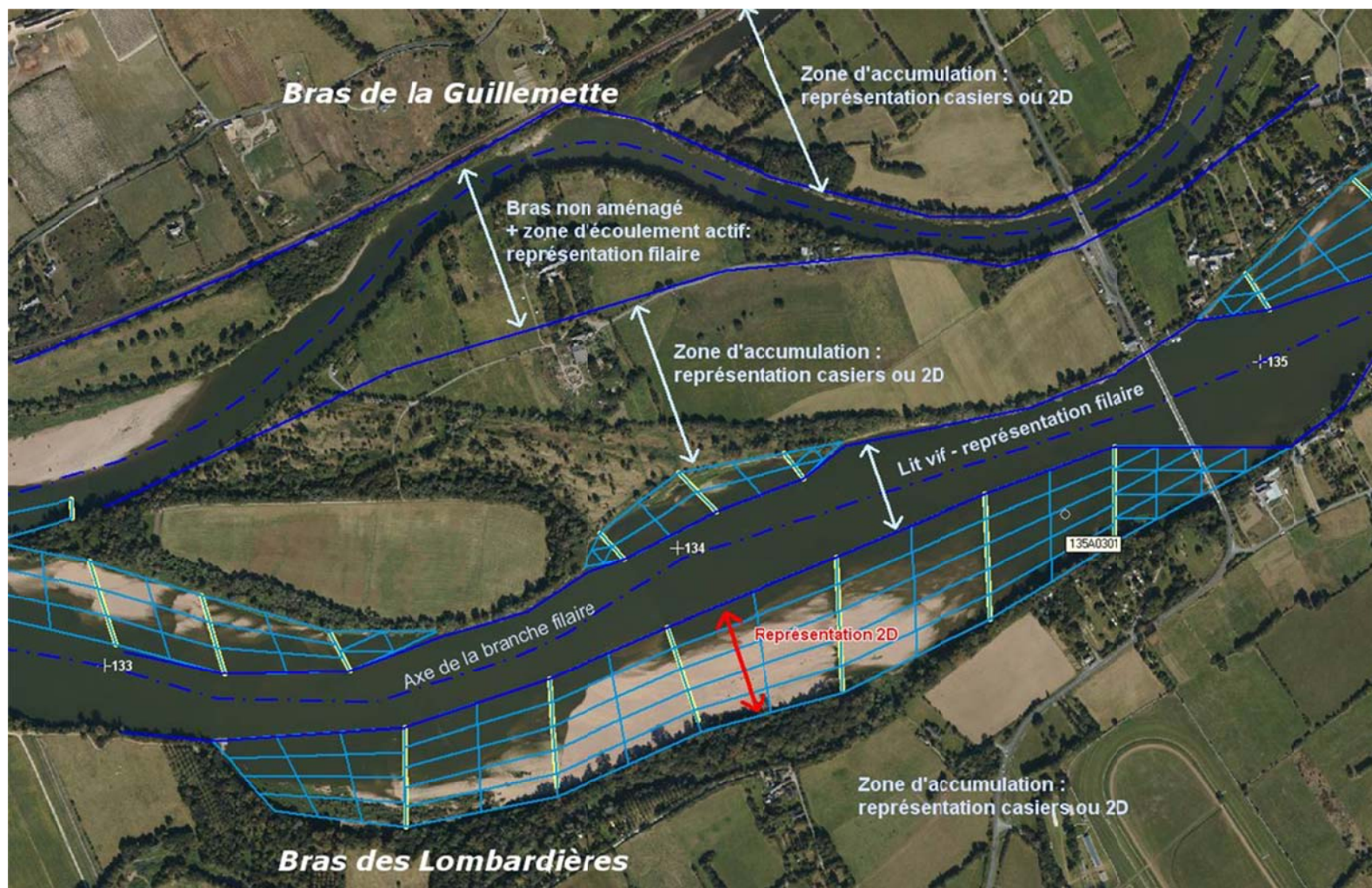




Zoom sur le secteur de Mauves-sur-Loire



Zoom sur le secteur des Lombardières



2.4. SUIVI DE L'ÉTUDE

2.4.1. Comité d'expert

Un comité d'experts a été constitué par le GIP Loire Estuaire pour l'assister dans la conduite des études. Ces attributions étaient les suivantes :

- ☐ contribuer à l'analyse des processus physiques,
- ☐ valider les outils mis en œuvre,
- ☐ prescrire éventuellement des évaluations particulières, imposer des conditions spécifiques,...
- ☐ apporter son expertise sur les résultats obtenus, de façon complémentaire à l'expertise développée par hydratec.

Il était composé de composé de :

- ☐ Erik Mosselman – Deltares, spécialiste en morphodynamique et hydrodynamique fluviale
- ☐ Stéphane Rodrigues – Université de Tours, spécialiste en morphodynamique et hydrodynamique fluviale
- ☐ Jean Berlamont – Université Catholique de Leuven, spécialiste des processus estuariens et faisant partie du comité d'experts déjà en place pour accompagner le programme de restauration de l'estuaire de la Loire en aval de Nantes
- ☐ Pierre Steinbach – ONEMA, spécialiste des poissons et ayant travaillé dans le passé sur les aspects de franchissabilité des seuils proposés sur la Loire en aval des Ponts-de-Cé
- ☐ Christine Bertier du GIPLE, hydrosédimentologue en milieu fluvial et estuarien.

2.4.2. Comité de pilotage

Le comité de pilotage de l'étude, animé par le GIP LE, a permis de valider les hypothèses de travail et d'orienter la stratégie d'étude.

Le comité de pilotage regroupait les partenaires financiers, VNF et membres du GIP LE directement concernés.

3. INVESTIGATIONS DE TERRAIN

3.1. OBJECTIF

Suite à l'analyse des données disponible, il est apparu que la connaissance actuelle sur les stocks alluvionnaires présents dans le lit de la Loire entre Bouchemaïne et Bellevue était incomplète.

Pour identifier les matériaux des bancs entre épis, des bras secondaires et des terrasses de francs bords, des granulométries complémentaires ont été réalisés.

Par ailleurs, les données limnigraphiques existantes étaient insuffisantes pour représenter finement les variations des lignes d'eau liées à la succession de tronçons à lit unique et à bras multiples dans le ce bief de Loire. Ainsi hydratec a réalisé un levé du fil d'eau et de débits de la Loire au GPS pour 3 types débits à Montjean : 150, 910 et 2260 m³/s.

3.2. GRANULOMÉTRIE DES BANCS

153 prélèvements ont été réalisés sur 11 sites entre Bouchemaïne et Bellevue en septembre 2011

Les sites de prélèvements ont été localisés (cf. annexe 1) afin de couvrir des sites représentatifs des bancs d'alluvions présents entre les épis se situant sur des tronçons de lit à bras unique ou dans des bras secondaires.

L'analyse granulométriques des prélèvements de tirer les principales conclusions ci-après :

- ☐ Le diamètre moyen des sédiments dans les épis et dans les bras secondaire est légèrement plus petit que celui des sédiments situés en bordure du chenal principal (0.82 mm contre 1.23 mm). Cela peut s'expliquer par des conditions de vitesses plus faibles dans les marges du lit avec pour conséquence une granulométrie plus fine des matériaux s'y déposant
- ☐ Les courbes granulométriques montrent une homogénéité des matériaux qui s'inscrivent dans un fuseau resserré. Cette homogénéité des matériaux devrait faciliter la remobilisation du stock alluvial mais peut rendre leur dépôt dans l'axe principal du lit plus difficile que pour des matériaux à granulométrie plus étendue et plus grossière
- ☐ L'absence de différenciation du diamètre moyen en fonction de la profondeur confirme le caractère plutôt homogène des matériaux rencontrés.
- ☐ Il ne semble pas y avoir de relation clairement établie entre le diamètre des matériaux et l'abscisse curviligne de leur situation en Loire. Ils représentent une même entité sédimentaire, le stock en place résultant du dépôt progressif des matériaux provenant de la charge amont. Ces résultats ne correspondent donc pas aux résultats trouvés par Hydroexpert en 1998 sur les matériaux prélevés majoritairement dans le chenal et en bordure du chenal en eau. Ces derniers suivent en effet une loi de distribution granulométrique linéairement décroissante avec les PK. Nous n'avons pas d'explication satisfaisante pour justifier ces différences. On peut seulement avancer que les dépôts de matériaux entre les épis et dans les bras ont sans doute intéressé de façon préférentielle une classe de matériaux représentée par un mode principal proche de 0.8 mm, ce processus de piégeage ayant occulté les autres caractéristiques sédimentaires.

3.3. LIGNES D'EAU

Comme le suggère Philippe Lefort (2009) dans sa définition et justification des études nécessaires pour l'évaluation des leviers de restauration : « la succession de tronçons à lit unique et à bras multiples crée des variations des lignes d'eau dans le temps et des pentes dans l'espace. Un modèle hydro-morphologique ne peut être validé au vu des seules données des limnigraphes existantes. Il est nécessaire que ces données soient complétées par des mesures de niveaux et débits permettant de caractériser le comportement des différents types de bras. »¹

Nous avons ainsi réalisé des mesures de niveaux des lignes d'eau avec un GPS et les débits de la Loire à l'aide de transects ADCP en divers points du bief, pour les 3 débits différenciés ci-après :

- ❑ 150 m³/s, les 27 et 28/09/2011 (coef. de marée 114, le 28/09) pour le levé de la ligne d'eau et 120m³/s du 04/10 au 06/10/2011 pour les transect ADCP
- ❑ 900 m³/s, du 24/01 au 26/01/2012 (coef. de marée 96, le 25/01)
- ❑ 2300 m³/s, du 10/01 au 12/01/2012 (coef. de marée 91, le 11/01)

Le mode opératoire des mesures et les résultats obtenus sont détaillés en annexe 2.

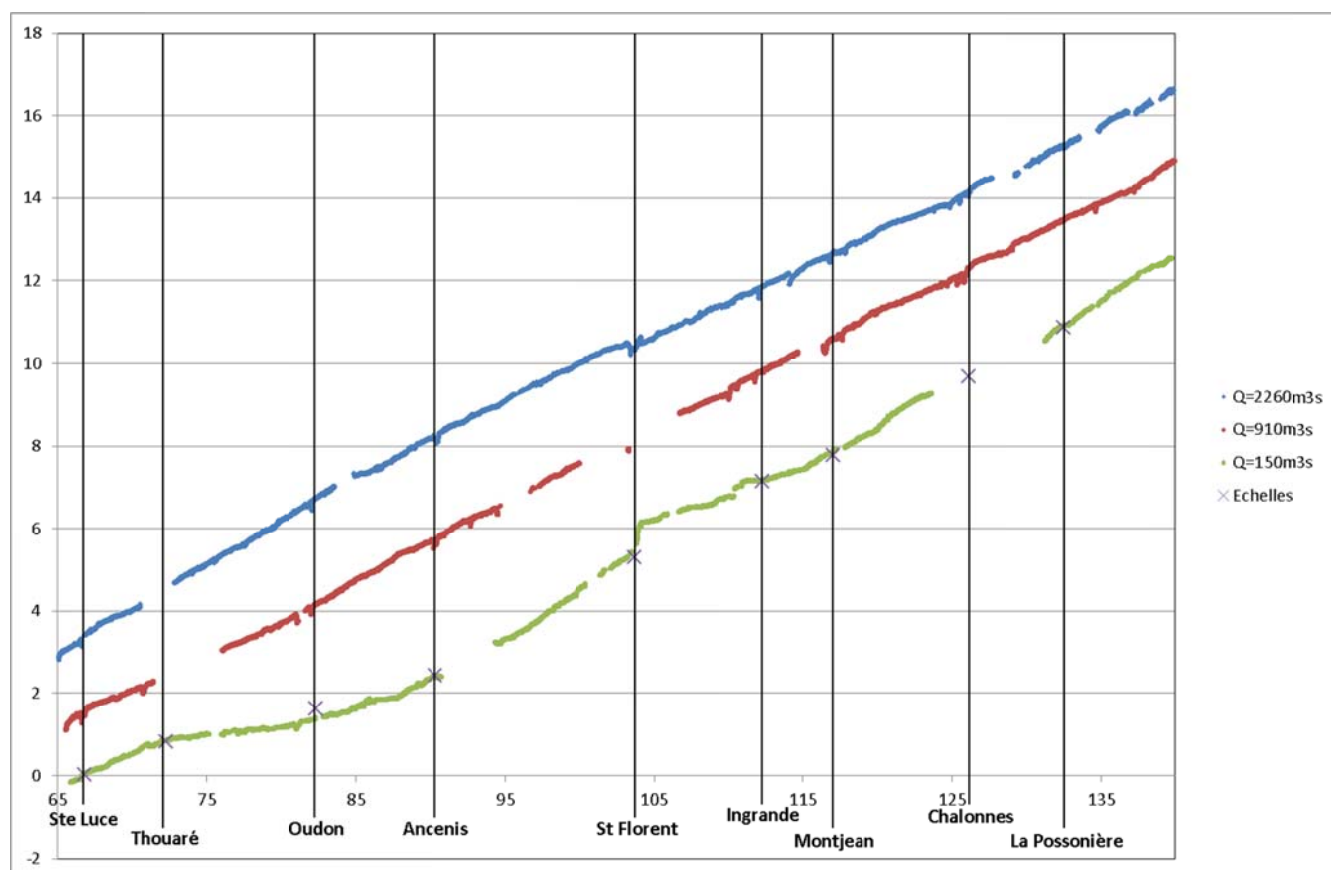


Figure 3-1 : Lignes d'eau de la Loire mesurées entre Sainte-Luce et La Pointe pour des débits de 150, 910 et 2260 m³/s à Montjean (Z exprimé en m IGN69)

¹ LEFORT P., 2009, La Loire des Ponts-de-Cé à Nantes – Phase 2 - Définition et justification des études nécessaires pour l'évaluation des leviers de restauration, 38p. GIP Loire Estuaire

4. CONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE HYDROSEDIMENTAIRE

4.1. CONSTRUCTION DU MODÈLE

4.1.1. Données de bases

La construction du modèle hydrosédimentaire s'appuie sur l'exploitation du MNTU 2010, qui constitue la donnée de base. Le pas spatial du MNTU est de 1 mètre, ce qui représente une information très dense. Le MNTU est analysé avec l'outil « Global Mapper », qui permet de visualiser les reliefs dans les différents bras de Loire, en particulier dans les systèmes d'épis sur lesquels s'appuie l'architecture du modèle.

Les orthophotos sont également utilisées. Les plus intéressantes, car prises en condition d'étiage, sont celles de 2010 pour le Maine-et-Loire et celles de 2004 pour la Loire-Atlantique. Les systèmes d'épis y sont parfaitement visibles.

Ces éléments sont utilisés pour ajuster les objets de la couche « épis » fournie par le GIP, afin qu'ils correspondent au terrain. Cette étape est importante, car elle est ensuite exploitée pour produire l'ossature du modèle.

4.1.2. Construction des domaines 2D des systèmes d'épis

La construction des domaines 2D s'articule autour des objets lignes représentant les épis. Un domaine 2D est délimité par deux épis successifs, et les lignes qui joignent leurs extrémités. Le maillage est ensuite généré sur la base de pas d'espace de l'ordre de 30 à 40 mètres dans le sens transversal, et 100 mètres dans le sens longitudinal. A chaque pavé est affectée une cote de fond moyenne, issue d'une triangulation du MNTU 2010. Cette triangulation est effectuée sur un semi de points légèrement dégradé (inter distance entre les points de 2 mètres) couvrant les secteurs concernés par la présence de domaines 2D.

4.1.3. Construction du domaine filaire

La représentation en domaine filaire est utilisée pour les bras sans système d'épis, et au niveau du chenal vif dans les bras avec épis.

Elle s'appuie sur des profils en travers ou transects définis à intervalle régulier, en moyenne tous les 200 mètres. Ces profils en travers sont généralement les mêmes que ceux utilisés pour l'analyse volumétrique.

Pour chaque transect, le tableau des altitudes en fonction de la distance cumulée est extrait du MNTU, par projection sur le transect de tous les points situés à moins de 2 mètres. Sur chaque profil, on spécifie le cas échéant les 2 points qui constitueront les limites entre lit mineur et lit majeur (rive gauche ou droite). Un traitement est ensuite appliqué pour transcrire ces profils dans la forme simplifiée requise par le logiciel HydraRiv.

4.1.4. Implémentation des singularités

Les singularités à implémenter dans le modèle comprennent :

- ☐ Les seuils et chevrettes qui contrôlent la répartition des débits entre les bras de Loire,

- ☐ Les épis séparant deux mailles du domaine 2D ; ils sont modélisés par des lois de seuils,
- ☐ Les pertes de charge aux ponts.

Les données nécessaires à la définition de ces singularités sont fournies par les levés topographiques disponibles des ouvrages, et par l'inspection des photos aériennes, en ce qui concerne notamment le repérage des brèches le long des épis et des chevrettes.

4.2. CALAGE

4.2.1. Données utilisées

Les données suivantes ont été exploitées :

- ☐ les lignes d'eau mesurées dans le cadre de la présente étude à 150 m³/s, 900 m³/s et 2300 m³/s et les débits mesurés dans les différents bras
- ☐ Les données de la DREAL et du Port Autonome aux limnigraphes et marégraphes, dont la liste est donnée dans le tableau ci-dessous,
- ☐ Les données de la DREAL et du Port Autonome aux mêmes stations pour les deux périodes suivantes au cours desquelles le débit à Montjean était stable :
 - 1^{er} et 2 mars 2011 : débit stabilisé à 790 m³/s, marée moyenne (54 à 72)
 - 13 et 14 janvier 2011 : débit stabilisé à 1570 m³/s, marée de morte eau (37 à 34).

Station	2 mars 2011	14 janvier 2011
La Possonnière	13.00	14.45
Pont de Chalonnes	11.80	13.07
Pont de Montjean	10.14	11.64
Ingrandes	9.30	10.82
Pont de St-Florent	7.74	9.22
Ancenis	5.36	6.90
Pont d'Oudon	(*)	4.56
Mauves	(*)	(*)
Pont de Thouaré	(x)	(*)
Sainte-Luce (pont de Bellevue)	(*)	(*)

(*) : influencé par la marée – (x) : lacune

Liste des limnigraphes – Niveaux en m.NGF-IGN69

4.2.2. Calage de la partie amont (La Pointe – Anetz)

On a procédé au calage en régime permanent en amont d'Ancenis, à l'aide :

- ☐ de la ligne d'eau d'étiage mesurée du 26 au 28 septembre 2011,
- ☐ des niveaux enregistrés aux limnigraphes lors des paliers à 790 m³/s et 1570 m³/s.

Ce calage en régime permanent n'a pas présenté de difficulté particulière, et a été obtenu avec des coefficients de Strickler de 30 à 35, localement 25 :

- ❑ En étiage, les écarts restent généralement inférieurs à 20 centimètres, sauf dans le secteur de Montjean (niveau calculé supérieur à la mesure).
- ❑ Pour les paliers de 790 et 1570 m³/s, les écarts restent inférieurs à 20 cm, y compris à Montjean.

La ligne d'étiage est dans l'ensemble bien reproduite, en particulier les effets de seuils observables au Fresne-sur-Loire et surtout à St-Florent.

4.2.3. Calage de la partie aval (Ancenis – Nantes)

Le calage est réalisé en régime transitoire sur deux cycles de marée en aval. Pour chacune de ces périodes, on impose au Pellerin les niveaux enregistrés par le marégraphe du Port Autonome.

Les calculs de ligne d'eau sont réglés à l'aide des enregistrements limnigraphiques des stations d'Ancenis, Oudon, Mauves, Thouaré, et Ste-Luce sur environ 2 cycles de marées sur les épisodes suivants :

- ❑ 28 septembre 2011 (débit 150 m³/s)
- ❑ 2 mars 2011 (débit 790 m³/s)
- ❑ 14 janvier 2011 (débit 1570 m³/s).

Dans chaque cas, on impose au Pellerin les niveaux enregistrés par le marégraphe du Port Autonome.

Pour l'épisode d'étiage, avec une marée de vive eau, le modèle ne permet pas de restituer fidèlement les courbes enregistrées sur les 5 stations à la fois :

- ❑ Un jeu de Strickler haut (30 à 45) permet de restituer à peu près convenablement les courbes à Ste-Luce et Ancenis (avec un marnage un peu sous-estimé), les marnages à Thouaré, Mauves et Oudon sont alors nettement surestimés, et il en résulte des niveaux de basse mer trop bas,
- ❑ Un jeu de Strickler plus faibles permet d'améliorer les résultats à Thouaré, Mauves et Oudon, le marnage à Ancenis est alors sous-estimé (jusqu'à près de 50 %).

Avec l'objectif de calage sur l'épisode d'étiage, on obtient pour les deux autres épisodes des niveaux calculés très supérieurs aux mesures aux stations de Ste-Luce, Thouaré (lacune pour l'épisode 790 m³/s), Mauves, Oudon, et trop bas à Ancenis.

L'explication de ces divergences peut provenir de la mobilité des fonds dans un secteur constamment soumis à des variations de vitesses avec inversions, sous l'influence de la marée.

4.2.4. Synthèse des résultats

Nous avons retenu de caler la partie en aval d'Ancenis pour le régime de débit moyen, sur la base de l'épisode à 790 m³/s des 1^{er} et 2 mars 2011. Le calage est obtenu avec des coefficients de Strickler variant de 27 à 35.

Les résultats sont donnés en annexe 4 et synthétisés dans le tableau ci-dessous. Le profil en long des coefficients de Strickler retenus figure dans la même annexe.

On retrouve assez bien par les calculs les enregistrements disponibles pour cet épisode, avec des écarts n'excédant pas 15 cm. Toutefois, le marnage observé à la station d'Oudon (30 cm) n'est pas totalement restitué par la simulation (15 cm), à noter cependant que cette station est jugée non fiable par la DREAL.

Pour les deux autres épisodes, les résultats sont les suivants :

- ❑ 1570 m³/s : écart de +15 à +25 cm à Bellevue, de -30 cm à Thouaré à la basse mer, de -30 cm à Oudon, bon résultats à Mauves et Ancenis,
- ❑ 150 m³/s : bon résultat à Bellevue, écart de -30 à -40 cm à Thouaré, Mauves et Oudon, marnage sous-estimé de moitié à Ancenis (60 cm, au lieu de 1,20 m sur les enregistrements).

Station	28 septembre 2011 (150 m ³ /s)	2 mars 2011 (790 m ³ /s)	14 janvier 2011 (1570 m ³ /s)
Coefficient de marée	114	72	34
La Possonnière	-15 cm	< -5cm	-12 cm
Pont de Chalonnes	-15 cm	+10 cm	+12 cm
Pont de Montjean	+ 20 cm	< -5 cm	-10 cm
Ingrandes	Pas d'écart	< +5 cm	< -5 cm
Pont de St-Florent	+5 cm	-5 cm	-10 cm
Ancenis	-25 (PM) à +30 cm (BM) Marnage : 0,60 m au lieu de 1,20 m observé	Pas d'écart	+ 10 cm
Pont d'Oudon	-10 (PM) à -40 (BM) Marnage : 1,95 m au lieu de 1,60 m observé	-10 (PM) à +10 cm (BM) Marnage : 0,30 m au lieu de 0,15 m observé	+30 cm
Mauves	-30 (BM) à -35 cm (PM)	-5 cm	-5 cm (BM)
Pont de Thouaré	-40 (PM) à -45 cm (BM)	Pas de mesure	-10 (PM) à -30 cm (BM)
Sainte-Luce (pont de Bellevue)	< +10 cm	+10 cm	+20 (BM) à +25 cm (PM)

4.3. EXPLOITATION DU MODULE HYDRO SÉDIMENTAIRE

4.3.1. Traitement de l'hydrogramme amont

L'hydrogramme amont correspond à la chronique des débits de Loire enregistré à Montjean.

Afin de limiter les temps de calculs, la chronique des débits a été simplifiée, et schématisée sous la forme de paliers de débits constants autant que possible. Pendant ces paliers de débit, après stabilisation du régime d'écoulement sur l'ensemble de la zone d'étude, le pas de temps de calcul peut être fortement augmenté dans le cadre de la procédure automatisée de pas de temps adaptatif implantée dans HYDRARIV.

4.3.2. Traitement de la condition limite aval

Le principe de simplifier les calculs à l'aide de régimes permanents sur des paliers de débit constant, comme indiqué précédemment, implique de simplifier la condition à la limite aval, en remplaçant les cycles de marée au Pellerin par des niveaux d'eau constants équivalents en terme de transport solide.

L'équivalence sur le transport solide est recherchée au niveau de Bellevue. La procédure de calcul de la courbe $Z(Q)$ au Pellerin est expliquée au §2.2.5).

4.3.3. Diamètre caractéristique des alluvions

Le modèle hydrosédimentaire prend en considération un diamètre caractéristique des grains sans distinction des différentes entités morphologiques constituées par le chenal principal, les bancs entre les épis et les bras secondaires.

Par soucis de simplification, un diamètre unique de 1,2 mm a été retenu. Il correspond au diamètre médian mesuré dans le chenal principal (cf. §2.2.4). De plus, cette valeur a permis de reconstituer le volume estimé des apports provenant de l'amont.

4.3.4. Principaux calculs réalisés

Le tableau ci-après récapitule les différentes combinaisons de données utilisées pour les calculs en situation actuelle et avec les différents leviers d'actions envisagés

Principales simulations testées

Test	libellé	observations
S1	scénario tendanciel (sans travaux) avec seuils du Fresne	configuration actuelle des seuils
S2	suppression des systèmes d'épis dans le bras principal	
S3	ouverture bras secondaire sans chenal pilote	calage des chevrettes pour maintien du contrôle des lignes d'eau à l'étiage, suppression des points durs et systèmes d'épis dans les bras secondaires
S5	perte de charge 1m à Bellevue et 0.5m à Ancenis	Perte de charge réellement modélisée à Bellevue et réduite de moitié à Ancenis
S8	scénario tendanciel sans seuil de Fresne	S1 sans seuils
S9	Scénario tendanciel avec seuil de Fresne restauré	S1 + rétablissement perte de charge initiale au droit des deux seuils (0.5 m au total)
S10	perte de charge 1m à Bellevue, Ancenis, Cellier, Ingrandes et Alleud	Perte de charge réellement modélisée à Bellevue et considéré sur les autres sites
S11	épis à radiers barrant les bras navigables de Chalonnes, île Coton, S.Florent, Pierre-Percée, pour réalimentation des bras secondaires	
S12	Rampes sous fluviales : Bellevue (PK62), Mauves sur Loire (PK 72),Oudon (PK82), Ancenis (Pk90), le Marillais (PK 99)	
S13	S2+S3	
S112	S11+S2+S3	
S132	S2+S3+S5	
P203	Programmation de travaux avec suppression des épis entre La Pointe et Mauves, ouverture des bras secondaires de Neuves Macrières, Varades et Saint Georges, terrassement en déblai des bancs de Oudon et de Mauves	
P2032	scénario 203 avec suppression ou raccourcissement des épis à Ingrandes	Ingrandes :Suppression des épis dans le bief 701 sauf banc rive gauche au droit du pont pour lequel les épis sont raccourcis à une longueur de 3 pavés à partir de la berge
P2033	scénario 203 avec arasement des épis à Ingrandes	Ingrandes :arasement des épis dans le bief 701 à une profondeur de -1.0 m/cote actuelle
P2034	scénario 203 avec raccourcissement des épis à Ancenis	Ancenis : raccourcissement épis du bief 709 (2 pavés à partir berge RD)- raccourcissement des épis du bief 710 en rive gauche au droit du pont et en rive droite en aval immédiat (laisser longueur équivalente aux 3 pavés depuis la berge)
P2035	scénario 203 avec arasement des épis à Ancenis	Ancenis : arasement épis des biefs 709 et 710 en rive gauche au droit du pont et en rive droite en aval immédiat à -1m/cote actuelle
P2036	scénario 203 avec raccourcissement des épis à Oudon	Oudon : raccourcissement des épis du banc rive gauche en aval du pont (bief 712) à 4 pavés à partir de la berge
P2037	scénario 203 avec arasement des épis à Oudon	Oudon : raccourcissement des épis du banc rive gauche en aval du pont (bief 712) à 4 pavés à partir de la berge et arasement des longueurs restante à cote -1.0 m/cote actuelle
P2038	scénario 203 avec raccourcissement des épis à Mauves	Mauves : raccourcissement des épis du banc rive gauche en amont du pont (bief 714) à 4 pavés à partir de la berge sur moitié amont du banc et 3 pavés sur moitié aval
P2039	scénario 203 avec raccourcissement/arasement des épis à Ingrandes, Ancenis, Oudon et Mauves	Ingrandes :Suppression des épis dans le bief 701 sauf banc rive gauche au droit du pont pour lequel les épis sont raccourcis à une longueur de 3 pavés à partir de la berge Ancenis : suppression épis du bief 709 - raccourcissement des épis du bief 710 en rive gauche au droit du pont et en rive droite en aval immédiat (laisser longueur équivalente aux 3 pavés depuis la berge) Oudon : raccourcissement des épis ou arasement Mauves : raccourcissement des épis du banc rive gauche
20310	Scénario combinant les différentes optimisations en terme de remodelage des épis et ouverture des bras	- maintien des épis dans bief 747, 748, 749, sauf aval 709 pour permettre l'entonnement des débits dans bras de St Georges - suppression des épis dans bief 750 - maintien des épis dans bief 751, 752 et 753, 754 et 755 - arasement des épis à -1 m dans bief 701 - maintien des épis dans bief 702 - suppression des épis dans bief 703, 704 avec maintien de la chevette barrant l'entrée du bras de varade - raccourcissement des épis dans bief 706, 707, 708 - arasement des épis à -1m dans bief 709 et 710 - suppression des épis et de la chevette barant le bras de Neuve Macrière - suppression des épis dans bief 711 - Bief 712 : raccourcissement des épis à Oudon en rive gauche et suppression des épis en rive droite - arasement des épis dans bief 713 - raccourcissement des épis dans bief 714 - ouverture du bras de la Sauterelle : suppression des épis et chevette à l'entrée du bras (bief 715) - maintien des épis dans bief 716, 717 et 718
2071b	Scénario d'actions optimisés avec Bellevue et avec rechargement lit dans bras de Champtoceaux	chevrettes des bras secondaires calées au dessus de la ligne d'eau d'étiage

5. EVOLUTION PROBABLE DU LIT SANS INTERVENTIONS (SCENARIO TENDANCIEL)

5.1. PARAMÈTRES MORPHOLOGIQUES DU LIT ACTUEL

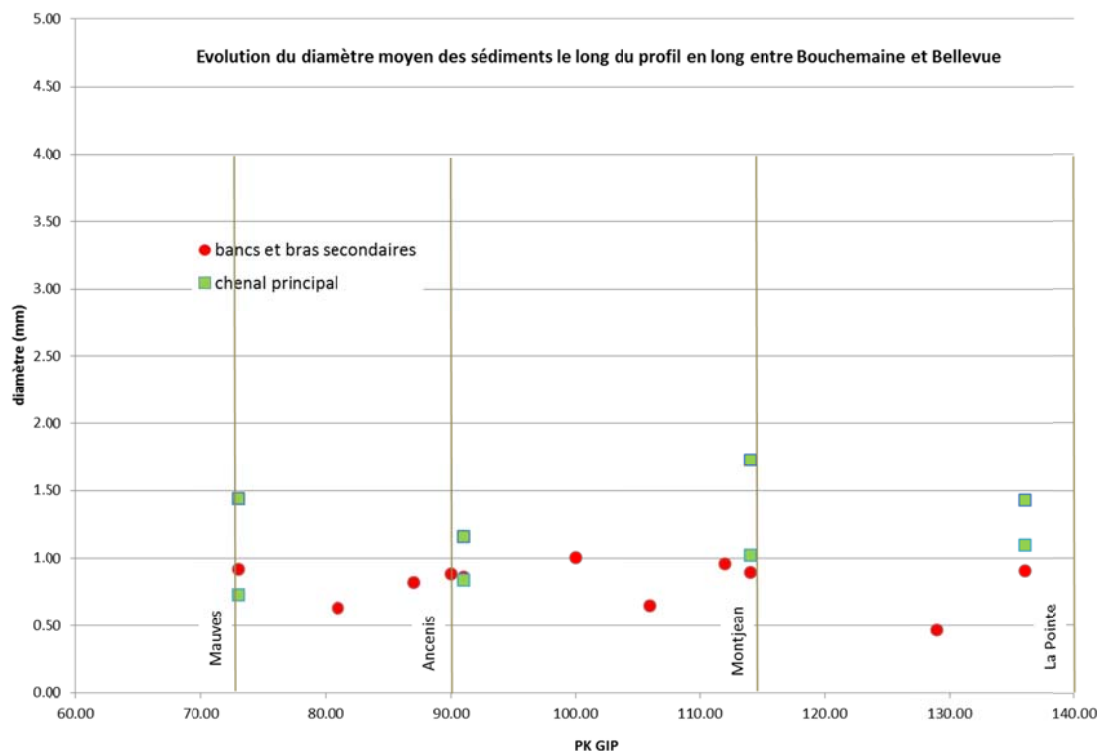
5.1.1. Granulométrie des alluvions

La granulométrie des alluvions est précisée au §2.2.4. L'analyse détaillée des fuseaux granulométriques obtenus par les différentes campagnes de prélèvement est reportée en annexe 1.

D'un point de vue du fonctionnement morphologique de la Loire, les résultats des analyses granulométriques ne semblent pas mettre en évidence de tri granulométrique de l'amont vers l'aval ni de disparité dans le profil en long qui pourrait résulter de l'apport des affluents. Ces derniers ne jouent d'ailleurs pas de rôle un rôle significatif dans la dynamique alluviale du fleuve.

Les sédiments de Loire se caractérisent ainsi par :

- ☐ Une même origine (sédiments provenant majoritairement du bief amont)
- ☐ Une faible différenciation de la taille des grains avec la profondeur (absence de véritable pavage)
- ☐ Un fuseau granulométrique resserré
- ☐ Une différenciation de la taille des grains le long du profil en travers du lit ; les grains les plus grossiers se situant plutôt en fon de chenal et les grains plus fin en partie sommitale des bancs.



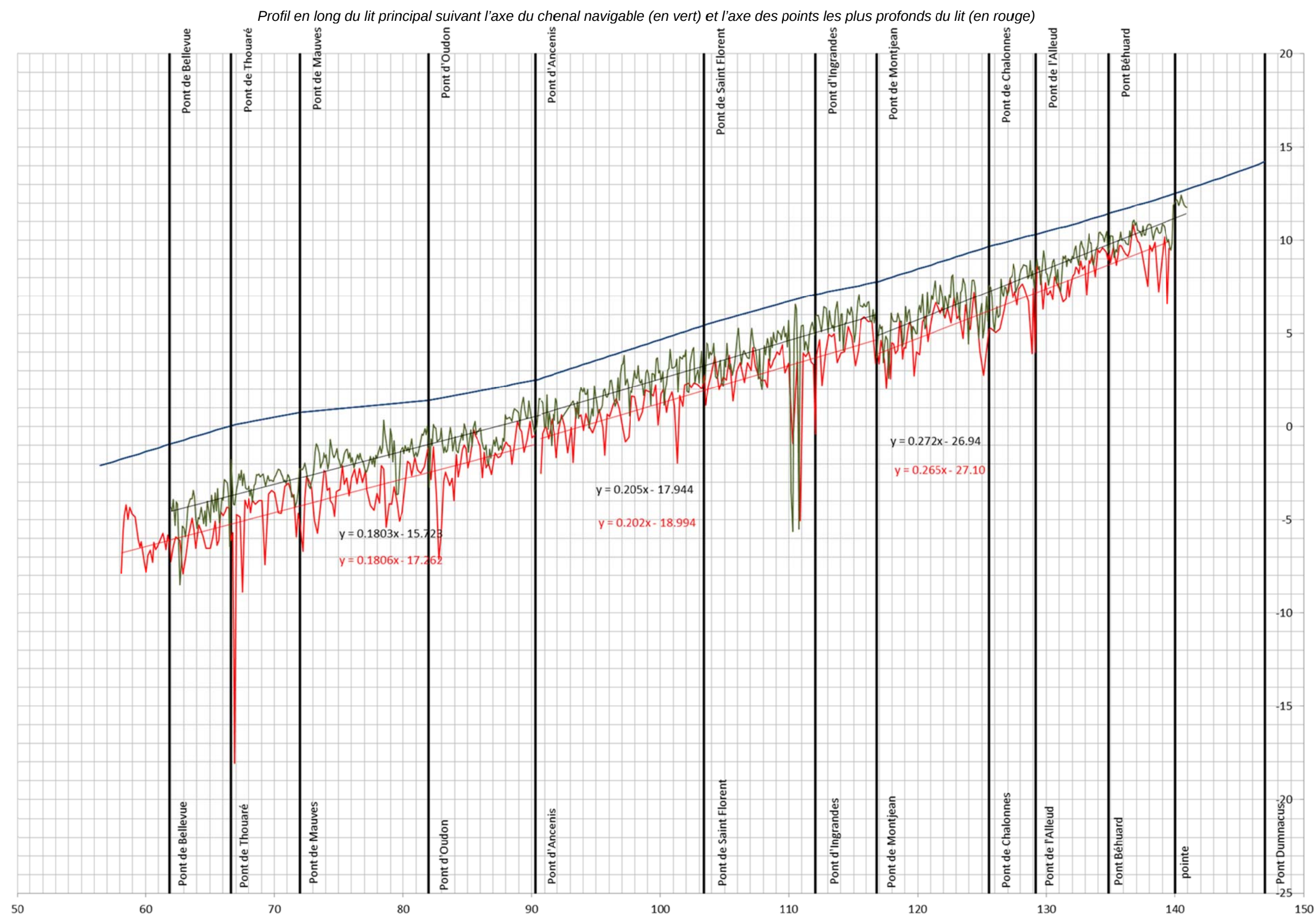
5.1.2. Structures des pentes du chenal principal

Le MNTU de 2009/2010 réalisé par le GIP Loire permet de reconstituer les profils en long du chenal principal de la Loire (lit navigable) et des principaux bras secondaires.

Le profil en long du chenal principal de Loire a été analysé en considérant deux tracés différents : l'axe médian du chenal navigable et l'axe passant par les points les plus bas du chenal.

Cette analyse met en évidence les principaux résultats détaillés ci-après.

- ☐ La structure des pentes est identique pour les deux tracés considérés ;
- ☐ La différence d'altitude moyenne des fonds entre les deux tracés est de 1.5 m environ ;
- ☐ On peut différencier schématiquement trois tronçons de pente respectivement décroissante de l'amont vers l'aval :
 - **La Pointe – Montjean.** La pente moyenne du lit est de 0.26‰ à 0.27‰. Ce tronçon apparaît plus incisé que les deux autres tronçons plus aval. Ce secteur se caractérise en effet par le long bras étroit et navigable de Chalonnes qui concentre l'essentiel des débits de basses eaux tandis que le bras secondaire de Saint-Georges, barré en amont par la chevette de l'Alleud, se situe à 2.5 m au-dessus du fond du chenal principal.
 - **Montjean – Ancenis.** La pente moyenne du lit est de 0.20‰. Ce tronçon est sans doute le moins incisé des trois. On note en effet un rehaussement relatif des cotes de fond de près de 0.5 m par rapport au tronçon précédent et de 0.2 m par rapport au tronçon suivant.
 - **Ancenis - Bellevue.** La pente moyenne du lit est de 0.18‰. Ce secteur est marqué par plusieurs seuils naturels qui ont été arasés pour les besoins de la navigation dans les années 1970-1980. On peut ainsi citer les seuils rocheux de l'île perdue à Champtoceaux (1970), de Bellevue (1975), des Folies Siffait (1976), Cul du Moulin (1983), Ancenis (1984). 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.
- ☐ 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 0.17‰ comme le montre le profil en long général reporté sur la figure ci-après.
- ☐ L'évolution actuelle du fond s'inscrit vraisemblablement dans un processus transitoire d'érosion régressive avec pour conséquence une croissance de la pente de l'aval vers l'amont. Ce processus devrait se poursuivre si aucune perturbation ne vient l'entraver (augmentation de la charge amont, remobilisation de matériaux présents dans le lit, piégeage des matériaux mobilisés en fond de chenal,...) et tant que la pente n'a pas retrouvée une valeur permettant d'équilibrer la capacité de transport du fleuve avec sa charge solide.
- ☐ On note la présence de profondes fosses dans le chenal principalement à la hauteur du pont de Thouaré, en amont du pont d'Oudon, au droit du pont d'Ingrandes et en aval des seuils à échancrure du Fresne-sur-Loire. Ces fosses ont des profondeurs comprise entre 4.0 m et 14.0 m (pont de Thouaré). La fosse en aval des seuils correspond à la fosse d'affouillement lié aux rétrécissements du lit au droit des échancrures. La fosse du pont de Thouaré très profonde et sans doute liée à des extractions.



5.1.3. Altimétrie des bras secondaires

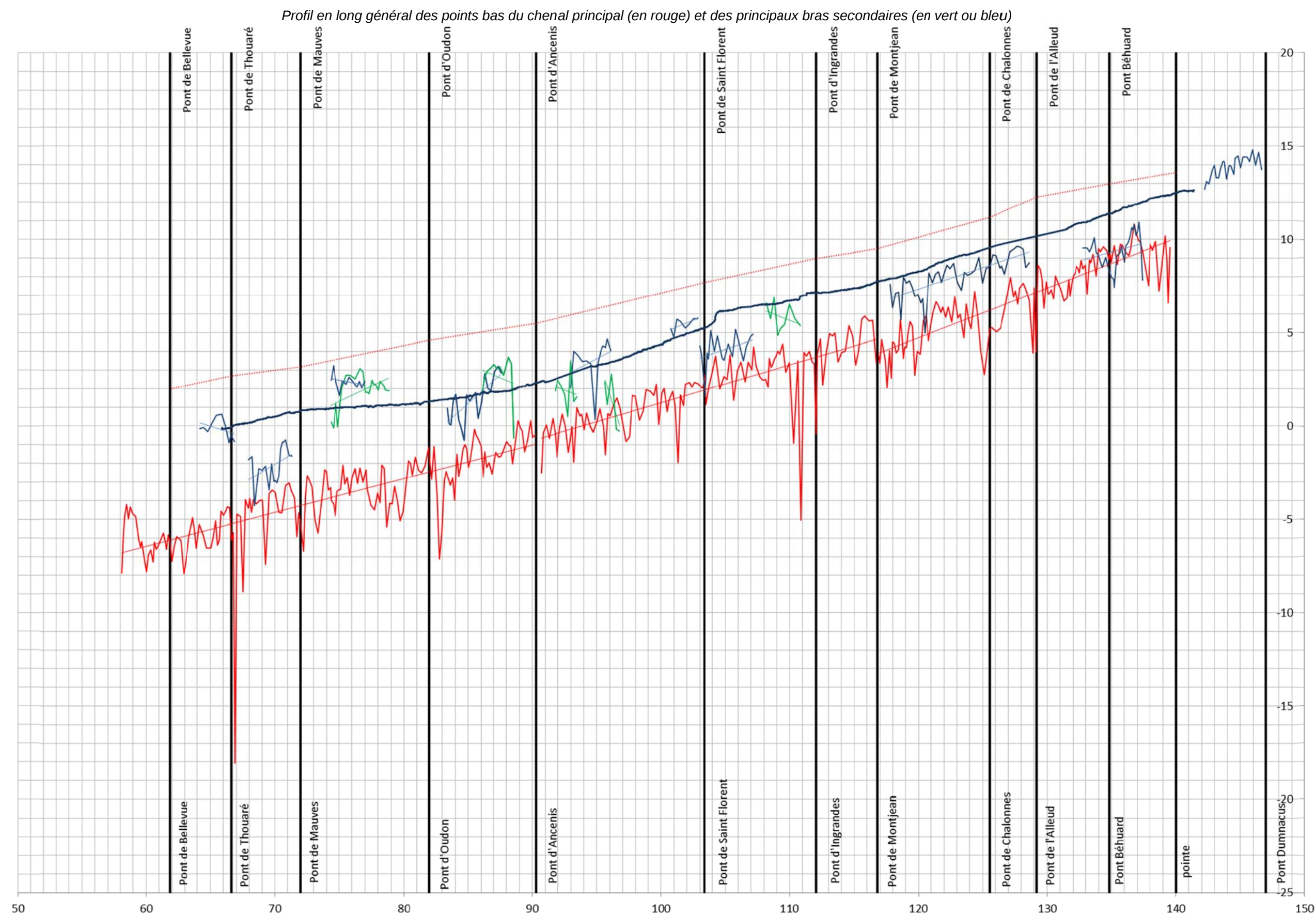
Les bras secondaires apparaissent tous plus ou moins fortement perchés par rapport au bras principal. Le tableau ci-après donne les valeurs de pente et les hauteurs moyennes du lit au-dessus du fond moyen du chenal principal, de la ligne d'eau d'étiage actuelle et de la ligne d'eau de référence du début du 19^{ème} siècle.

Bras	PKamont	PKaval	pente (‰)	hauteur du fond /fond chenal principal (m)	profondeur /étiage de référence (m)	profondeur /étiage de référence	abaissement de la ligne d'eau d'étiage (m)
Guillemette	138.5	133	0.195	0.5	2.1	4	1.5
St Georges	129	117	0.23	2.3 à 2.7	<1	2.7	1.7
Cul de Bœuf	111	108	-0.26	2.7	0.9	3	2
Varades	107.5	102.5	0.237	1.9	1.8	3.9	2.3
Meilleraie	103	100	0.288	3.9	-0.4	2.4	2.5
Bernadeau	96.5	93	0.364	4.4 à 2.5	- 0.7 à 1.4	2.5 à 4.5	2.8
Brevet	89	86	-0.29	3.5 à 4.8	0 à -1.1	3.4 à 2.3	3.2
Neuve Macrière	88.5	83	0.616	4.4 à 2.5	- 0.6 à 1.5	2.5 à 4.5	3.2
Sauterelle	72	68	0.399	2.9 à 2.2	1.1 à 2.1	4.6 à 5.6	4

Ce tableau appelle les principales remarques ci-après :

- ❑ Les profondeurs moyennes correspondent au fond lissé et ne constituent pas des profondeurs minimum. Ces dernières correspondent en générale à des valeurs inférieures de 1.0 à 1.5 m à celles des profondeurs affichées dans le tableau.
- ❑ Les lits secondaires sont en général « perchés » au-dessus du lit principal d'une hauteur comprise entre 1.9 m (bras des Varades) et 4.4 m (bras Bernadeau). 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 constatée entre le début du 19^{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 des 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.

On observe par ailleurs, une variabilité importante des pentes qui sont comprises entre -0.29‰ (bras des Brevets) et 0.616‰ (bras de l'île de Neuve-Macrière). Cette variabilité résulte vraisemblablement des conditions de mise en eau qui peuvent être très différentes d'un bras à l'autre en fonction de la configuration des chevrettes amont barrant les bras. Lorsque les différences de niveau entre les deux bras sont peu sensibles, les pentes sont relativement proches (Varades, Guillemette). Lorsque les bras secondaires sont franchement perchés (Sauterelle, Bernadeau, Brevet, Meilleraie), leurs pentes s'écartent sensiblement de la pente générale de la Loire, et sont en général supérieures.



5.1.4. Singularités

Même si l'incision du fond peut approcher 4 m en aval du périmètre d'étude, la Loire coule encore sur ses alluvions, le substratum rocheux se situant encore à plusieurs mètres sous le fond actuel (voir profil en long ci-dessous). Il existe néanmoins quelques singularités soit liées au cadre structural de la vallée, soit liées à des actions anthropiques (ouvrages dans le lit).

Concernant le cadre structural de la vallée de la Loire entre Montjean et Nantes, cette dernière est marquée par plusieurs éléments géologiques et géomorphologiques :

- ❑ La cluse de Cellier. Elle constitue un verrou remarquable dans le paysage dans la mesure où la largeur de la vallée se trouve réduite à environ 950 m alors que les vals de Loire en amont et en aval s'étendent sur une largeur pouvant dépasser 3.5 km. Cette cluse est marquée par un certain nombre d'affleurements rocheux dont les plus remarquables sont : Ile perdue, Folies Siffait, Cul du Moulin, Patache.
- ❑ Les autres seuils rocheux naturels liés à la remontée du substratum. La plupart des seuils avaient été recensés par Yves Babonaux (Etude d'hydrodynamique fluviale 1966). On peut ainsi citer le platier rocheux de Bellevue (rive droite), Thouaré (rive droite) et le seuil schisteux dans le secteur de la Possonnière (les fondations du pont de l'Alleud reposent sur ce seuil).

Pour les besoins de la navigation, certains seuils ont été arasés : c'est le cas de Thouaré et de la Possonnière. A noter que sur le site de Bellevue, il s'agit plutôt d'un déplacement du chenal de navigation vers le sud, pour éviter le platier rocheux, que d'un réel arasement ; le seuil naturel a alors perdu son rôle de contrôle du profil en long du fleuve.

Plusieurs fosses d'extractions ont marqué plus ou moins profondément le lit. Ces fosses sont partiellement voire complètement comblées pour certaines d'entre elles (exemple de la fosse de Montjean), d'autres présentent encore des profondeurs importantes (Thouaré, Oudon, Ingrandes).

5.1.5. Seuils du Fresne-sur-Loire

Réalisés dans le cadre du Programme Interrégional Loire Grandeur Nature 2000/2006, la réalisation de l'opération expérimentale des seuils au Fresne-sur-Loire / Ingrandes avait pour objectif initial de relever ce niveau de 0,50 m, de réalimenter les annexes hydrauliques, bras secondaire de Cul-de-Bœuf et boire de Champtocé, et de favoriser le processus de « remous sédimentaire » pour remonter le fond du lit en amont de l'ouvrage.

En situation initiale, l'impact des ouvrages a été globalement positif par rapport à la sédimentation du bief amont (engravement à long terme sans doute de l'ordre 10 à 50 cm) et à la reprise des matériaux dans le bras secondaire de Cul de Bœuf.

En situation actuelle, la perte de charge a été réduite à 25 cm en débit d'étiage, les ouvrages ont un effet relativement neutre sur la sédimentation mais l'effet résiduel sur alimentation du bras de Cul de Bœuf reste positif.

Dans la suite de l'étude, ces ouvrages ont été modélisés dans leur configuration actuelle, c'est-à-dire avec une perte de charge réduite.

5.2. PRÉVISIONS SUR 75 ANS DE L'ÉVOLUTION DES FONDS

Sans intervention dans le lit de la 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 en considérant une hypothèse basse du transport solide (charge solide amont correspondant à 60% de la capacité théorique de charriage du fleuve), 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 (80% de la capacité théorique de charriage), l'incision se fait sentir essentiellement sur le secteur Ancenis-Oudon ; ailleurs les fonds seraient stables.

Il convient de signaler cependant que cette hypothèse de transport par charriage correspond à une charge solide annuelle supérieure aux estimations avancées par certains auteurs. A titre d'information, les mesures faites par l'université de Tours dans le lit de la Loire en amont de la confluence de la Vienne conduisent à une estimation du transport solide annuel sur le fond de 260 000 m³ (rappelons ici que, pour les besoins de l'étude, la moyenne interannuelle de matériaux rentrant dans le bief d'étude a été estimée entre 270 000 et 360 000 m³/an).

Evolution des fonds moyens (en mètre) 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

Evolution des fonds moyens (en mètre) 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 affectées 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 joue 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 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 du risque de réchauffement climatique (chronique 1945-1985 et cote du niveau moyen de la mer de +0.21 m).

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

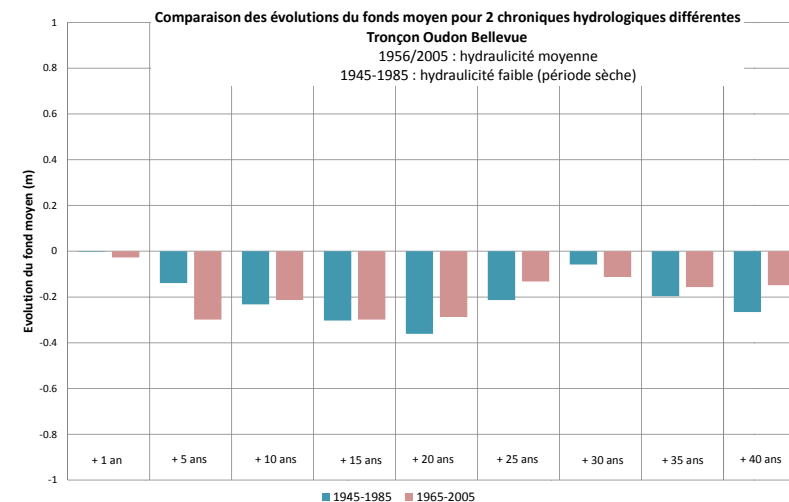
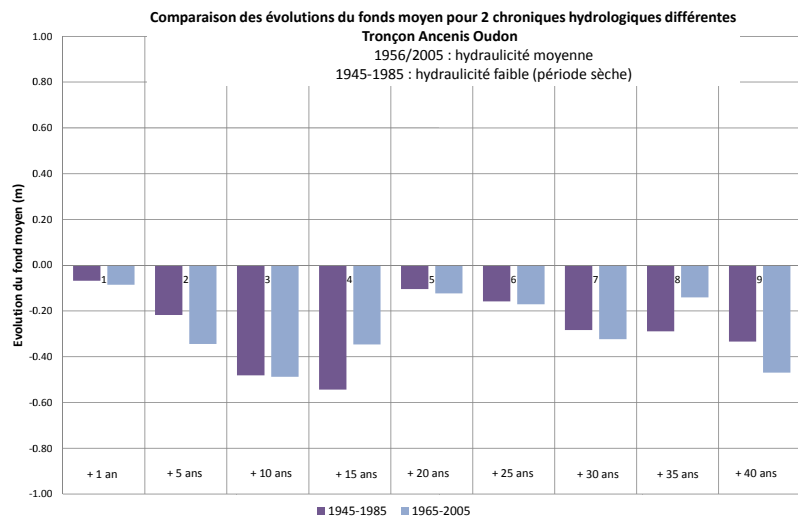
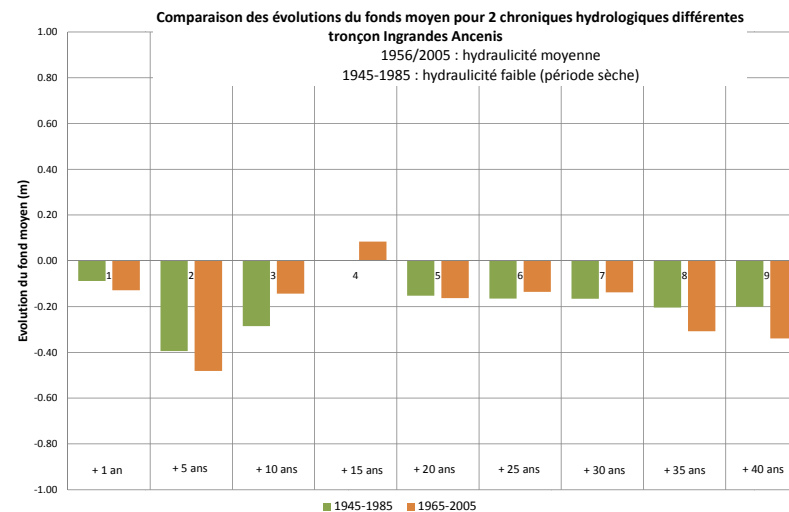
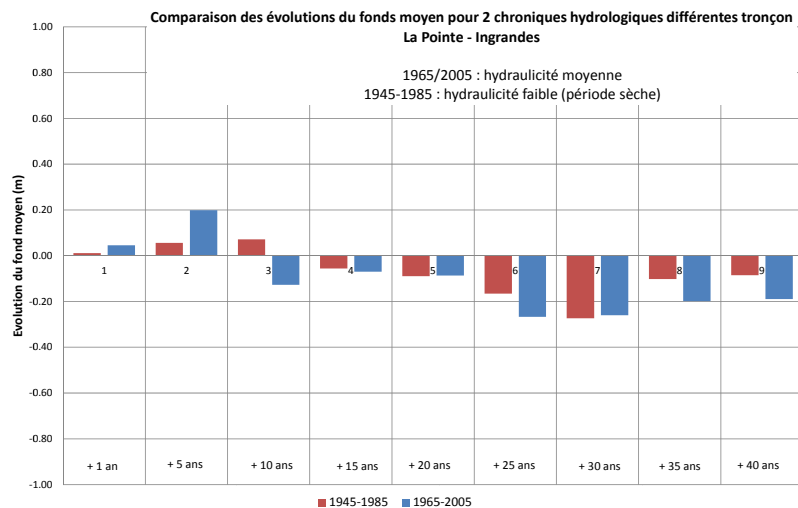
- ❑ L'élévation du niveau moyen de la mer de +0.21 m n'a pas d'effet sensible sur le bilan sédimentaire du fleuve. On note seulement un très léger effet bénéfique sur le fond du lit avec une diminution de l'incision de 1 à 3 cm entre Ancenis et Oudon.
- ❑ L'effet d'une variation des cycles hydrologiques sur l'évolution du fond du lit peut être évalué à ± 15 cm. C'est ce que montrent les résultats, présentés sur les graphes page suivante, 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 entre les deux hypothèses de charge solide provenant de l'amont.

5.3. CONCLUSIONS

Les résultats du modèle hydraulique et hydrosédimentaire de la Loire effectués sur une chronique de 40 ans permettent de tirer les principaux enseignements ci-après :

- ❑ Les tendances d'évolution du lit précisées ci-avant masquent une variabilité des fonds beaucoup plus importante liée au régime hydrologique du fleuve. Il convient donc d'avoir toujours à l'esprit cette dynamique qui peut entraîner d'une année sur l'autre des évolutions rapides des bancs et du fond du lit de l'ordre du mètre à certains endroits.
- ❑ Quel que soit le scénario retenu de charge solide provenant de l'amont, la tendance à long terme correspond à une poursuite de l'érosion des fonds qui se manifeste essentiellement à l'aval d'Ingrandes. Cette poursuite de l'érosion tend à augmenter un peu plus la pente générale des lignes d'eau, qui elle-même peut être de nature à accentuer le processus d'érosion régressive.
- ❑ Dans le même temps, les bras secondaires suivent très progressivement une tendance à l'accrétion. Cette tendance, si elle est toutefois peu marquée met en évidence néanmoins l'absence réelle de contribution des matériaux des bras secondaire au transit solide et à la recharge sédimentaire dans le lit principal.

Scénario tendanciel - Evolution des fonds pour les deux chroniques hydrologiques 1965-2005 et 1945-1985



6. LEVIERS POSSIBLES D'INTERVENTION DANS LE LIT ET REPONSES SEDIMENTAIRES

6.1. STOCK ALLUVIAL PRÉSENT DANS LE LIT

6.1.1. Méthodologie générale

La capacité de réengrèvement du lit dépendra pour partie du stock de matériaux disponible dans les marges du lit (bras secondaires et systèmes d'épis).

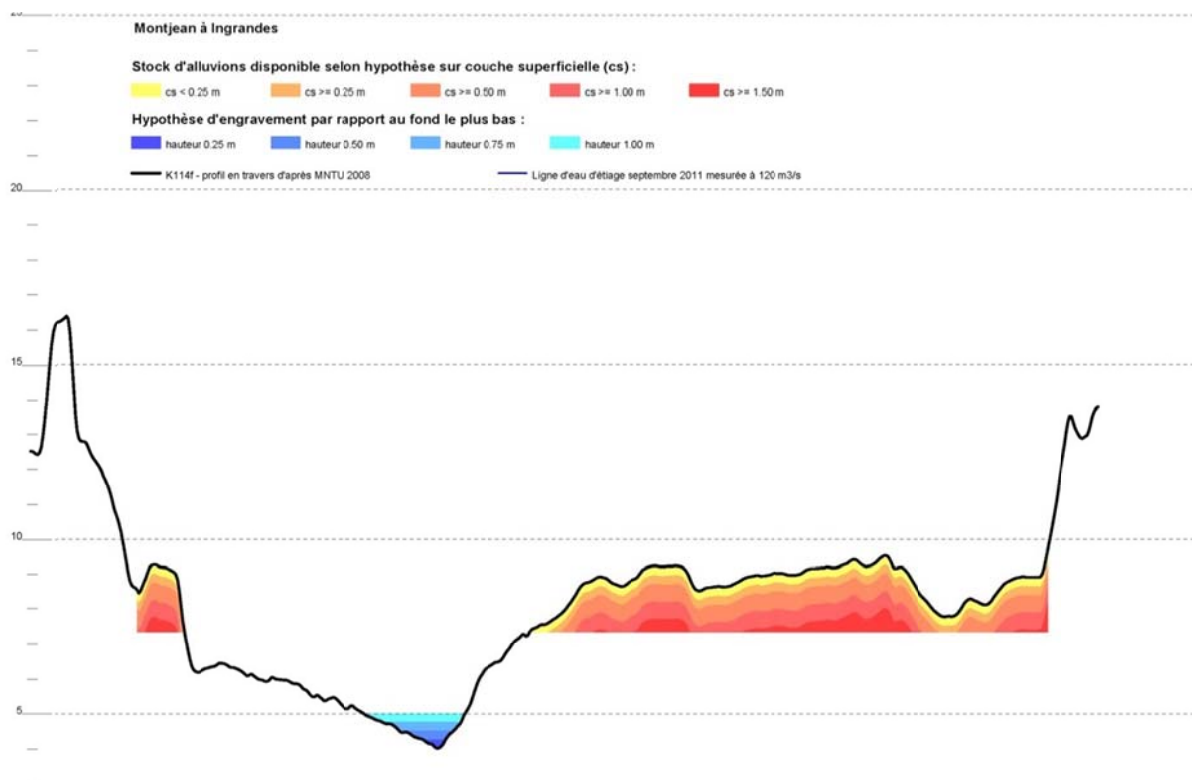
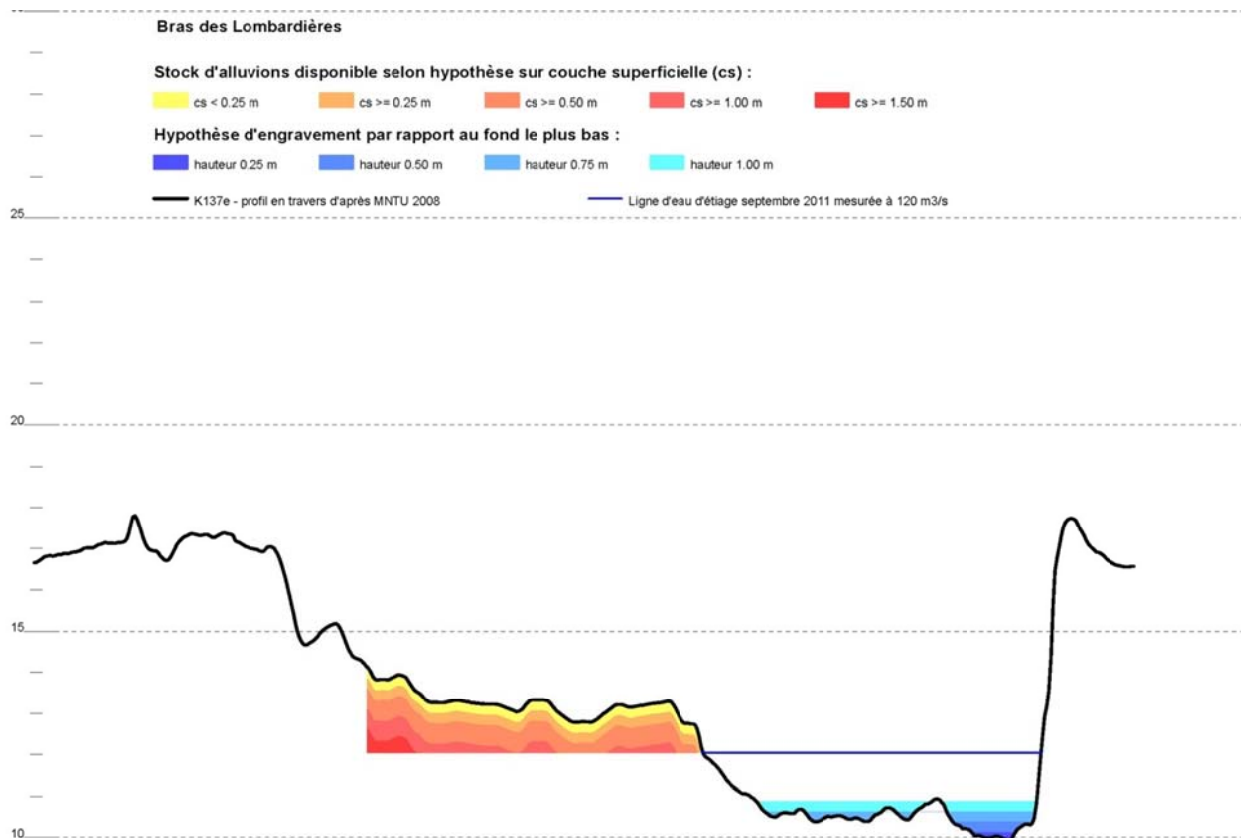
L'estimation de ce volume a été faite par analyse des profils en travers du lit tous les 100 à 200 m environ à partir de l'exploitation du MNT 2010.

Le « stock disponible sur une épaisseur h de matériaux » est le volume théorique de matériaux présent dans la couche superficielle située à une profondeur h sous les côtes du fond actuel.

Afin d'estimer ces stocks, les différentes tâches suivantes ont été réalisées :

- ☐ Positionnement sur chaque profil en travers du niveau d'étiage issu de la campagne de mesures de 2011 ;
- ☐ Calcul pour chaque profil en travers du volume linéique de matériaux situés au-dessus de la ligne d'eau d'étiage et correspondant à différentes profondeurs sous le plancher alluvial actuel : 0.25 m, 0.50 m, 1.0 m, 1.5 m ;
- ☐ Calcul des volumes cumulés par bief et par classe de profondeur ;
- ☐ Estimation des volumes de sable piégé entre les anciens épis de navigation et déposés dans les bras secondaires ;
- ☐ Calcul pour chaque profil du volume linéique d'engrèvement dans le fond du chenal pour différentes hypothèses de rehaussement du plancher alluvial (+0.25, +0.50, +0.75, +1.0 m).

La figure ci-après illustre la démarche appliquée pour le calcul de ces volumes.



6.1.2. Estimation du volume piégé entre épis et dans les principaux bras secondaires

L'estimation globale des volumes sédimentaires situés dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaires est présentée dans les tableaux et sur la figure ci-après.

Volume de matériaux situé au-dessus de la ligne d'eau d'étiage dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaires

bief	Bras	PK début	PK fin	longueur	volume disponible total
		Km	Km	Km	Millions de m ³
Systèmes d'épis					
50	La Pointe - Montjean	139.56	116.54	23.02	1.97
1	Montjean - Ancenis	116.73	90.57	26.16	5.95
11	Ancenis -Nantes	90.36	58.10	32.26	4.70
Bras secondaires					
150	St George	128.62	117.55	11.08	1.69
147	Guillemette	137.40	90.89	46.51	0.09
102	Cul de Bœuf	110.83	108.17	2.67	0.93
4	Varades	107.14	103.01	4.13	0.71
105	Meilleraie	102.87	100.74	2.13	0.61
111	Neuve Macrière	87.56	83.38	4.19	0.85
115	Sauterelle	71.33	67.93	3.39	0.85
117	Thouaré	66.84	64.20	2.64	1.07

Volumes de matériaux dans les systèmes d'épis et bras secondaires calculés par tranche de profondeur

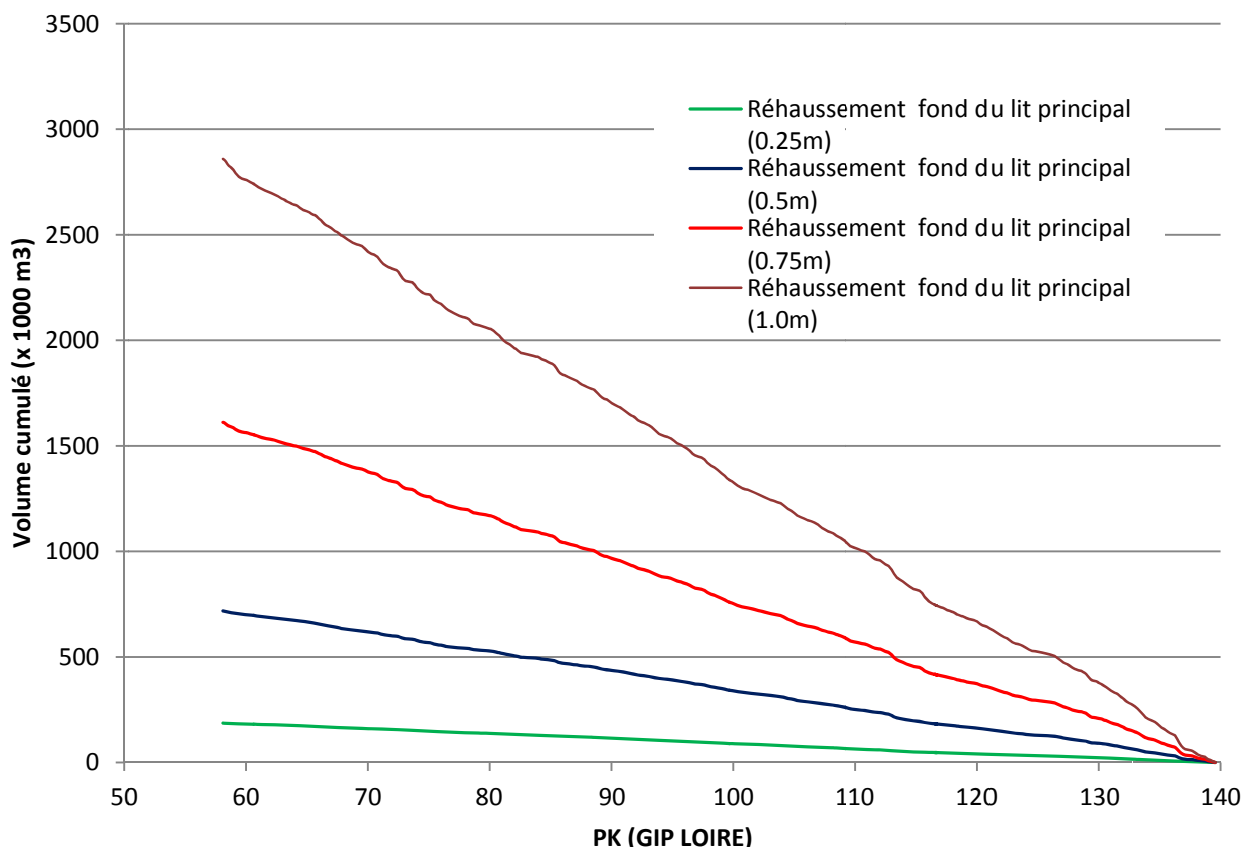
bief	Bras	PK début	PK fin	longueur	volume disponible total	Volume disponible dans la tranche superficielle				Volume linéique
		Km	Km	Km	Mm ³	0.25 m	0.5 m	1 m	1.5 m	(m ² /m)
50	La Pointe - Montjean	139.56	116.54	23.02	1.97	0.36	0.66	1.14	1.47	85.50
1	Montjean - Ancenis	116.73	90.57	26.16	5.95	0.93	1.76	3.17	4.25	227.34
11	Ancenis -Nantes	90.36	58.10	32.26	4.70	0.58	1.12	2.01	2.75	145.64
150	St George	128.62	117.55	11.08	1.69	0.45	0.80	1.21	1.43	152.50
147	Guillemette	137.40	90.89	46.51	0.09	0.01	0.03	0.05	0.06	1.89
102	Cul de Bœuf	110.83	108.17	2.67	0.93	0.16	0.29	0.51	0.65	347.02
4	Varades	107.14	103.01	4.13	0.71	0.19	0.34	0.54	0.64	171.54
105	Meilleraie	102.87	100.74	2.13	0.61	0.10	0.20	0.39	0.52	284.46
111	Neuve Macrière	87.56	83.38	4.19	0.85	0.15	0.28	0.52	0.68	203.28
115	Sauterelle	71.33	67.93	3.39	0.85	0.09	0.17	0.31	0.43	250.31
117	Thouaré	66.84	64.20	2.64	1.07	0.16	0.31	0.56	0.74	406.04

Volumes de matériaux correspondant au rehaussement du plancher alluvial dans le bras principal

bief	Bras	PK début Km	PK fin Km	longueur Km	Volume (millions de m ³) nécessaire pour rehaussement du fond de :				
					0.25 m	0.3 m	0.5 m	0.75 m	1.0 m
50	La Pointe - Montjean	139.56	116.54	23.02	0.047	0.066	0.181	0.412	0.738
1	Montjean - Ancenis	116.73	90.57	26.16	0.067	0.095	0.249	0.542	0.941
11	Ancenis -Nantes	90.36	58.10	32.26	0.071	0.102	0.283	0.646	1.16
Total					0.185	0.263	0.713	1.6	2.839

6.1.3. Volumes nécessaires pour le réengrèvement du lit principal

Les volumes de matériaux correspondant au rehaussement du plancher alluvial dans le chenal principal sont reportés dans le tableau de la page précédente et illustrés sur la figure ci-dessous.



Le volume théorique d'engrèvement du lit correspondant à un rehaussement de 1.0 m du plancher alluvial dans le chenal principal, est ainsi évalué à 2.8 Mm³ soit environ 10 années de transport solide du fleuve.

6.1.4. Comparaison du stock alluvial avec les volumes nécessaires pour le réengrèvement du lit principal

Les matériaux stockés dans les systèmes d'épis et dans les bras secondaires représentent des volumes importants.

On peut distinguer :

- ❑ **Les matériaux dans les systèmes d'épis situés dans les bras principaux** (bief 50, 1 et 11). Ils représentent des volumes de matériaux compris entre 1.8 et 6.33 Mm³ pour des profondeurs respectives comprises entre 0.25 et 1.0 m sous le niveau actuel du lit. En considérant un transport solide de l'ordre de 250 000 m³/an, cela correspondrait respectivement à 7 et 25 ans de charge solide transportée. Il convient de noter que le volume total de matériaux situés entre les épis et au-dessus de la ligne d'eau actuelle est beaucoup plus important et s'élève à 12.6 Mm³, soit l'équivalent de 50 ans environ de transport solide.

- ❑ **Les matériaux situés dans les bras secondaires.** En considérant que ces bras se trouvent perchés au-dessus de la ligne d'eau d'étiage, il est possible d'estimer le volume de matériaux pouvant être remobilisé au-dessus de ce niveau. Le volume total correspondant est proche de 6.8 Mm³. Dans la réalité ce volume correspond à des épaisseurs de stocks sédimentaires pouvant atteindre plusieurs mètres et ne pouvant être mobilisé en totalité. En considérant des tranches de sédiments de différentes épaisseurs allant de 0.25 m à 1.0 m, les volumes de matériaux correspondant s'élèvent entre 1.3 et 4.0 Mm³.

Pour apprécier l'importance des dépôts de matériaux situés au-dessus de la ligne d'eau d'étiage et évaluer les potentiels de remobilisation, il convient également d'analyser les volumes linéiques (m³/ml). Ces derniers sont compris entre 85 et 227 m³/ml dans les chenaux principaux (systèmes d'épis) et entre 152 et 406 m³/ml dans les bras secondaires (excepté le bras de la Guillemette qui constituait autrefois le bras principal). Les volumes moyens correspondant sont respectivement de 152 et 259 m³/ml pour les systèmes d'épis et les bras secondaire. On voit donc que le potentiel de matériaux ramené au km de Loire est plus important dans les bras secondaires que dans les systèmes d'épis, même si globalement ces zones représentent des volumes plus faibles.

Les volumes théoriques nécessaires au réengrèvement du lit dans le chenal principal sont compris entre 0.18 et 2.8 Mm³ pour des rehaussements du fond respectivement de 0.25m et 1.0 m. Ces volumes correspondent à une fraction du stock existant. Le tableau ci-après donne les volumes de matériaux nécessaires en Mm³ et en % du stock existant pour rehausser le fond du lit respectivement de 0.25, 0.5, 0.75 et 1.0 m.

Pour rehausser le fond du lit principal de 1.0 m le volume théorique de matériaux correspondant est de 2.8 Mm³ et correspond à 27% du stock total sur une épaisseur de 1.0 m, 45% du stock présent dans les épis et 70% dans les bras secondaires sur la même profondeur.

			Volume théorique pour rehaussement du fond en Mm3 et en % du stock existant							
	Epaisseur des sédiments	stock existant (Mm3)	+0.25 m	fraction	+0.50 m	fraction	+0.75 m	fraction	+1.0m	fraction
Epis	0.25 m	1.86	0.185	10%	0.263	14%	0.713	38%	2.839	152%
	0.5 m	3.54	0.185	5%	0.263	7%	0.713	20%	2.839	80%
	1 m	6.33	0.185	3%	0.263	4%	0.713	11%	2.839	45%
	1.5 m	8.47	0.185	2%	0.263	3%	0.713	8%	2.839	34%
bras secondaires	0.25 m	1.30	0.185	14%	0.263	20%	0.713	55%	2.839	219%
	0.5 m	2.42	0.185	8%	0.263	11%	0.713	29%	2.839	117%
	1 m	4.07	0.185	5%	0.263	6%	0.713	18%	2.839	70%
	1.5 m	5.15	0.185	4%	0.263	5%	0.713	14%	2.839	55%
total	0.25 m	3.16	0.185	6%	0.263	8%	0.713	23%	2.839	90%
	0.5 m	5.95	0.185	3%	0.263	4%	0.713	12%	2.839	48%
	1 m	10.40	0.185	2%	0.263	3%	0.713	7%	2.839	27%
	1.5 m	13.62	0.185	1%	0.263	2%	0.713	5%	2.839	21%

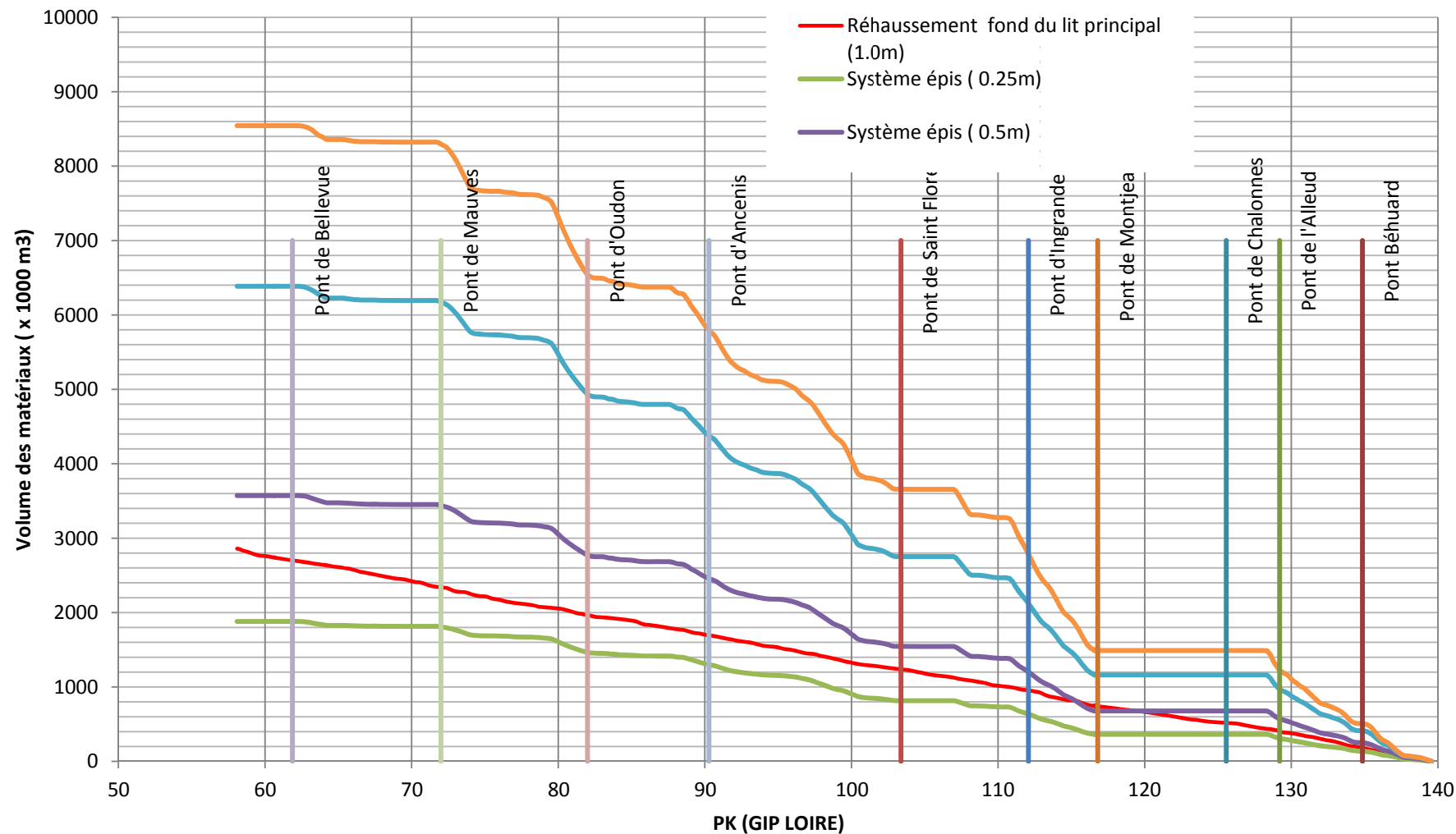
Les figures ci-après indiquent l'évolution des volumes cumulés disponibles dans les systèmes d'épis et les bras secondaires pour 4 épaisseurs différentes de couche mobilisable : 0.25, 0.5, 1.0 et 1.5 m, ainsi que l'évolution des volumes d'engrèvement pour un objectif de rehaussement de 1.0 m du fond du chenal principal.

L'analyse de ces courbes permet de comparer l'évolution du stock alluvial présent dans les marges du lit avec le volume théorique correspondant à différentes hypothèses de réengrèvement du lit.

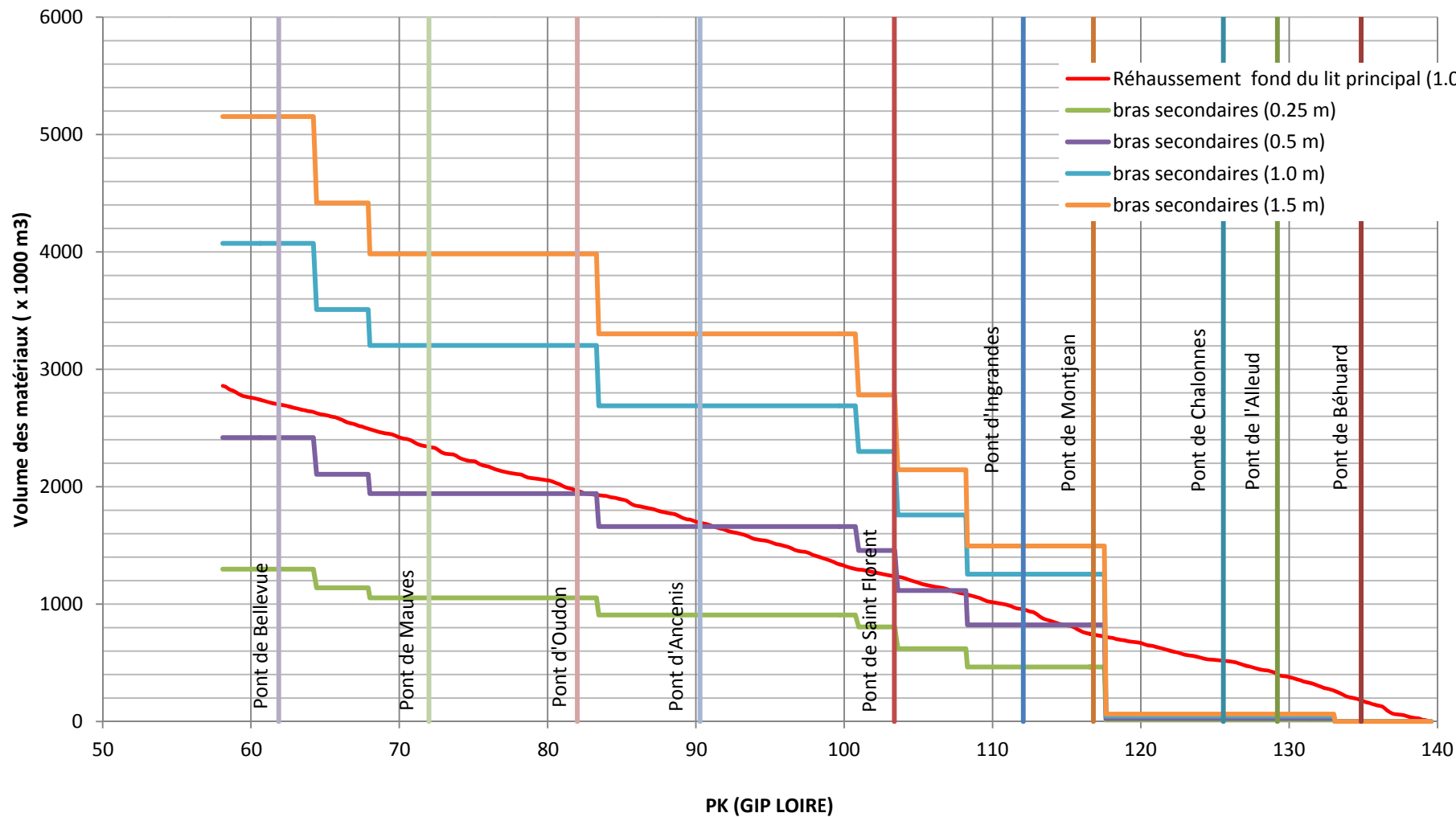
Elles mettent en évidence les principaux résultats suivants :

- ☐ le volume des matériaux entre les épis sur une épaisseur de 0.5 m correspond au volume théorique de réengrèvement du chenal principal sur 1.0 m. Les volumes sont suffisamment bien répartis dans l'espace (en considérant que les matériaux ne transitent pas vers l'aval, ce qui n'est bien sûr pas exact), pour permettre de ré engraver le lit de façon homogène.
- ☐ Les matériaux présents dans les bras secondaires présentent des quantités théoriques suffisantes mais leur répartition spatiale ne permettrait pas à eux seul de réengraver le lit sur l'ensemble du périmètre d'étude. C'est en particulier le cas pour le lit entre Bouchemaine et Montjean et dans une moindre mesure entre le pont d'Oudon et Bellevue.

Evolution des volumes cumulés de réengrèvement du chenal principal (+1.0 m /fond actuel) et des stocks disponibles dans les systèmes d'épis



Evolution des volumes cumulés de réengrèvement du chenal principal (+1.0 m /fond actuel) et des stocks disponibles dans les bras secondaires



6.1.5. Mobilisation actuelle des matériaux dans le lit

Le constat actuel réside dans la difficulté de pouvoir remobiliser le stock existant. Ce dernier se trouve en effet soit piégé entre les épis constituant ainsi des casiers sédimentaires aujourd'hui complètement comblés, soit « perchés » dans les bras secondaires et donc difficiles à entraîner du fait de hauteurs d'eau et de vitesses d'écoulement insuffisantes.

L'enfoncement de la ligne d'eau d'étiage a progressivement désactivé les bancs secondaires qui ont été alors le siège de dépôts accentuant le caractère perché de ces bras. Les valeurs des abaissments de la ligne d'eau d'étiage montrent que les dépôts de matériaux peuvent ainsi atteindre voire dépasser le mètre dans certains bras (bras de Saint George, bras de la Sauterelle, bras de la Meilleraie). Certains bras sont restés suffisamment bien alimentés hydrauliquement et sont donc moins sujet à l'engravement. C'est le cas du bras de Varades, de la Guillemette (autrefois bras navigable) et de la Sauterelle.

Concernant les systèmes d'épis, on peut considérer que les formes fluviales actuelles observées sont stables depuis plusieurs décennies. Les bancs piégés par ces épis peuvent être plus ou moins fortement végétalisés en fonction de leur hauteur au-dessus de la ligne d'eau d'étiage et de la configuration des écoulements.



Système d'épis en amont d'Ingrandes – bancs meubles partiellement remobilisables en crue



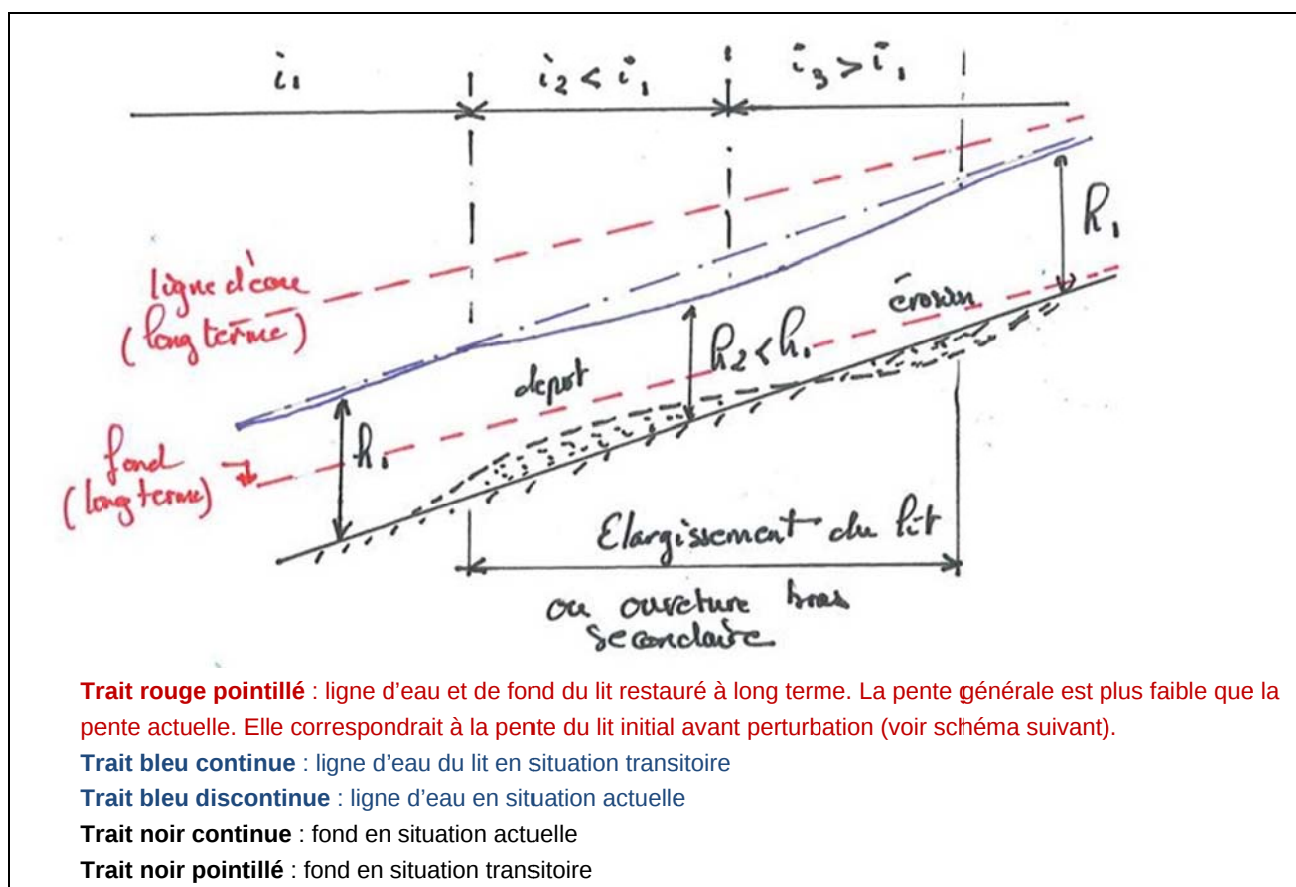
Système d'épis en aval d'Oudon – bancs végétalisés difficilement remobilisables en crue

6.2. DÉFINITION DES CONDITIONS DE RÉÉQUILIBRAGE DU BIEF 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 (épis à radier) assurant une perte de charge significative quel que soit le débit considéré.
 - Par élargissement du lit de la Loire (voir schéma de principe ci-dessous). Le remodelage, voir 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 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.

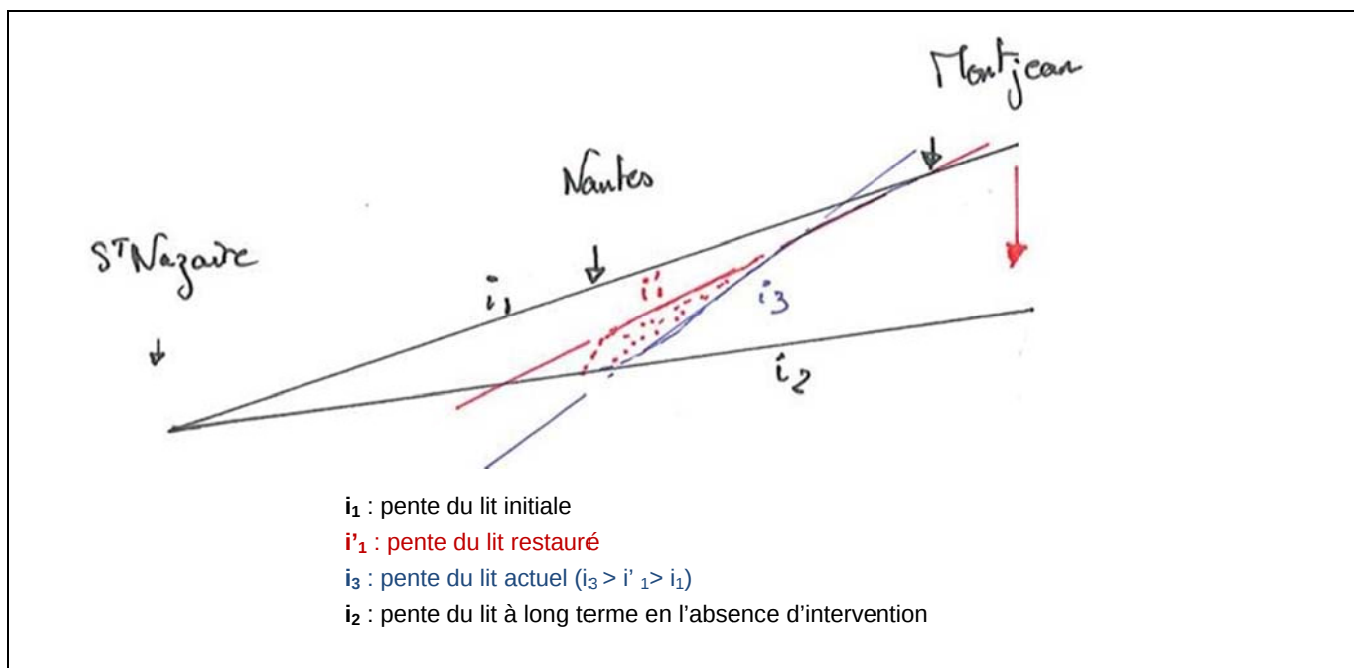
Il convient pour ce type d'action de différencier les effets à court terme (avec phénomène d'érosion transitoire dans les sections situées en amont des zones d'action) et les effets attendus à long terme (réengrèvement généralisé du lit en considérant une charge solide suffisante).



- ❑ L'autre moteur de l'érosion est le déficit sédimentaire. La charge solide entrante 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 dans le bassin à marée 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 (épis à radier ou chenal rugueux proposé par P. Lefort) ou de façon plus progressive sur une certaine longueur de lit restant à préciser.



6.3. EVALUATION DES ACTIONS DÉJÀ RÉALISÉES

6.3.1. Remodelage des épis entre la pointe et le pont de l'Alleud

VNF a engagé durant l'été 2009 des travaux de remodelage des épis dans le lit de la Loire entre le bec de Maine et le pont de l'Alleud y compris le bras des Lombardières (raccourcissement des épis d'1/4 de leur longueur).

Les travaux ont consisté à modifier 105 épis dans l'objectif de favoriser l'évacuation des sédiments stockés au sein des champs d'épis et d'enrayer l'incision du chenal principal en réduisant le déficit sédimentaire qui l'affecte.

Les mesures de suivi de l'évolution des bancs réalisées par l'université de Tours après les travaux entre mai 2009 et octobre 2010 attestent une remobilisation des sédiments stockés entre les épis. Elles mettent en évidence les principaux éléments suivants :

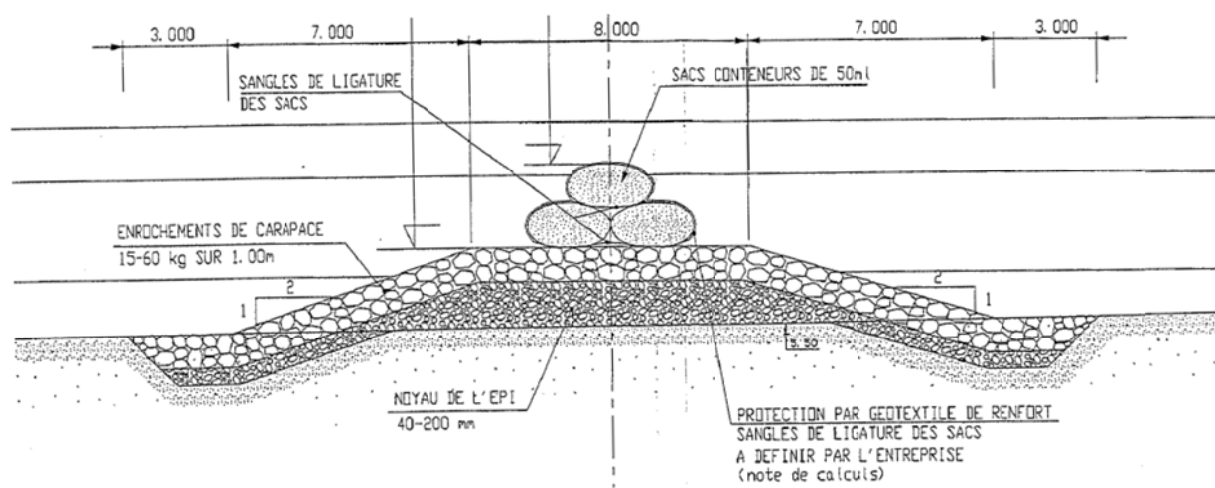
- ☐ Mobilité possible des alluvions des bancs entre les épis sur une épaisseur de 1 mètre environ ;
- ☐ Le bilan sédimentaire net est positif avec un volume de dépôt de 75 000 m³ correspondant à un exhaussement moyen des fonds de 4 cm.
- ☐ On note une tendance à la reprise d'érosion des bancs entre épis. Cette érosion a été toutefois modérée compte tenu de l'absence de forte crue durant la période d'observation.

6.3.2. Seuils du Fresne-sur-Loire

VNF a réalisé une opération expérimentale en 2002 et 2003, dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature, consistant en la construction de deux seuils à échancrure dans le bras principal du Fresne-sur-Loire. Ils ont pour objectif immédiat de relever la ligne d'eau d'été de 50 cm pour favoriser la réalimentation du bras secondaire de Cul-de-Bœuf ainsi que la boire de Champtocé.

Dans un second temps, ils devraient permettre de favoriser le processus de « remous sédimentaire » et remonter le fond du lit en amont de l'ouvrage.

Ces ouvrages sont constitués par une assise en enrochements et une superstructure en boudins géotextile remplis de sable (voir schéma ci-après), interrompue au niveau de l'échancrure, et sont implantés au nord de l'île Meslet sur le bras nord navigable.



Les ouvrages sont immergés une grande partie de l'année et les « boudins » ne sont visibles que lors de la période d'étiage de la Loire.

L'ouvrage a subi des dégradations en particulier un affaissement de l'extrémité des boudins liés à la déstabilisation progressive des enrochements constituant l'assise ; cette déstabilisation résultant de la formation de la fosse de surcreusement en aval des deux seuils et pouvant atteindre 10 m.

Actuellement, compte tenu de cette dégradation, l'ouvrage n'assure plus une perte de charge de 50 cm. Les mesures réalisées dans le cadre de l'étude mettent en évidence les pertes de charge ci-après entre l'amont du 1^{er} seuil et l'aval du second.

Débit (m ³ /s)	Z _{amont} -Z _{aval} (cm)
120	25
910	11
2260	11

D'après les suivis bathymétriques, l'érosion du bras de Cul de Bœuf s'élèverait à 535 000 m³ entre 2001 et 2013

Les simulations réalisées dans le cadre de la présente étude ont calculées les évolutions des fonds à long terme en considérant les trois situations suivantes :

- ☐ Seuils du Fresne-sur-Loire dans la configuration initiale ;
- ☐ Seuils du Fresne-sur-Loire dans la configuration actuelle (perte de charge réduite) ;
- ☐ Situation sans ouvrage.

Elles mettent en évidence les résultats ci-après :

- ☐ Sans l'ouvrage, les fonds amont seraient globalement stables. On note par ailleurs un engravement progressif dans le bras de Cul de Bœuf.
- ☐ Les deux ouvrages dans leur configuration initiale, permettraient un engravement des fonds dans le bief amont Montjean-Ingrandes, sans doute de plusieurs centaines de milliers de m³, pouvant correspondre à

une remontée des fonds de plusieurs décimètres. Dans le même temps, on observe une reprise des matériaux dans le bras de Cul de Bœuf.

- ❑ Pour la configuration actuelle, les ouvrages présentent une efficacité limitée, tout en maintenant un impact positif sur la stabilité des fonds en amont. La tendance dans le bras de bras de Cul de Bœuf serait à la poursuite de l'engravement.

L'ouvrage de type seuil à échancrure, en considérant une perte de charge suffisante (0.5 m dans la configuration initiale) semble donc jouer son rôle dans l'engravement du bief amont et la réouverture progressive du bras secondaire de Cul de Bœuf.

6.4. LES TYPES D'ACTIONS ENVISAGEABLES

Différents leviers d'action ont été simulés, seuls puis combinés entre eux, dans l'objectif de définir des stratégies répondant aux objectifs de restauration décrits au §1.2.

Les deux principaux moteurs de la poursuite de l'incision sont la pente du lit, et le déficit sédimentaire. Il convient donc d'agir d'une part pour réduire la pente hydraulique existante afin de favoriser un processus de dépôt progressif dans le lit principal, et d'autre part de réalimenter le fleuve en matériaux.

La réduction de pente peut être obtenue :

- ❑ Par réalisation de pertes de charge permettant de rehausser les niveaux d'eau en amont pour une large gamme de débits morphogènes.
- ❑ Par élargissement du lit de la Loire. Le remodelage, voire la suppression des épis, devraient aider à restaurer une largeur du lit actif plus importante.
- ❑ Par ouverture des bras secondaires pour augmenter les débits de crue à travers ces derniers.

La recharge sédimentaire du fleuve peut être obtenue :

- ❑ A court et moyen terme, en remobilisant les matériaux existant dans les marges du chenal actif et localisés entre les épis et dans les bras secondaires.
- ❑ A plus long terme, par augmentation de la charge solide provenant de l'amont. Cette perspective nécessite que la Loire en amont des Ponts-de-Cé retrouve un profil d'équilibre.

A la limite aval du secteur d'étude (secteur de Bellevue), il convient d'admettre une zone de transition entre la Loire en amont de Bellevue, et la zone estuarienne en aval. 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. Elle peut être assurée de « façon brutale » par un aménagement ponctuel (épis à radier) ou de façon plus progressive sur une certaine longueur de lit (chenal rugueux avec ou sans sinuosités).

6.4.1. Le remodelage des systèmes d'épis

Le remodelage des épis consiste à supprimer pour partie ou totalement les épis existants dans le lit vif de la Loire. Cette action a pour objet d'une part de redonner de la largeur utile au lit actif du fleuve et de remobiliser une partie du stock de matériaux piégé dans les épis et estimé à près de 12 Mm³.

La suppression des épis dans le chenal principal est un levier intéressant pour lutter contre l'incision des fonds mais n'est pas suffisante à elle seule pour contribuer au réengrèvement du lit. Globalement, les incisions constatées dans le scénario tendanciel sont diminuées de 10 à 20 cm en fonction des secteurs. Les tests réalisés sur 40 années mettent en évidence les résultats suivants dans le chenal principal (hypothèse basse du transport solide en provenance de l'amont) :

- ❑ Entre la Pointe et Ingrandes : Incision proche de 0.1 m
- ❑ Entre Ingrandes et Ancenis : incision proche de 0.2 m
- ❑ Entre Ancenis et Oudon : incision proche de 0.3 m
- ❑ Entre Oudon et Bellevue : fonds stables

Evolution des fonds moyens en cm (hypothèse basse et haute du TS amont)

Secteur	La pointe- Ingrandes	Ingrandes - Ancenis	Ancenis - Oudon	Oudon - Bellevue
<i>Scénario tendanciel</i>	-20/+6	-29/+3	-48/-39	-13+4
Test 2 : suppression des épis dans le bras principal	-12/+15	-21/+13	-27/-19	-4/+8

(*) Hypothèse basse : volume entrant correspondant à 60% de la capacité théorique de charriage du lit en amont
Hypothèse haute : volume entrant correspondant à 80% de la capacité théorique de charriage du lit en amont

Le déstockage sédimentaire des systèmes d'épis atteint près de 2 Mm3 dont plus de la moitié se situe dans les bancs amont entre La Pointe et Ingrandes

Le bilan sédimentaire sur 40 années est le suivant :

Bilan sédimentaire en Mm3 (hypothèse basse TS amont) sur 40 années de simulation*

	Scénario tendanciel	Suppression des épis dans le bras principal
Volume amont entrant	+11.2	+11.2
Bras principal	-3.0	-1.7
Système d'épis	+0.5	-1.5
Bras secondaire	+1.2	+1.2
Volume sortant	-12.5	-13.2

(*) Hypothèse basse : volume entrant correspondant à 60% de la capacité de charriage du lit en amont

Bilan sédimentaire en Mm3 (hypothèse haute TS amont) sur 40 années de simulation*

	Scénario tendanciel	Suppression des épis dans le bras principal
Volume amont entrant	+15.0	+15.0
Bras principal	-0.25	+0.85
Système d'épis	+0.6	-1.4
Bras secondaire	+1.9	+1.9
Volume sortant	-12.75	-13.65

(*) Hypothèse haute : volume entrant correspondant à 80% de la capacité de charriage du lit en amont

Le volume global de matériaux libérés entre les épis est de 2.0 Mm3. 1.1 à 1.3 Mm3 se déposent dans le bras principal et contribuent à limiter l'incision des fonds. Le reste (0.7 à 0.9 Mm3) sort du bief. En d'autres termes 55 à 65 % des matériaux provenant des épis se déposent dans le lit, le reste transite vers l'aval.

6.4.2.L'ouverture des bras secondaires

Cette action consiste à supprimer les chevrettes « barrant » l'entrée des bras secondaires, ainsi que les points durs fixant le profil en long de ces bras.

Elle n'a qu'un faible impact sur le bilan sédimentaire du fleuve (voir tableaux ci-après). La raison essentielle est à rechercher dans le caractère plus ou moins fortement perché des bras secondaires qui limite les possibilités de reprise sédimentaire dans ces bras.

Cette action contribue néanmoins à rééquilibrer légèrement les débits entre les deux bras réduisant ainsi les forces tractrices dans le bras principal. La poursuite de l'incision mise en évidence dans le scénario tendanciel serait réduite de 0.03 à 0.11 m.

Evolution des fonds moyens en cm (hypothèse basse et haute * TS amont)

Secteur	La pointe-Ingrandes	Ingrandes - Ancenis	Ancenis - Oudon	Oudon - Bellevue
<i>Scénario tendanciel</i>	-20/+6	-29/+3	-48/-39	-13+4
Test 32 : ouverture des bras secondaires	-16/+12	-19/+10	-43/-38	-10/+6

(*) Hypothèse basse : volume entrant correspondant à 60% de la capacité théorique de charriage du lit en amont
Hypothèse haute : volume entrant correspondant à 80% de la capacité théorique de charriage du lit en amont

Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS

	Scénario tendanciel	Ouverture des bras secondaires
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-2.5
Système d'épis	0.5	-0.2
Bras secondaire	1.2	1.3
Volume sortant	-12.6	-12.6

Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS

	Scénario tendanciel	Ouverture des bras secondaires
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	0.2
Système d'épis	0.6	-0.2
Bras secondaire	1.9	2.0
Volume sortant	-12.7	-12.9

0.6 Mm3 se déposent dans le bras principal contribuant à réduire le phénomène d'enfoncement de seulement 6cm en moyenne.

6.4.3. La création de pertes de charges localisées

Cette action consiste à réaliser dans le lit de la Loire un aménagement permettant de créer une perte de charge rehaussant les niveaux d'eau amont et réduisant ainsi les pentes hydrauliques dans la zone d'influence de l'aménagement.

Le type d'aménagement permettant de créer cette perte de charge est décrit au § 6.3.2 ;

Les tests ont porté sur plusieurs sites et plusieurs valeurs de pertes de charge, considérées en première approche comme constantes quel que soit le débit du fleuve.

- ❑ Test 42 : Bellevue (0.5 m)
- ❑ Test 4 : Bellevue (1.0 m)
- ❑ Test 43 : Bellevue (1.5 m)
- ❑ Test 5 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (0.5m)
- ❑ Test 51 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (1.0m)
- ❑ Test 101 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (0.5 m)
- ❑ Test 10 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (1.0m)

PK des pertes de charges locales simulées

bief	pk GIP	Localisation
49	130.05	Alleud
2	112.1	Ingrandes
13	77.5	Cellier
9	92.3	Ancenis
18	62.3	Bellevue

Les résultats du modèle mettent ainsi en évidence un engravement du lit dans la zone d'influence des aménagements. L'aménagement qui pourrait être réalisé à Bellevue se ferait sentir jusqu'à Ancenis situé 30 km en amont.

Ces volumes de dépôt se font prioritairement dans le bras principal. Ils contribuent de façon sensible à lutter contre l'incision des fonds et au réengrèvement du lit. Le tableau ci-après indique les évolutions du fond calculées dans le bras principal. Ces évolutions sont constatées au bout de 20 à 30 années en fonction de l'hypothèse retenue de transport solide provenant de l'amont.

Les bilans sédimentaires pour les 7 scénarios testés sont indiqués dans le tableau ci-après.

Volume net déposé dans le fleuve (Mm3) évalué par rapport au scénario tendanciel (hypothèse basse TS amont)

	Bras principal	Système d'épis	Bras secondaire	total
Scénario 42 : Bellevue (0.5 m)	0.7	0	0.2	0.9
Scénario 4 : Bellevue (1.0 m)	1.7	0.0	0.4	2.1
Scénario 43 : Bellevue (1.5 m)	2.8	0.1	0.6	3.5
Scénario 5 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (0.5m)	2.1	0.1	0.6	2.8
Scénario 51 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (1.0m)	2.6	0.2	0.7	3.5
Scénario 101 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (0.5 m)	2.6	0.5	0.3	3.4
Scénario 10 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (1.0m)	3.6	0.6	0.8	5.1

Volume net déposé dans le fleuve (Mm3) évalué par rapport au scénario tendanciel (hypothèse haute TS amont)

	Bras principal	Système d'épis	Bras secondaire	total
Scénario 42 : Bellevue (0.5 m)	0.7	0.0	0.2	0.9
Scénario 4 : Bellevue (1.0 m)	1.6	0.0	0.4	2.0
Scénario 43 : Bellevue (1.5 m)	2.7	0.1	0.6	3.4
Scénario 5 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (0.5m)	2.0	0.1	0.5	2.5
Scénario 51 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (1.0m)	2.3	0.2	0.5	3.0
Scénario 101 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (0.5 m)	1.7	0.5	0.2	2.3
Scénario 10 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (1.0m)	3.5	0.6	0.4	4.5

Ces volumes de dépôt se font prioritairement dans le bras principal. Ils contribuent de façon sensible à lutter contre l'incision des fonds et au réengrèvement du lit. Le tableau ci-après indique les évolutions du fond calculées dans le bras principal. Ces évolutions sont constatées au bout de 20 à 30 années en fonction de l'hypothèse de transport solide provenant de l'amont.

Evolution des fonds moyens en cm (hypothèse basse TS amont)

Secteur	La pointe-Ingrandes	Ingrandes - Ancenis	Ancenis - Oudon	Oudon - Bellevue
<i>Scénario tendanciel</i>	-20	-38	-77	-16
Scénario 42 : Bellevue (0.5 m)	-20	-38	-74	+4
Scénario 4 : Bellevue (1.0 m)	-20	-38	-70	+28
Scénario 43 : Bellevue (1.5 m)	-20	-37	-64	+56
Scénario 5 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (0.5m)	-19	-14	-75	+25
Scénario 51 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (1.0m)	-18	+12	-78	+21
Scénario 101 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (0.5 m)	+10	-32	-48	-13
Scénario 10 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (1.0m)	+57	-1	-13	-34

Evolution des fonds moyens en cm (hypothèse haute TS amont)

Secteur	La pointe- Ingrandes	Ingrandes - Ancenis	Ancenis - Oudon	Oudon - Bellevue
<i>Scénario tendanciel</i>	+8	+1	-41	+2
Scénario 42 : Bellevue (0.5 m)	+9	+1	-38	+21
Scénario 4 : Bellevue (1.0 m)	+9	+1	-34	+44
Scénario 43 : Bellevue (1.5 m)	+9	+2	-29	+71
Scénario 5 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (0.5m)	+9	+25	-39	+39
Scénario 51 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (1.0m)	+11	+51	-45	+34
Scénario 101 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (0.5 m)	+39	+6	-35	+15
Scénario 10 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (1.0m)	+85	+26	-7	+1

Ces résultats appellent les différentes observations suivantes :

- ❑ L'impact de l'aménagement de Bellevue est significatif jusqu'à Ancenis. L'aménagement permettrait le dépôt de 1.0 à 3.5 Mm3 en 40 ans (en fonction des hypothèses de transport solide provenant de l'amont et de la valeur de la perte de charge considérée).
- ❑ Pour l'hypothèse basse de charge solide provenant de l'amont, le rehaussement du plancher alluvial serait compris entre +4 cm (perte de charge de 0.5 m) et + 56 cm (perte de charge de 1.5 m).
- ❑ L'aménagement supplémentaire situé à Ancenis permettrait d'augmenter de 50% le volume de dépôt dans le lit principal et de contribuer à l'engravement du lit sur le secteur Ingrandes-Ancenis.
- ❑ Les aménagements supplémentaires situés au Cellier, à Ingrandes et au Pont de l'Alleud, ont pour conséquence d'aggraver les risques d'érosion du lit sur le secteur Oudon-Bellevue en piégeant le transit sédimentaire en amont. Ces aménagements s'ils ont un effet positif sur les 2/3 amont du bief (secteur La pointe- Oudon), auraient plutôt un effet négatif en aval.

Evolution des fonds moyens en cm (hypothèse basse et haute du TS amont)

Secteur	La pointe- Ingrandes	Ingrandes - Ancenis	Ancenis - Oudon	Oudon - Bellevue
<i>Scénario tendanciel</i>	-20/+6	-29/+3	-48/-39	-13/+4
Test 42 : Bellevue (0.5 m)	-19/+9	-29/+1	-52/-38	+1/+21
Test 4 : Bellevue (1.0 m)	-19/+9	-28/+1	-48/-34	+26/+44
Test 43 : Bellevue (1.5 m)	-19/+9	-28/+2	-44/-29	+54/+71
Test 5 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (0.5m)	-18/+9	-6/+25	-53/-39	+22/+39
Test 51 : Bellevue (1.0m) et Ancenis (1.0m)	-17/+11	+19/+51	-56/-45	+18/+34
Test 101 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (0.5 m)	+11/+39	-25/+6	-25/-35	-16/+15
Test 10 : Bellevue, Ancenis, le Cellier, Ingrandes et Pont de l'Alleud (1.0m)	+58/+85	+7/+26	+9/-7	-45/+1

6.4.4. La réalisation de seuils à échancrure dans le bras navigable

Ces actions ont pour objet d'augmenter les débits transitant dans les bras secondaires afin de favoriser d'une part la reprise sédimentaire dans ces bras et d'autre part le dépôt de matériaux dans le bras principal en amont de l'ouvrage.

Un tel aménagement a été réalisé sur le bras du Fresne-sur-Loire permettant de créer une perte de charge fixée lors de la conception de l'ouvrage à 0.5 m.

Les simulations réalisées avec une perte de charge de 0.5 m mettent en évidence :

- ❑ Une différence significative de +20 à +30 cm des fonds avec et sans seuils (en fonction de l'hypothèse retenue sur le transport solide) dans le bras principal en amont de l'ouvrage.
- ❑ Une tendance à la reprise des matériaux dans le bras de Cul de Bœuf évaluée par le modèle à 200 000 m³ (hypothèse basse du transport solide). A noter que la comparaison des topographies 2002 (avant travaux) et 2005 (2 ans après travaux) du bras secondaire conclut à un départ de sable compris entre 210 000 et 230 000 m³.

Des tests simulant des ouvrages identiques sur d'autres sites ont été réalisés. Les ouvrages testés sont situés dans les bras principaux aux PK 128.5 (entrée du bras de Chalonnes), 106.94 (bras de Saint Florent-le-Vieil), 87.38 (bras de l'île Coton), 71.42 (bras de la Pierre percée).

Position des épis à radier dans le bras principal

bief	PK GIP	bras principal	Bras secondaire
51	128.5	Chalonnes	S Georges
4	106.94	île Coton	Varades
10	87.38	S Florent	Neuve-Macrière
15	71.42	Pierre Percée	Sauterelle

Le bilan sédimentaire est présenté dans le tableau ci-après.

<i>Bilan sédimentaire - hypothèse basse TS</i>		
	Scénario tendanciel	scénario
		11
Volume amont entrant	11.2	11.2
Bras principal	-3.1	-0.4
Système d'épis	0.5	0.7
Bras secondaire	1.2	0.1
Volume sortant	-12.6	-10.8
<i>Bilan sédimentaire - hypothèse haute TS</i>		
	Scénario tendanciel	scénario
		11
Volume amont entrant	15.0	15.0
Bras principal	-0.2	2.2
Système d'épis	0.6	0.8
Bras secondaire	1.9	1.1
Volume sortant	-12.7	-11.0

Les résultats mettent en évidence un bilan net positif avec un volume de dépôt proche de 2 Mm³ correspondant à un volume de 2.6 à 2.9 Mm³ déposé dans les bras principaux et les systèmes d'épis associés et 0.8 à 1.1 Mm³ érodé dans les bras secondaires.

L'évolution correspondante des fonds moyens (voir tableau ci-après) met en évidence un réengrèvement possible du fond sur le bief amont (La Pointe – Montjean) et une diminution sensible du phénomène d'incision en aval.

Evolution des fonds moyens en cm (hypothèse basse et haute du TS amont)

Secteur	La pointe- Ingrandes	Ingrandes - Ancenis	Ancenis - Oudon	Oudon - Bellevue
<i>Scénario tendanciel</i>	-20/+6	-29/+3	-48/-39	-13/+4
Test 11 : Epis à radier	+18/+40	+1/+31	-11/-15	-8/+17

6.4.5. Les rampes sous-fluviales

Cette action s'inscrit dans l'objectif de stopper l'incision du lit en créant des points durs (matelas d'enrochements disposés dans le fond du lit) régulièrement espacés.

Dans le cas présent du fleuve Loire, les tests simulant des rampes sous fluviales régulièrement espacés tous les 10 km dans le bras principal, ne mettent pas en évidence de modification significative des fonds moyens par rapport aux résultats du scénario tendanciel. Cette action ne répond donc pas au problème posé, à moins de considérer un plus grand nombre d'ouvrages.

6.4.6. La reprise d'érosion sur les berges

La restauration du caractère érodable des berges pourrait constituer une autre source potentielle de matériaux. En considérant en première approche que 10 à 20% du linéaire du fleuve pourrait faire l'objet d'une réactivation du caractère érodable des berges, on obtiendrait, pour une hauteur moyenne de berge érodable de 5 m, un volume de 30 000 à 60 000 m³ de matériaux par mètre de recul de berge.

En faisant l'hypothèse arbitraire d'une érosion annuelle effective de 1m de berge, cela représenterait un apport brut de 30 000 à 60 000 m³/an. Seule la fraction sablo graveleuse des matériaux ainsi érodés est à considérer, les matériaux fins étant emportés par les écoulements. Pour ce type de matériaux (argiles sableuses, sables limoneux), la fraction peut être estimée entre 20 à 30%. On obtient donc un apport potentiel de matériaux susceptible de contribuer au dépôt de 6 000 à 18 000 m³/an, contre 40 000 m³/an attendus de l'érosion des épis.

De ce fait ce type d'action, constituerait un levier moins efficace que la suppression des systèmes d'épis. Il pourrait néanmoins constituer un gisement complémentaire.

Elle contribuera par ailleurs à restaurer une certaine diversité des milieux au niveau de la ripisylve.

6.5. CONSÉQUENCES SUR LES STRATÉGIES POSSIBLES D'INTERVENTION

Il est possible, à partir des résultats de simulation présentés ci-avant de tirer les principaux enseignements suivants :

- ❑ Le retour à l'état du lit existant à la fin du XIX^{ème} siècle et correspondant à un lit encore non perturbé par les grands aménagements réalisés à partir du début du XX^{ème} siècle, ne peut être atteint à moyen et long terme avec les leviers d'actions envisagés. Ceci résulte principalement de la modification profonde du lit de la Loire estuarienne entre Saint Nazaire et Nantes, mais aussi d'un déséquilibre général du fleuve observé en amont du secteur d'étude, et qui se traduira par un déficit sédimentaire se prolongeant très certainement pendant de nombreuses décennies.
- ❑ Le décorsetage du bras principal réalisé en supprimant les systèmes d'épis est utile mais ne suffit pas à inverser la tendance à l'incision des fonds. Le rendement sédimentaire de l'opération est mitigé : 55 à 65 % des matériaux sur un total de 2 Mm³ libérés, se redéposent dans le fond. Le reste migre vers l'aval et finit par sortir du bief. Le volume de matériaux libéré représente une épaisseur moyenne d'érosion d'environ 0.3 m, soit environ 15 % du stock existant entre les épis au-dessus de la ligne d'eau d'étiage.
- ❑ La suppression des épis conduit à une remobilisation des matériaux plus importante en amont d'Oudon qu'en aval. Cela pourrait s'expliquer par l'importance croissante de l'incision en allant vers l'aval conduisant à des bancs plus difficilement érodables en cas de crue.
- ❑ La réouverture des bras secondaires par suppression des chevrettes existantes, contribue très faiblement à la recharge sédimentaire du bras principal. Cela est principalement lié au fait que les chevrettes barrant l'entrée des bras fonctionnent rapidement en régime noyé et deviennent donc transparentes aux écoulements. Par ailleurs le caractère fortement perché de ces bras, réduit les possibilités de reprise sédimentaire.

- ❑ Restaurer l'érodabilité des berges par démantèlement des protections existantes peut constituer un moyen d'action complémentaire pour apporter des matériaux dans le lit principal. Cette action générerait malgré tout moins de matériaux que la suppression des épis, d'autant plus que le démantèlement des protections ne peut s'envisager de façon systématique.
- ❑ Les épis à radier de type du Fresne-sur-Loire, dans la mesure où ils permettent une surélévation amont des lignes d'eau suffisante (perte de charge de 0.5m), contribuent à favoriser une dynamique de dépôt en amont et de reprise sédimentaire dans les bras secondaires.
- ❑ La création de pertes de charge singulières permettant de réduire les pentes hydrauliques amont, constitue un levier d'action efficace vis-à-vis de la dynamique des dépôts dans le bras principal. Il conviendrait de privilégier essentiellement les aménagements situés dans la moitié aval de l'aire d'étude (aval d'Ancenis). En effet les aménagements situés dans la partie amont contribueraient à piéger une partie du transit solide en amont et à favoriser des reprises d'érosion non désirées en aval.
- ❑ Un levier d'action, seul, ne suffit pas à satisfaire les objectifs de restauration précisés au § 1.2.

Dans ce contexte, il est donc nécessaire de considérer une combinaison d'actions répondant aux différences d'évolution par secteur et à des objectifs différenciés de reconquête à moyen terme du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et l'agglomération Nantaise.

On peut ainsi distinguer les trois objectifs ci-après :

- ❑ **Objectif 1 : stopper l'enfoncement du lit.** Cet objectif répond au besoin de ne pas aggraver l'état actuel du lit et de ses milieux associés et de considérer des aménagements localement nécessaires pour restaurer le fonctionnement des annexes hydrauliques. Cet objectif se base sur la recharge sédimentaire du lit principal à partir des matériaux piégés dans les marges fluviales (bras secondaires et systèmes d'épis), sans pour autant garantir à long terme les conditions d'une véritable restauration morphologique du fleuve qui nécessite une diminution des pentes hydrauliques.
- ❑ **Objectif N°2 : restaurer le fonctionnement morphologique de la Loire.** Cet objectif s'attache à retrouver les conditions d'une restauration active du fonctionnement morphologique qui passe dans un premier temps par une diminution des pentes hydrauliques actuellement responsables de l'incision du fleuve. Il nécessite donc d'intervenir pour augmenter les apports solides au fleuve d'une part et de créer les conditions nécessaires au dépôt des matériaux d'autre part.
- ❑ **Objectif N°3 : restaurer localement les fonctionnalités du milieu** au droit des zones considérées comme prioritaires (rétablissement des connexions piscicoles, restauration des fonctions biologiques de certains milieux). Cet objectif permet de pallier la non atteinte d'une restauration active de la morphologie du fleuve et accepte en conséquence le principe d'intervenir localement pour améliorer les fonctionnalités environnementales des annexes.

La réalisation des actions conduiraient à moyen terme aux évolutions suivantes :

- ❑ **Pour l'objectif N°1 :** possibilité d'une stabilisation des fonds sur l'ensemble du bief, avec néanmoins une incertitude sur le long terme pour garantir cette stabilité après épuisement des capacités d'érosion des bancs entre les épis.
- ❑ **Pour l'objectif N°2 :** ré engravement du lit en agissant sur la réduction des pentes hydrauliques et la remobilisation des gisements de matériaux situés dans les marges du chenal en eau (bras secondaires et systèmes d'épis). Le besoin de maintenir les matériaux dans le bief nécessite de réaliser préférentiellement un aménagement en limite aval de l'aire d'étude située à Bellevue. Le ré engravement moyen serait de 50 cm avec des secteurs pouvant bénéficier d'un ré engravement plus important (voir figure ci-après)

- ❑ **Pour l'objectif N°3** : remise en eau de certains bras secondaires (suppression des chevrettes barrant l'amont et l'aval des bras et creusement d'un chenal pilote). Les secteurs à traiter prioritairement concernent les bras constituant l'exutoire des annexes hydrauliques à restaurer.

Compte tenu d'une part du constat établi sur l'évolution tendancielle, et d'autre part des effets calculés des actions constituant les différentes stratégies d'intervention présentées, le comité de pilotage propose de retenir une stratégie d'intervention reposant sur des interventions graduées répondant à la priorité de stabilisation des fonds et de restauration environnementale de certain secteurs tout en autorisant une restauration morphologique du fleuve à moyen et long terme.

7. CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS D'ACTIONS ET INCIDENCE SUR LES LIGNES D'EAU

7.1. DÉFINITION DES SCÉNARIOS D'ACTIONS

Les scénarios d'actions ont été définis en respectant les principes suivants :

- ☐ Mise en œuvre des leviers contribuant de façon significative au réengrèvement des fonds et étudiés dans la phase précédente. Il s'agit des actions principales suivantes :
 - **Suppression des systèmes d'épis.** A ce stade de la phase 1, les simulations ont porté sur la suppression de la totalité des ouvrages. Au stade de la phase 2, il conviendra de préciser le linéaire exact d'épis à démanteler. On peut considérer en effet que la partie de l'épi proche de l'ancrage en berge, contribue peu à l'engrèvement général des fonds. En ce sens, il sera sans doute économiquement plus intéressant de ne démanteler que la longueur de l'épi contribuant réellement au piégeage des matériaux.
 - **Remise en eau des bras secondaires.** 3 bras pouvant potentiellement apporter des quantités importantes de matériaux dans le lit ont été identifiés : il s'agit des bras de Saint-Georges, de Varades et de l'île de Neuve-Macrière. Les actions consisteraient principalement à remodeler les chevrettes barrant l'amont et l'aval des bras, et à démanteler les épis encore présents dans le bras de Varades, l'objectif étant de remettre en eau les bras pour des débits supérieurs au débit d'étiage. Le creusement d'un chenal pilote dans certains bras est également envisageable afin d'amorcer un processus d'érosion régressive, les matériaux de déblai pourront alors servir à un rechargement du bras principal.
 - **Aménagement du lit dans le secteur de Bellevue.** L'aménagement consiste à créer un chenal étroit pour les débits d'étiage, méandrant dans le lit principal du fleuve et délimité par deux digues submersibles en enrochement reliées aux berges par des tenons. La perte de charge résultante sera de l'ordre du mètre pour les débits morphogènes. Une fois les casiers entre tenons largement submergées, la perte de charge globale se stabilisera voire sera décroissante avec le débit.
 - **Restauration des seuils du Fresne-sur-Loire** maintenant l'équilibre de répartition de débits entre les 2 bras. Un cas de restauration permettant de retrouver les pertes de charges initiales (2 x 0.25 m) est également testé même si cette orientation semble n'être pas privilégiée par le comité consultatif mobilisé pour suivre l'expertise des seuils du Fresne-sur-Loire.
 - **Remaniement de bancs fortement perchés** entre les épis. Il s'agirait de 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. Cette action concerne essentiellement les deux bancs d'Oudon et de Mauves sur Loire.
- ☐ Phasage des actions visant à permettre leur mise en œuvre sur une vingtaine d'année.
- ☐ Découpage du bief en trois zones de travaux correspondant à des dynamiques d'évolution différenciées et mises en évidence dans le scénario tendanciel :
 - Secteur amont (La Pointe – Ingrandes). Poursuite de l'Incision pouvant atteindre 20 à 30 cm.
 - Secteur médian (Ingrandes – Ancenis). Incision plus prononcée pouvant atteindre et dépasser 50 cm en 40 ans
 - Secteur aval (Ancenis – Oudon – Bellevue). Incision modérée de l'ordre de 10 à 20 cm.

- ❑ Programmation des actions différenciées dans l'espace et dans le temps afin d'évaluer respectivement les évolutions intermédiaires des fonds et leur efficacité globale. La construction des programmations a répondu aux logiques suivantes :
- Priorité d'action sur le secteur le plus vulnérable à l'incision. Il s'agit du secteur médian ;
 - Priorité d'action vis-à-vis d'une logique amont-aval, en considérant que les matériaux doivent être d'abord mobilisés en amont afin de contribuer au réengrèvement progressif des secteurs aval ;
 - Priorité d'action vis-à-vis d'une logique aval-amont, en considérant que les matériaux remobilisés en aval et contribuant au réengrèvement local du lit peuvent freiner le processus d'érosion régressive et amorcer un remous solide se propageant de l'aval vers l'amont.

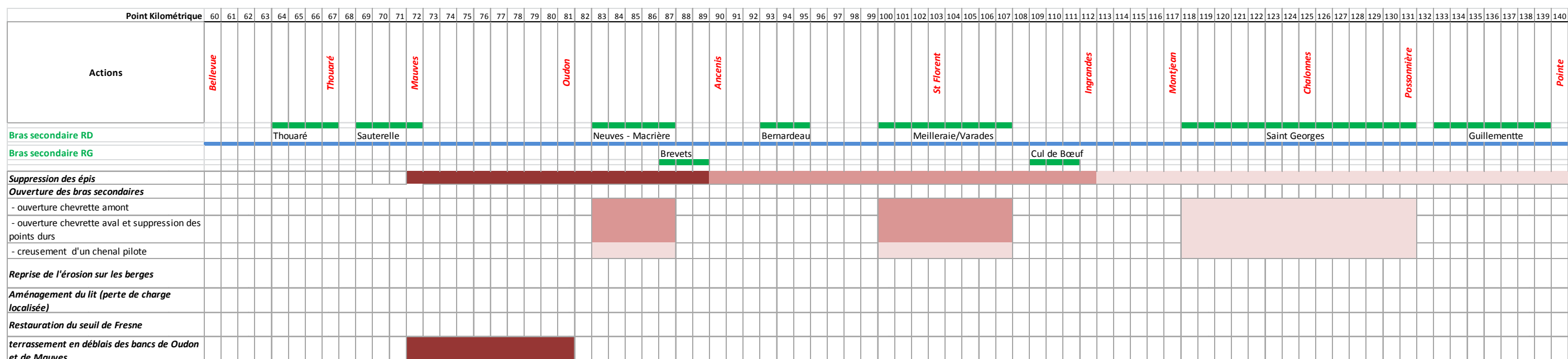
D'autre part la construction de ces programmations s'inscrit dans un objectif à long terme de restauration morphologique du fleuve. Pour cela, des actions structurantes comme celle de l'aménagement de Bellevue et de restauration des seuils du Fresne-sur-Loire ont été évaluées en considérant que les délais nécessaires à la prise de décision puis à la préparation et à la réalisation de ces travaux, ne devaient pas retarder la mise en œuvre d'actions plus consensuelles et moins difficiles à réaliser (reprise des épis, ouverture des bras).

Les synoptiques figurants sur les pages suivantes décrivent pour les 6 programmations étudiées, la répartition dans le temps et dans l'espace des actions simulés sur modèle sur une durée globale de 70 ans.

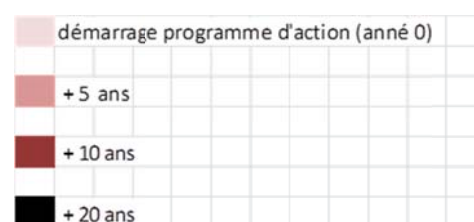
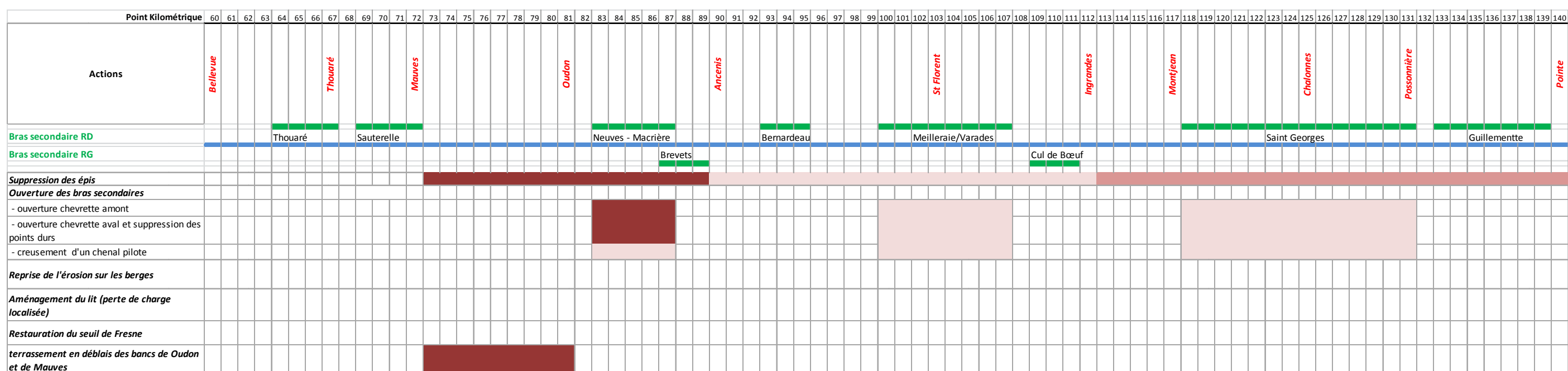
Le tableau ci-après caractérise sommairement ces différentes programmations et leur logique de construction.

N° de programmation	Priorité d'intervention	Actions supplémentaires aux interventions sur les systèmes d'épis et à l'ouverture des bras
201	logique amont - aval	
202	secteur médian Ingrandes-Ancenis	
203	priorité aval vis-à-vis du risque de poursuite de l'érosion régressive	
204	logique amont - aval	aménagement de Bellevue
205	secteur médian Ingrandes-Ancenis	aménagement de Bellevue
206	logique amont - aval	aménagement de Bellevue et Ancenis - Reprise d'érosion sur les berges - restauration du seuil du Fresne-sur-Loire

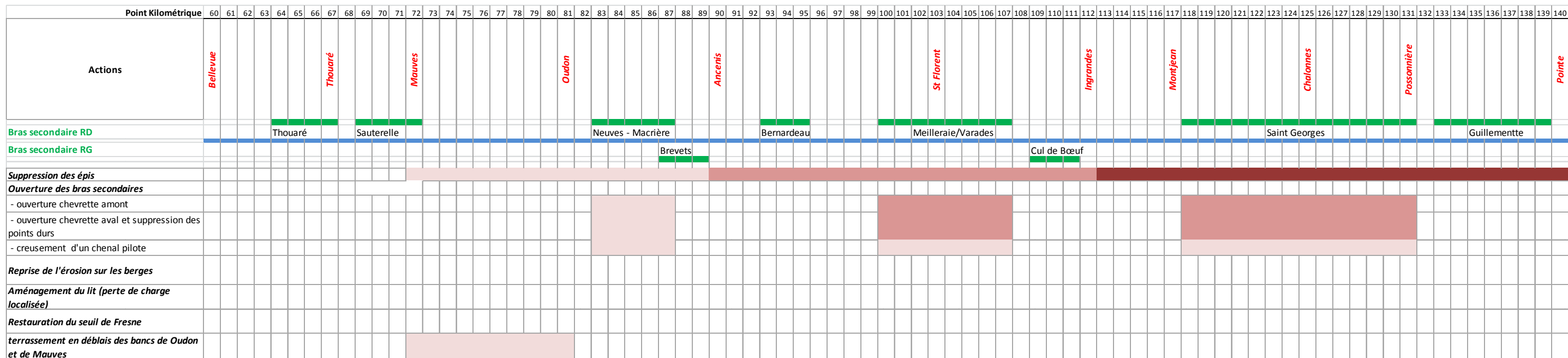
Programmation 201



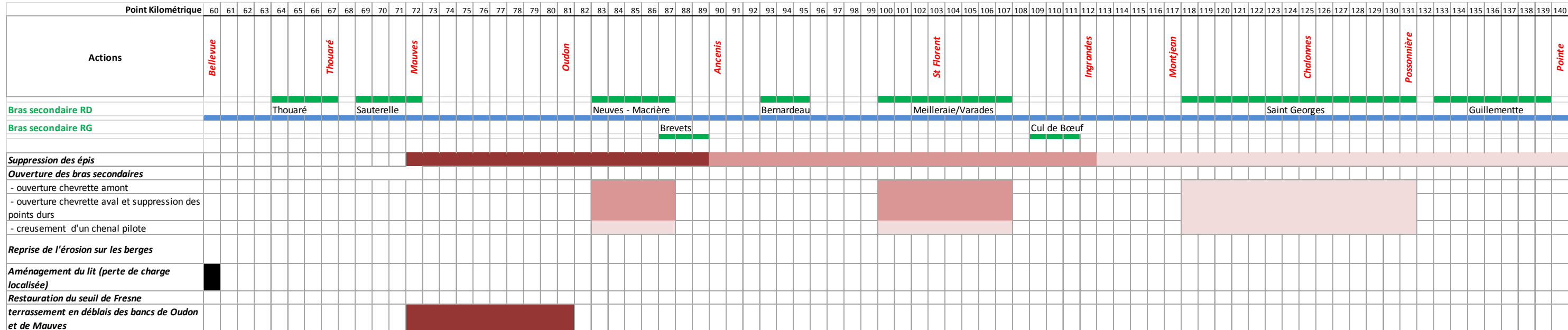
Programmation 202



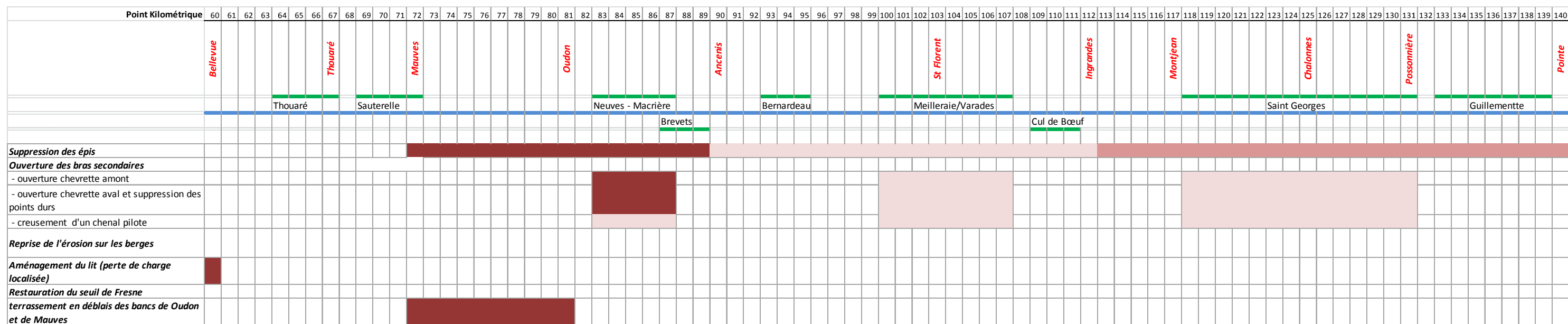
Programmation 203



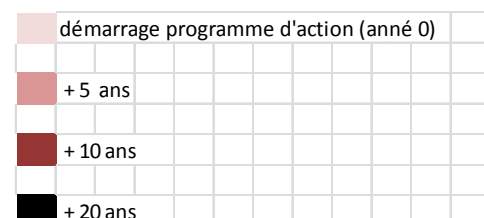
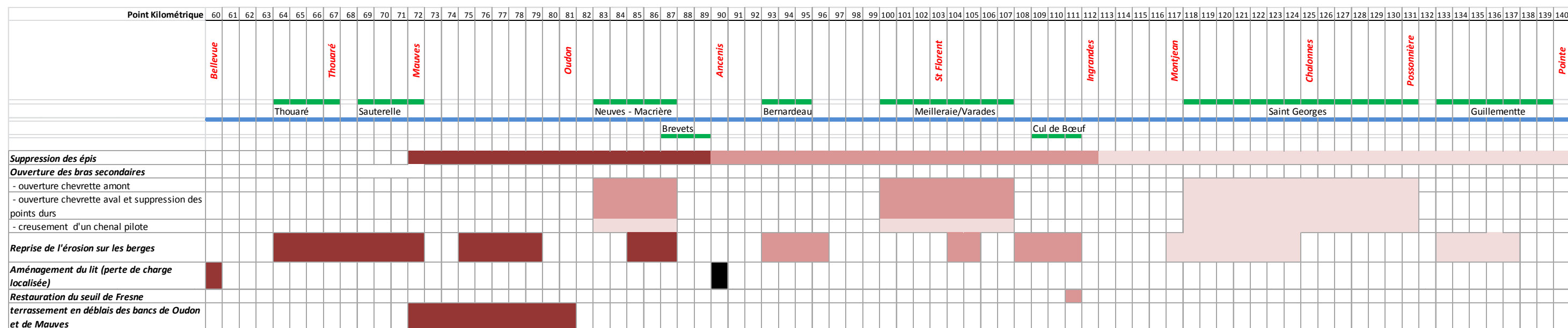
Programmation 204



Programmation 205



Programmation 206

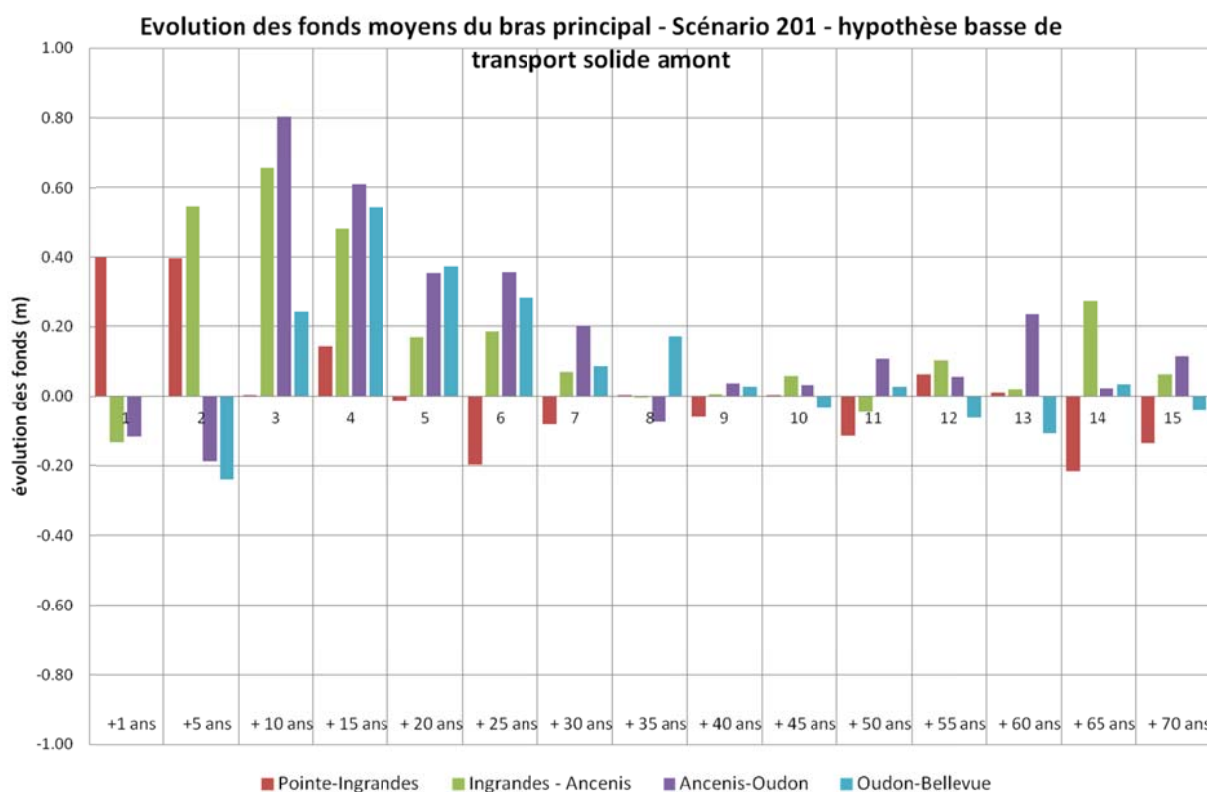


7.2. ANALYSE DES BILANS SÉDIMENTAIRES ET DE L'ÉVOLUTION DES FONDS

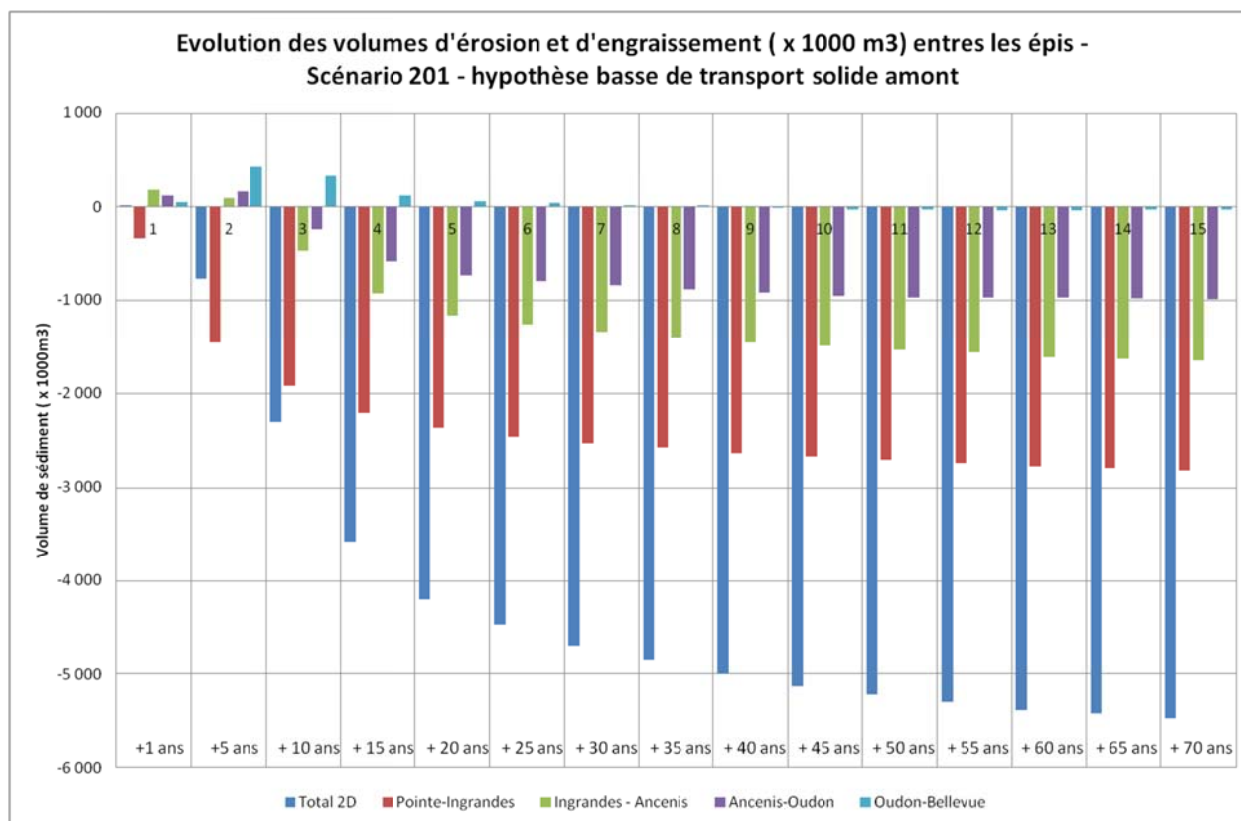
7.2.1. Programmation 201 :

La programmation 201 suit une logique amont-aval quant à la temporalité des interventions. Celles-ci concernent les suppressions des systèmes d'épis et la remise en eau des bras secondaires.

Les actions conduisent à libérer les sédiments piégés entre les épis et à diminuer les contraintes hydrauliques dans le bras principal (voir notes précédentes sur la présentation des leviers d'action). L'effet de ces actions est très perceptible sur les 30 premières années (voir graphique ci-après) et tend à s'atténuer ensuite. Cet équilibre sédimentaire pourrait être atteint après 40 ans et il ne semble pas remis en cause sur le long terme (+ 70 ans). L'érosion des bancs piégés entre les épis se manifeste sur une période de 20 ans environ, ensuite on observe une stabilisation des fonds.



Evolution des fonds moyens du bras principal pour la programmation 201 avec une hypothèse basse de transport solide amont



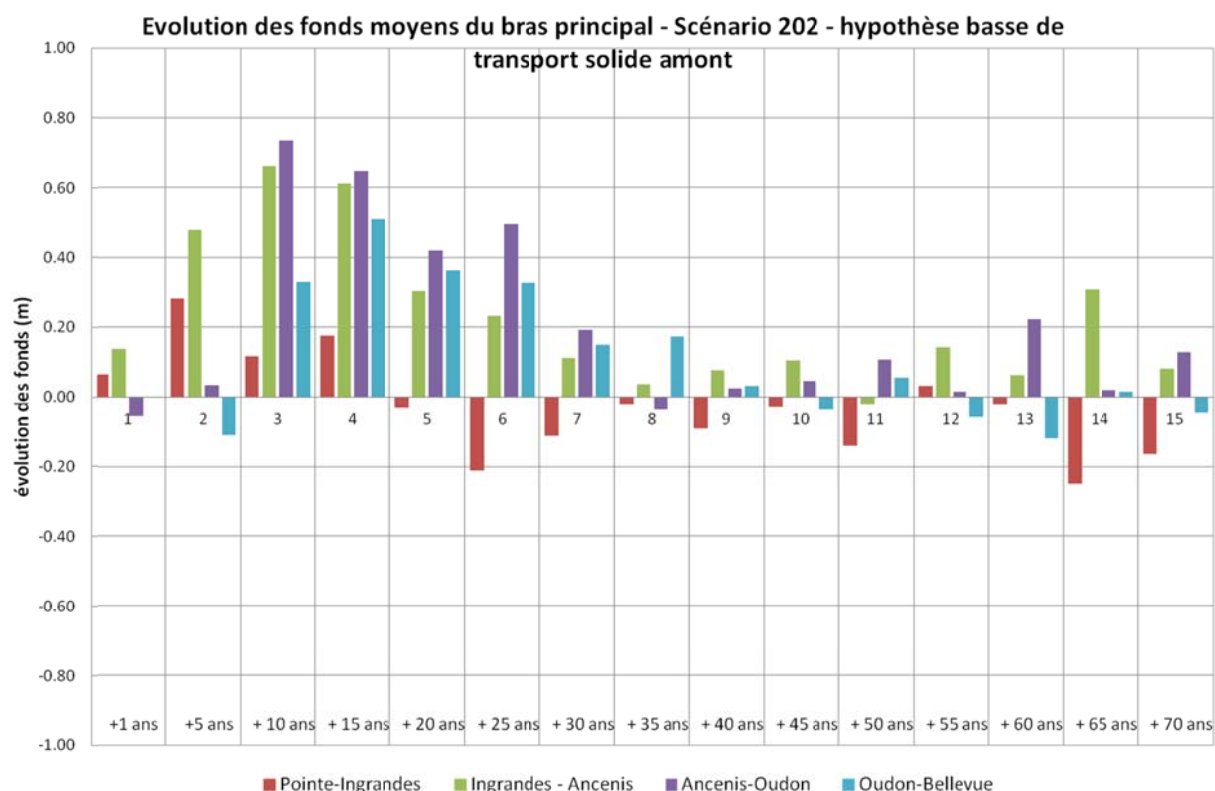
Evolution des volumes sédimentaires entre épis pour la programmation 201 avec une hypothèse basse de transport solide amont (érosion en - et engraissement en +)

7.2.2. Programmation 202 :

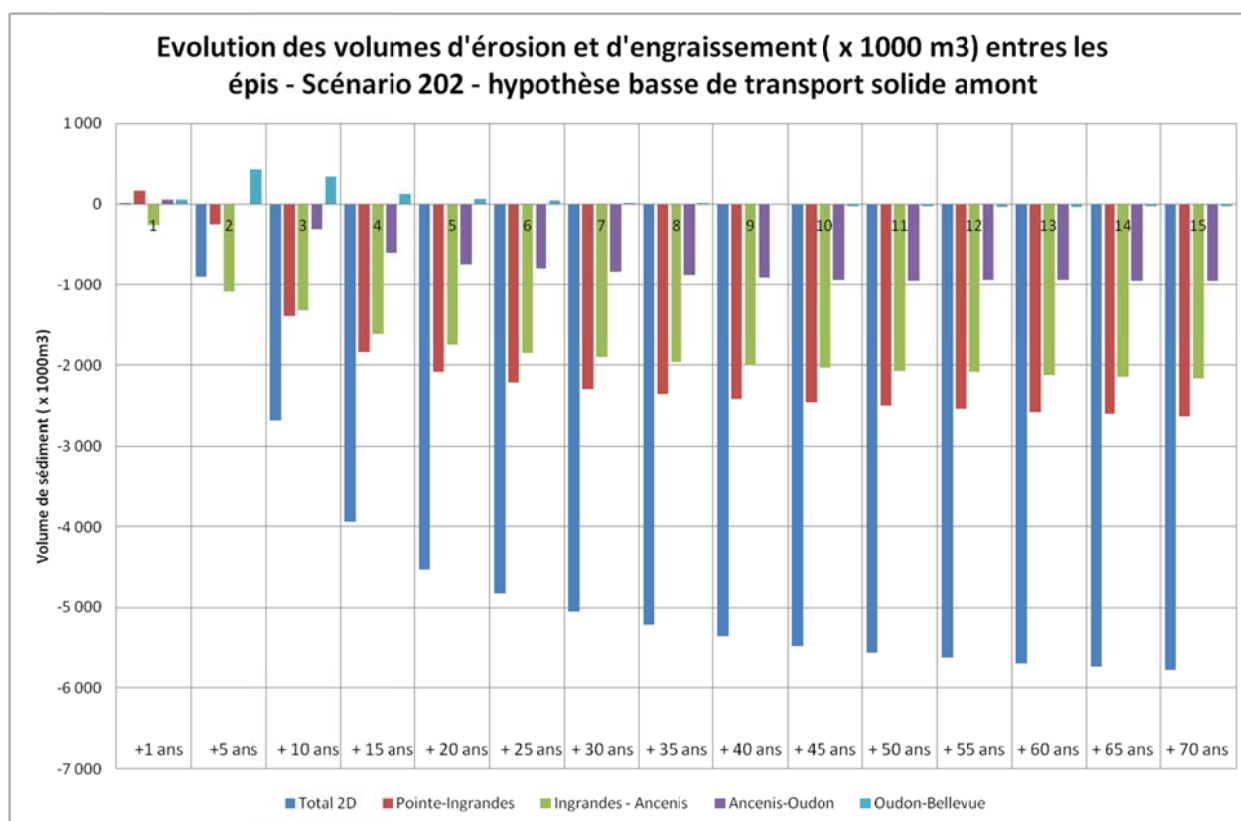
La programmation 202 donne la priorité au secteur médian le plus fortement soumis au risque d'incision des fonds, entre Ingrandes et Ancenis. Les interventions se poursuivent ensuite sur la partie amont pour terminer sur le secteur entre Ancenis et Bellevue. Encore une fois, les interventions ne concernent ici que les suppressions des systèmes d'épis et la remise en eau des bras secondaires.

Les évolutions à long terme sont quasi identiques à celles décrites précédemment (programmation 201).

On note toutefois une érosion finale des bancs entre les épis plus importante dans le secteur médian (Ingrandes - Ancenis) qui ne bénéficie néanmoins pas au ré engrèvement du fond, le déficit sédimentaire dans le chenal principal sur 40 et 70 années étant légèrement plus important pour la programmation 202 (- 235 000 m³ contre - 208 000 m³ pour la programmation 201).



Evolution des fonds moyens du bras principal pour la programmation 202 avec une hypothèse basse de transport solide amont

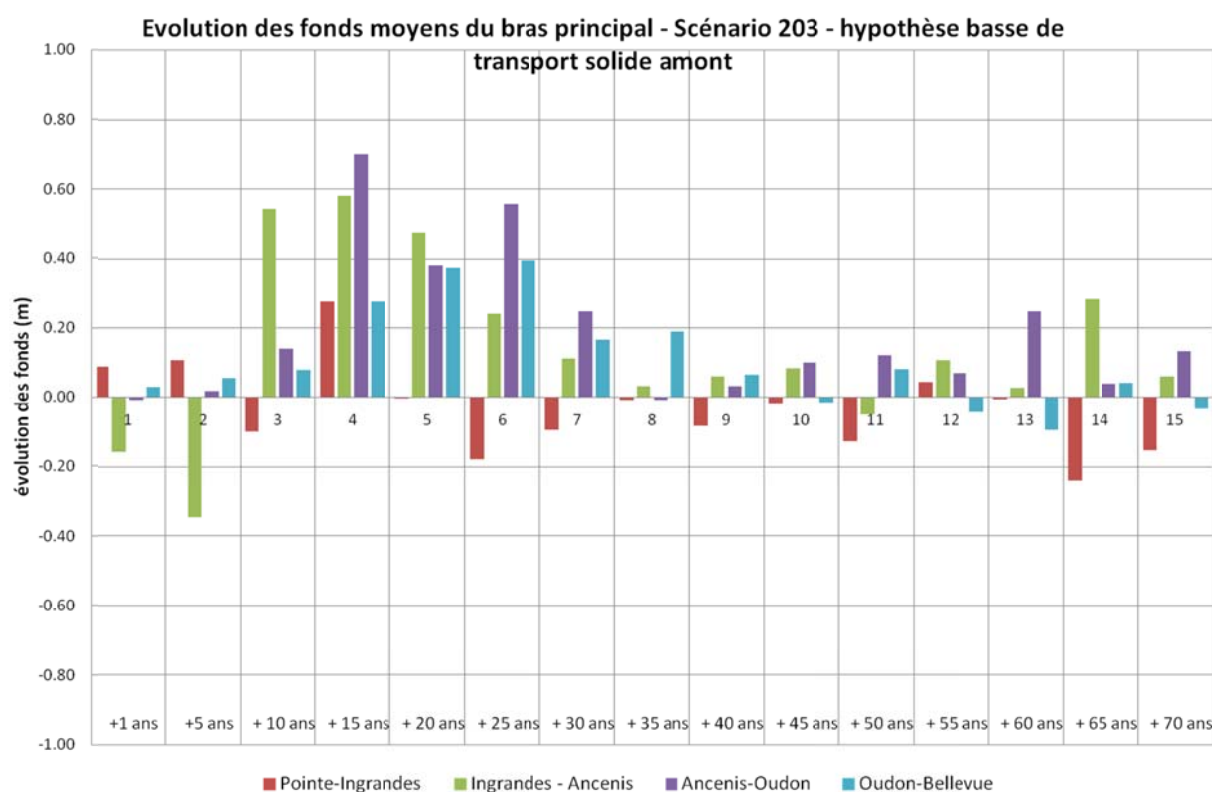


Evolution des volumes sédimentaires entre épis pour la programmation 202 avec une hypothèse basse de transport solide amont

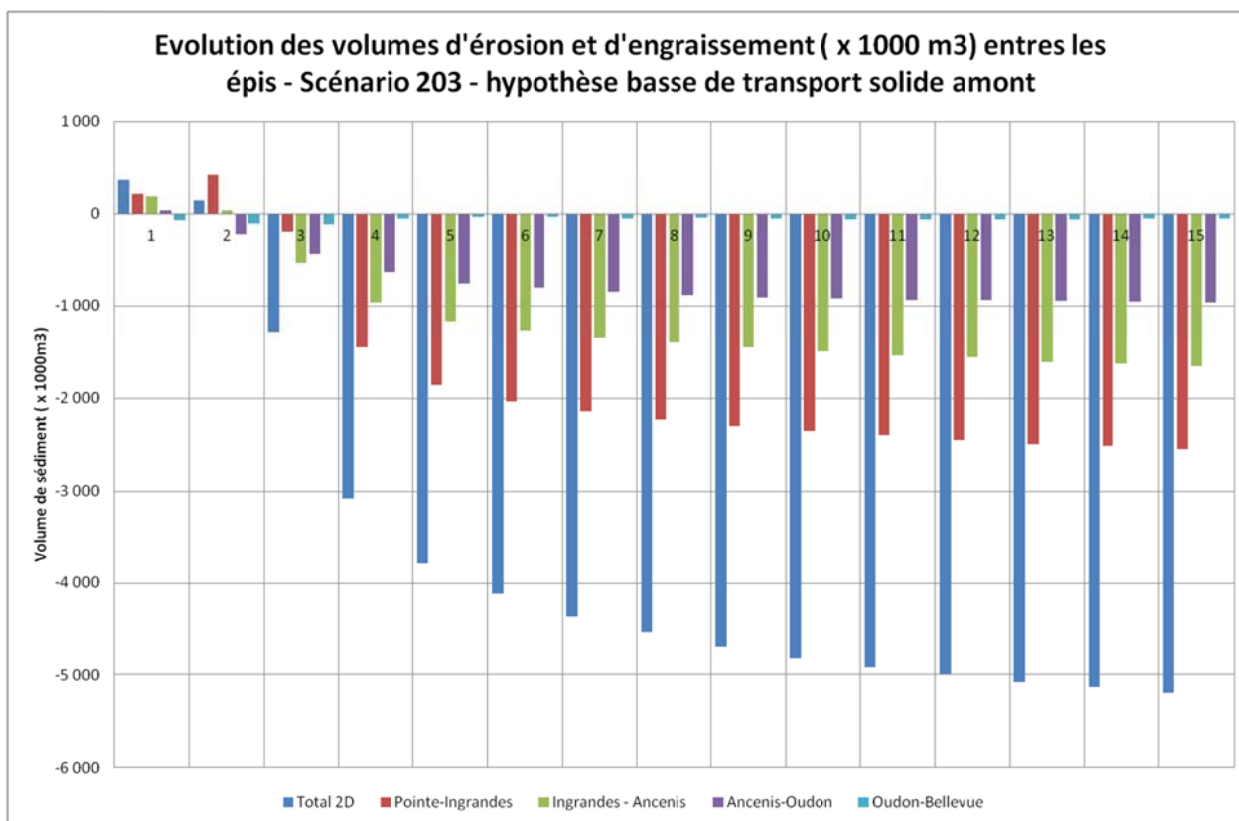
7.2.3. Programmation 203 :

La programmation 203 suit une logique aval-amont quant à la temporalité des interventions. Celles-ci ne concernent que les suppressions des systèmes d'épis et la remise en eau des bras secondaires.

Les résultats à +40 et 70 ans diffèrent guère des programmations 201 et 202. On peut néanmoins observer une légère amélioration du bilan sédimentaire dans le bras principal (-195 000 m³ contre -208 000 m³ pour la programmation 201 et -235 000 m³ pour la programmation 202).



Evolution des fonds moyens du bras principal pour la programmation 203 avec une hypothèse basse de transport solide amont

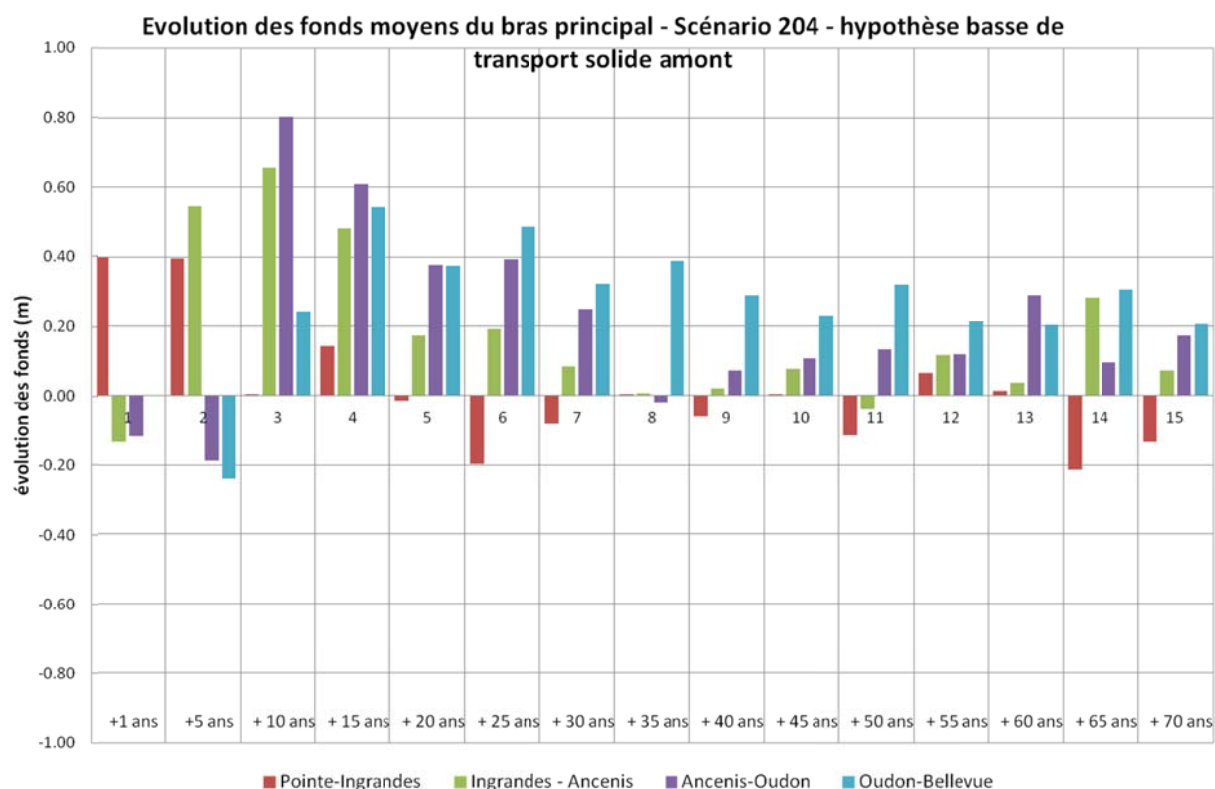


Evolution des volumes sédimentaires entre épis pour la programmation 203 avec une hypothèse basse de transport solide amont

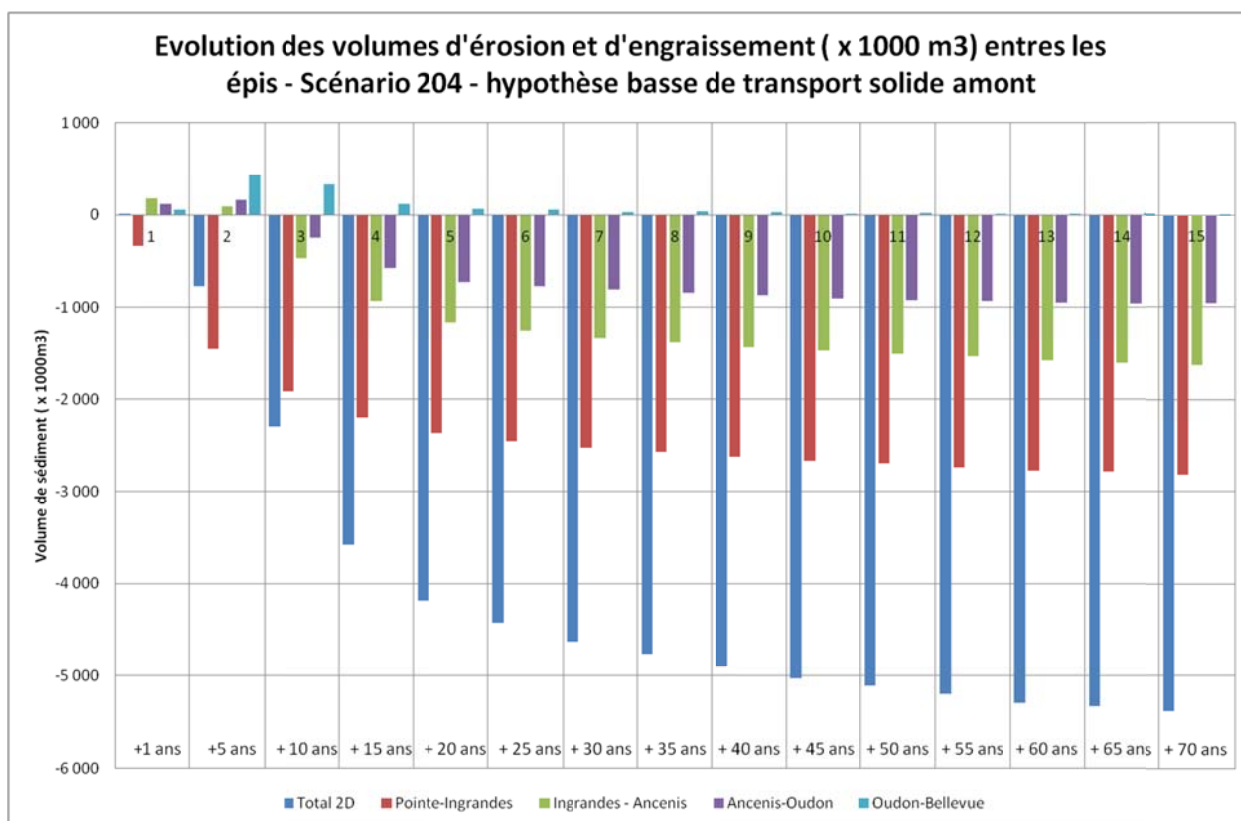
7.2.4. Programmation 204 :

Comme pour la 201, la programmation 204 suit une logique amont-aval avec en plus la réalisation de l'aménagement du lit dans le secteur de Bellevue à +20 ans, laissant le temps aux matériaux mobilisés en amont de migrer vers l'aval, en contribuant au réengrèvement progressif des secteurs intermédiaires.

L'évolution des fonds sur les 20 premières années est identique à celle de la programmation 201. Ensuite l'aménagement de Bellevue permet de conserver un bilan positif des sédiments accumulés dans le lit principal sur le secteur aval, entre Ancenis et Bellevue. Comme constaté lors des simulations réalisées en phase 1, l'aménagement de Bellevue n'a pas d'impact sur les secteurs en amont d'Ancenis.



Evolution des fonds moyens du bras principal pour la programmation 204 avec une hypothèse basse de transport solide amont



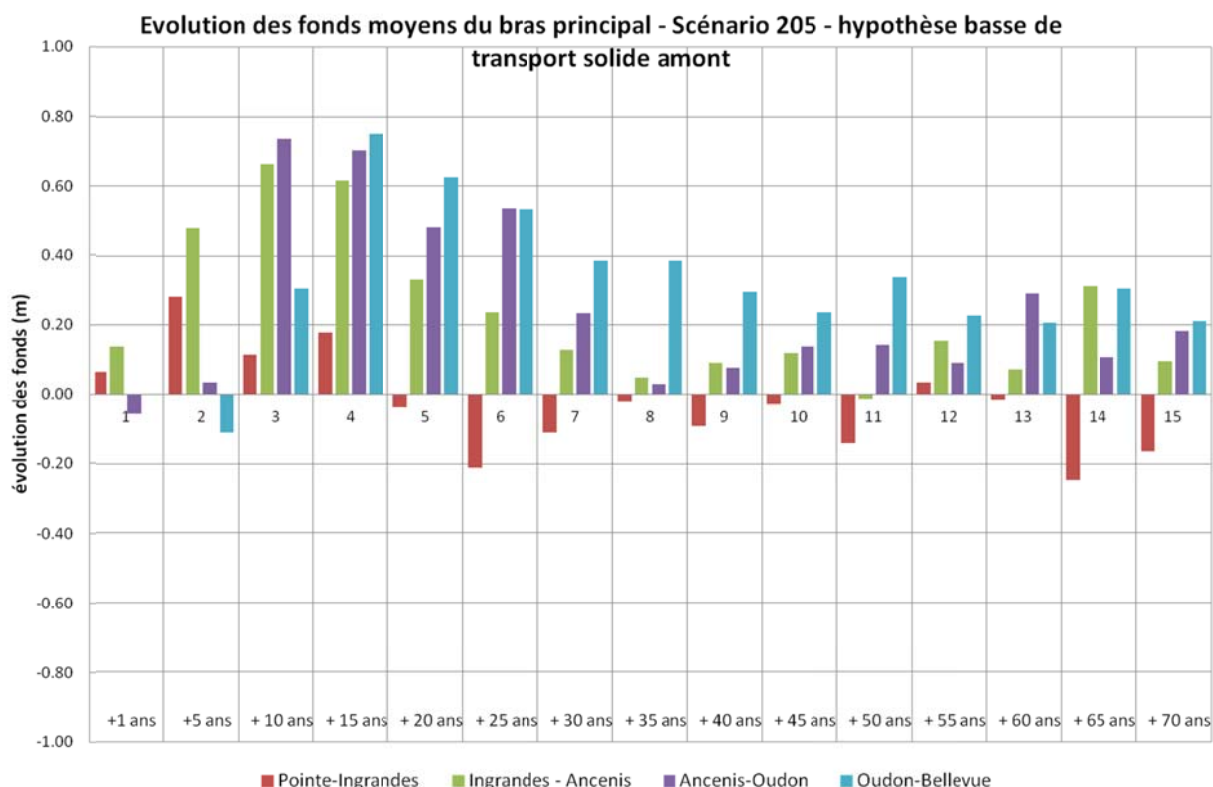
Evolution des volumes sédimentaires entre épis pour la programmation 204 avec une hypothèse basse de transport solide amont

7.2.5. Programmation 205 :

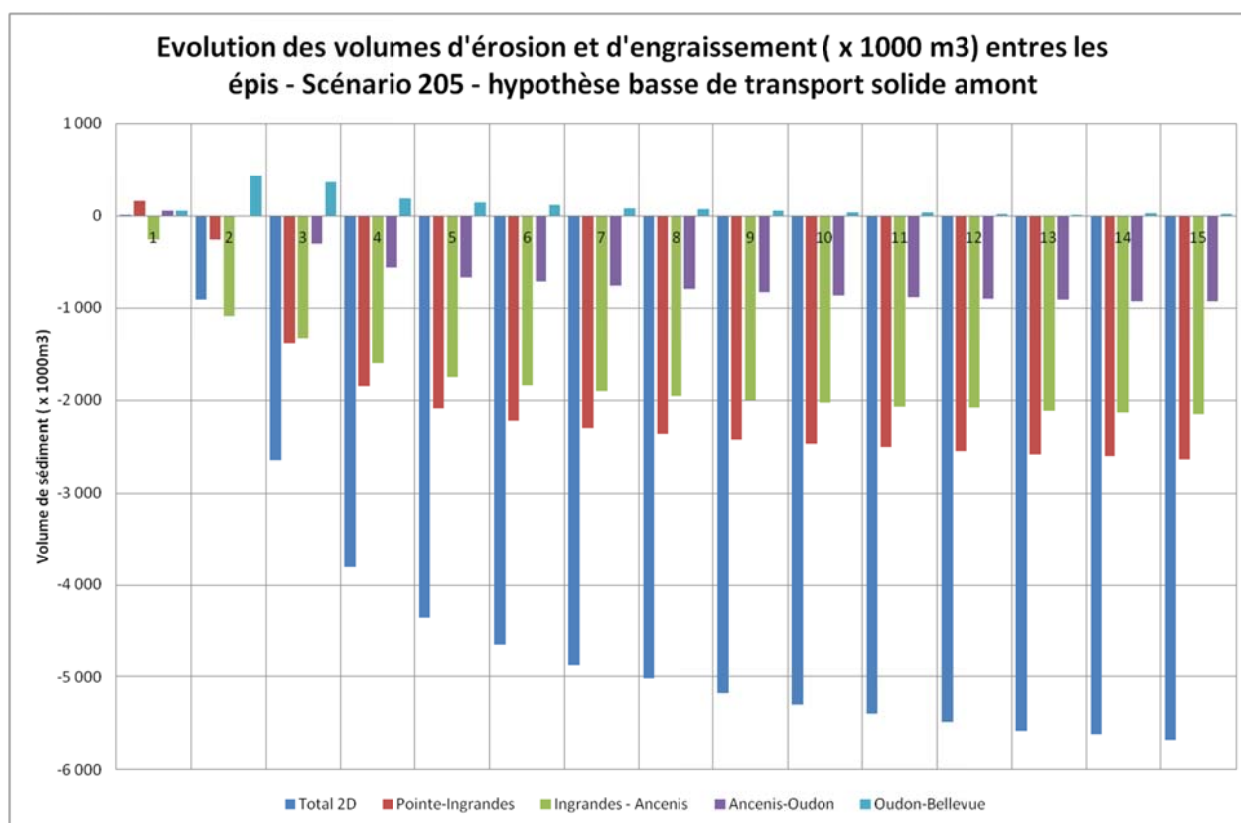
Comme pour la 202, la programmation 205 donne la priorité à la suppression des systèmes d'épis et la remise en eau des bras secondaire sur le secteur médian entre Ingrandes et Ancenis. Les interventions se font ensuite sur la partie amont pour terminer sur le secteur entre Ancenis et Bellevue. La réalisation de l'aménagement du lit dans le secteur de Bellevue est planifiée cette fois à 15 ans, laissant le temps aux matériaux mobilisés juste en amont d'Ancenis de migrer vers l'aval, en contribuant au réengrèvement progressif des secteurs Ancenis – Oudon – Bellevue.

L'évolution des fonds sur les 15 premières années est identique à celle de la programmation 202. Ensuite l'aménagement de Bellevue permet de conserver un bilan positif des sédiments accumulés dans le lit principal sur le secteur aval, entre Ancenis et Bellevue.

Les bilans sédimentaires des programmations 204 et 205, après 40 ans de simulation sont identiques. On note un excédent de sédiment dans le bras principal d'environ 1 Mm3 se traduisant par un rehaussement des fonds de 20 à 30 cm en aval de la zone d'étude (Oudon-Bellevue) et une stabilisation du lit en amont.



Evolution des fonds moyens du bras principal pour la programmation 205 avec une hypothèse basse de transport solide amont



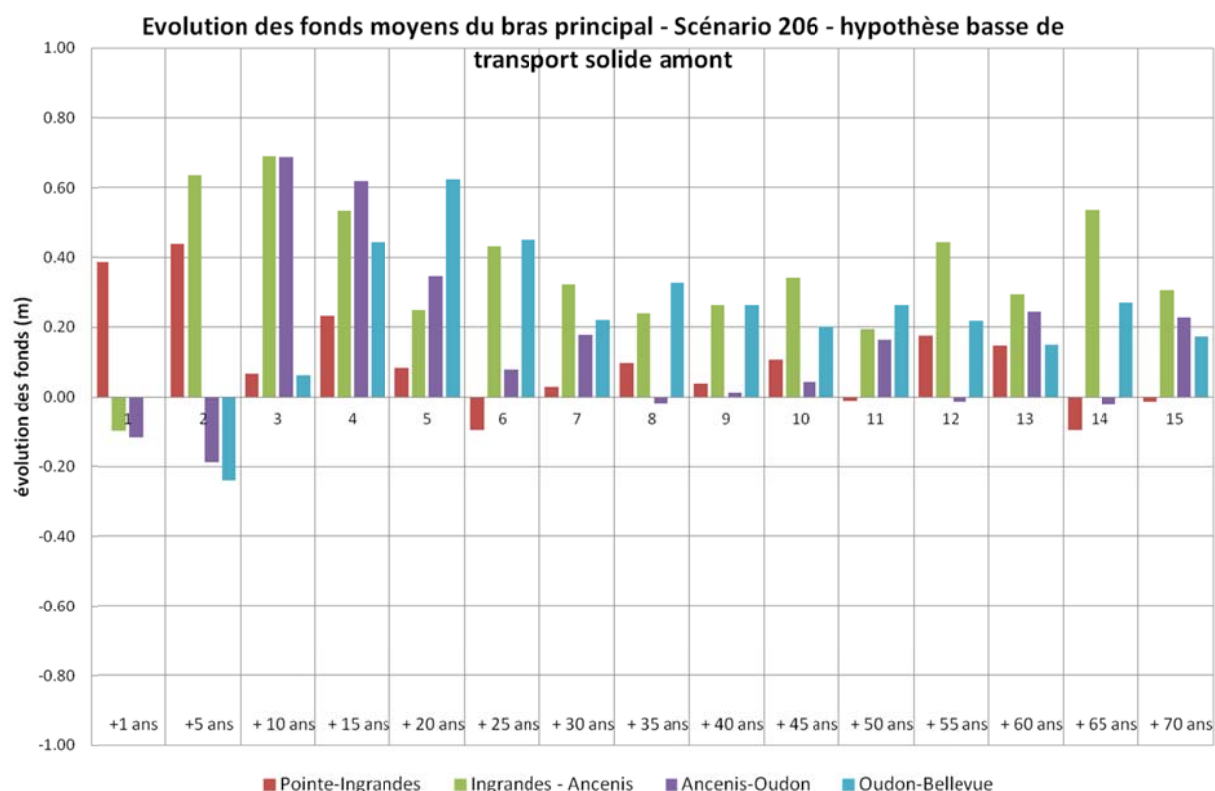
Evolution des volumes sédimentaires entre épis pour la programmation 205 avec une hypothèse basse de transport solide amont

7.2.6. Programmation 206 :

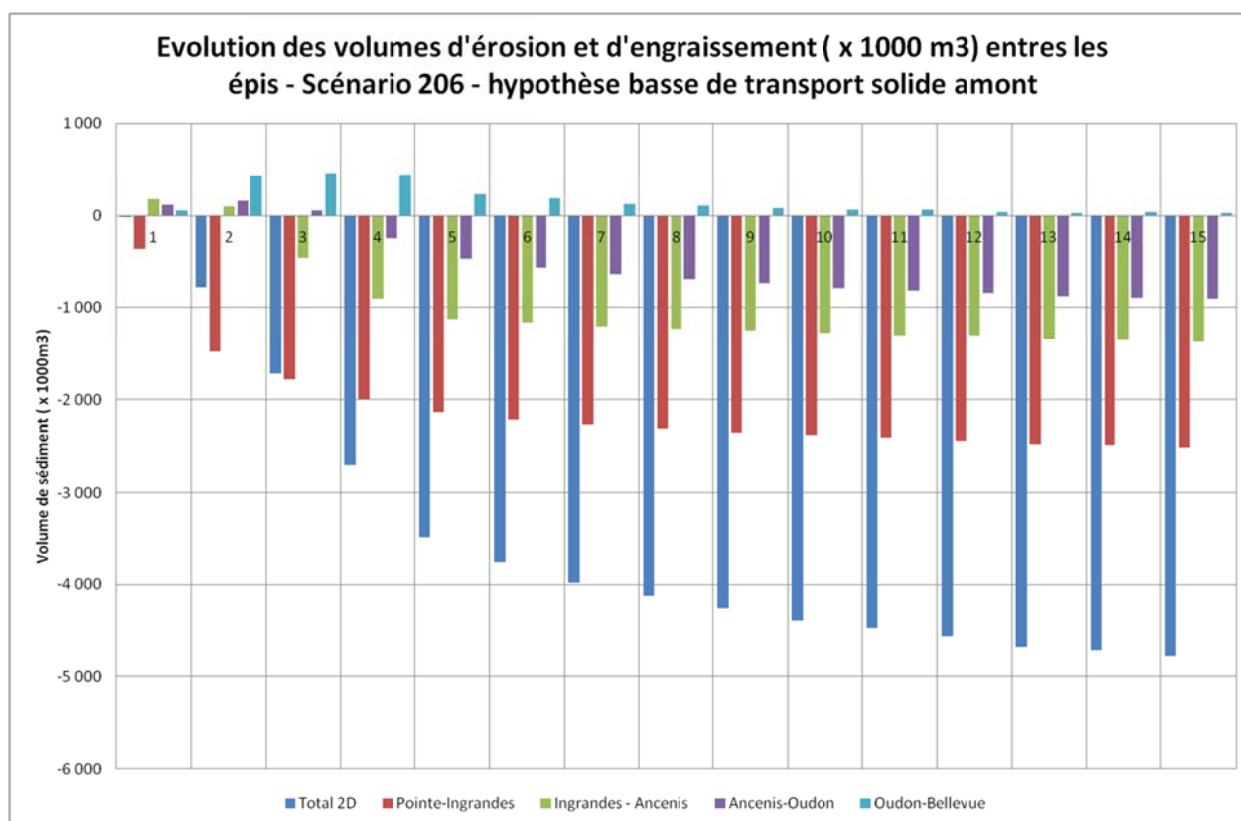
La programmation 206 est la plus complète en termes d'actions. Comme pour le 204, elle suit une logique amont-aval pour la suppression des systèmes d'épis et la remise en eau des bras secondaires. Ces interventions sont complétées par des actions visant à favoriser la reprise des érosions de berges, selon le même schéma amont-aval, ainsi que la restauration des seuils du Fresne-sur-Loire permettant de retrouver les pertes de charges initialement prévue (0,5 m). Enfin, deux actions structurantes sont prévues à échéance 10 ans et 20 ans, aménagement du lit à Bellevue et la création d'une perte de charge à Ancenis.

Si l'évolution des fonds est relativement comparable à celle de la programmation 201 sur les deux premières décennies, on peut constater que les seuils du Fresne-sur-Loire ont, dès leur restauration, un impact visible sur le bief amont, La Pointe – Ingrandes, et que les aménagements de Bellevue et d'Ancenis permettraient d'avoir un bilan positif à long terme sur l'ensemble des secteurs concernés.

Cette dernière programmation apporterait sans doute la réponse la plus complète pour permettre une dynamique d'engrèvement systématique de la Loire sur l'ensemble du bief La pointe-Bellevue.



Evolution des fonds moyens du bras principal pour la programmation 206 avec une hypothèse basse de transport solide amont



Evolution des volumes sédimentaires entre épis pour la programmation 206 avec une hypothèse basse de transport solide amont

7.2.7.Synthèse des fonds et bilan sédimentaire à long terme

On considère comme durée « à long terme », la période à l'issue de laquelle les évolutions sédimentaires initiées par les actions simulées, ne deviennent plus significatives et peuvent être assimilées au « bruit de fond » résultant de la variabilité des données d'entrée (hydrologie des apports amont). Les résultats de simulation montrent que cette durée est proche de 35-40 ans. Afin de disposer d'une durée de simulation suffisamment longue, les calculs ont été réalisés sur une durée de 70 ans. La chronique hydrologique utilisée correspond aux deux périodes successives suivantes 1965-2005 et 1965-1995.

On présente ci-après les résultats de simulation (évolution moyenne des fonds par bief et bilan sédimentaire) à + 40 ans et + 70 ans.

Evolution moyenne des fonds (valeur en m)

désignation	bras principal				bras secondaire			
	1	2	3	4	1	2	3	4
scénario 1: tendanciel - 40 ans	-0.26	-0.41	-0.42	-0.21	0.10	0.09	0.54	0.40
scénario 1: tendanciel - 70 ans	-0.38	-0.18	-0.50	-0.29	-0.04	0.13	0.95	0.46
programmation 201- 40 ans	-0.09	0.02	0.01	0.01	0.14	0.00	0.25	0.50
programmation 201- 70 ans	-0.23	0.02	0.10	-0.07	-0.04	-0.14	0.17	0.59
programmation 202 - 40 ans	-0.12	0.08	0.00	0.02	0.12	-0.01	0.25	0.50
programmation 202 - 70 ans	-0.26	0.03	0.12	-0.07	-0.05	-0.14	0.18	0.59
programmation 203- 40 ans	-0.11	0.07	0.00	0.05	0.13	0.00	0.24	0.50
programmation 203- 70 ans	-0.25	0.01	0.12	-0.06	-0.05	-0.15	0.17	0.59
programmation 204 - 40 ans	-0.09	0.03	0.04	0.30	0.14	0.01	0.26	0.73
programmation 204 - 70 ans	-0.23	0.03	0.16	0.21	-0.04	-0.13	0.19	0.87
programmation 205- 40 ans	-0.12	0.10	0.05	0.31	0.12	0.00	0.26	0.78
programmation 205- 70 ans	-0.26	0.05	0.17	0.22	-0.05	-0.13	0.19	0.90
programmation 206 - 40 ans	0.01	0.25	-0.01	0.28	0.18	-0.03	0.20	0.73
programmation 206 - 70 ans	-0.12	0.24	0.22	0.18	0.01	-0.17	0.20	0.85

Evolution relative des fonds par rapport au scénario tendanciel (valeur en m)

désignation	bras principal				bras secondaire			
	1	2	3	4	1	2	3	4
programmation 201- 40 ans	0.17	0.43	0.42	0.22	0.04	-0.09	-0.29	0.10
programmation 201- 70 ans	0.15	0.20	0.60	0.22	0.00	-0.27	-0.77	0.13
programmation 202 - 40 ans	0.15	0.49	0.41	0.22	0.02	-0.10	-0.29	0.10
programmation 202 - 70 ans	0.12	0.22	0.61	0.22	-0.01	-0.26	-0.77	0.13
programmation 203- 40 ans	0.16	0.48	0.42	0.26	0.03	-0.09	-0.30	0.10
programmation 203- 70 ans	0.14	0.20	0.62	0.23	-0.01	-0.27	-0.77	0.13
programmation 204 - 40 ans	0.17	0.42	0.54	0.15	-0.15	-0.24	-0.37	0.18
programmation 204 - 70 ans	0.15	0.22	0.54	0.59	0.18	-0.12	-0.69	0.27
programmation 205- 40 ans	0.15	0.50	0.47	0.52	0.03	-0.09	-0.29	0.37
programmation 205- 70 ans	0.12	0.23	0.67	0.51	-0.01	-0.26	-0.75	0.45
programmation 206 - 40 ans	0.28	0.65	0.41	0.49	0.08	-0.12	-0.34	0.32
programmation 206 - 70 ans	0.27	0.42	0.71	0.47	0.05	-0.30	-0.74	0.40

1 : La Pointe – Ingrandes
2 : Ingrandes – Ancenis
3 : Ancenis –Oudon
4 : Oudon – Bellevue

Les simulations mettent ainsi en évidence les principales tendances ci-après:

- ☐ Pour les programmations 201, 202, 203 : une difficulté persistante à stabiliser le fond du lit entre la Pointe et Montjean et une stabilisation du fond du chenal principal en aval de Montjean.
- ☐ Pour les programmations 204, 205 et 206 : un engraissement progressif du lit de l'amont vers l'aval (effet de l'aménagement de Bellevue). On note une difficulté persistante pour stabiliser le lit en amont de Montjean.
- ☐ La réouverture des bras ne suffit pas à éviter leur engravement progressif, à l'exception du bras de Varades (moins perché que les autres bras).

Bilan sédimentaire en milliers de m3

désignation	bras principal				bras secondaire				système d'épis				total par secteur				total par morphologie			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	total
scénario 1: tendanciel - 40 ans	-795	-913	-643	-659	151	319	376	437	452	699	273	634	-192	106	6	412	-3009	1284	2058	333
scénario 1: tendanciel - 70 ans	-983	-355	-694	-948	-53	330	654	469	407	745	255	655	-629	720	215	176	-2980	1401	2062	483
programmation 201- 40 ans	-166	14	55	105	-50	164	175	547	-2633	-1449	-914	-14	-2849	-1271	-684	638	8	835	-5009	-4166
programmation 201- 70 ans	-369	142	177	-157	-297	-142	119	619	-2815	-1644	-982	-33	-3482	-1644	-687	429	-208	298	-5475	-5384
programmation 202 - 40 ans	-249	176	36	123	-57	157	174	547	-2421	-2006	-914	-14	-2727	-1673	-703	656	86	821	-5354	-4447
programmation 202 - 70 ans	-448	187	195	-169	-306	-135	123	618	-2632	-2165	-950	-33	-3387	-2113	-631	416	-235	300	-5780	-5716
programmation 203- 40 ans	-220	138	46	249	-38	158	168	547	-2293	-1446	-902	-49	-2550	-1149	-688	747	213	835	-4689	-3640
programmation 203- 70 ans	-419	136	202	-114	-297	-156	121	617	-2546	-1644	-954	-53	-3262	-1664	-630	450	-195	284	-5196	-5106
programmation 204 - 40 ans	-164	42	109	1124	-47	168	177	804	-2628	-1431	-869	24	-2839	-1220	-583	1952	1111	1102	-4904	-2690
programmation 204 - 70 ans	-363	164	267	794	-296	-132	130	919	-2815	-1621	-960	11	-3474	-1590	-564	1724	861	621	-5385	-3903
programmation 205- 40 ans	-246	207	118	1148	-55	171	177	847	-2420	-1992	-820	55	-2721	-1614	-525	2050	1227	1139	-5176	-2810
programmation 205- 70 ans	-453	217	281	818	-303	-125	132	953	-2632	-2149	-924	18	-3388	-2057	-512	1789	863	657	-5687	-4167
programmation 206 - 40 ans	106	606	19	1026	76	-130	141	800	-2357	-1252	-733	85	-2174	-776	-573	1912	1757	888	-4256	-1611
programmation 206 - 70 ans	-38	700	353	668	-170	-455	139	899	-2520	-1370	-904	25	-2728	-1124	-411	1592	1684	413	-4769	-2671

Différence avec scénario tendantiel

désignation	bras principal				bras secondaire				système d'épis				total par secteur				total par morphologie			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	total
programmation 201- 40 ans	629	927	698	764	-202	-156	-202	110	-3084	-2148	-1187	-648	-2657	-1377	-691	226	3018	-449	-7067	-4499
programmation 201- 70 ans	613	497	871	791	-244	-472	-536	149	-3222	-2390	-1237	-687	-2853	-2364	-903	253	2772	-1103	-7536	-5867
programmation 202 - 40 ans	545	1088	679	782	-208	-162	-202	110	-2872	-2705	-1187	-648	-2535	-1779	-710	244	3095	-463	-7413	-4780
programmation 202 - 70 ans	534	542	889	779	-253	-465	-531	149	-3039	-2911	-1205	-687	-2758	-2834	-847	240	2744	-1101	-7842	-6198
programmation 203- 40 ans	575	1051	689	908	-189	-161	-208	110	-2744	-2145	-1175	-683	-2358	-1255	-694	335	3223	-449	-6747	-3973
programmation 203- 70 ans	564	491	896	834	-244	-486	-534	148	-2952	-2389	-1209	-708	-2633	-2384	-846	274	2785	-1116	-7258	-5589
programmation 204 - 40 ans	630	1049	846	545	-449	-475	-256	180	-2997	-2343	-1227	-687	-3070	-1770	-637	38	2815	-1000	-7254	-5439
programmation 204 - 70 ans	619	397	803	2072	6	-161	-477	335	-3035	-2176	-1124	-630	-2210	-1940	-798	1776	4091	-298	-6966	-3173
programmation 205- 40 ans	549	1119	761	1807	-207	-149	-200	410	-2871	-2691	-1093	-579	-2529	-1720	-531	1638	4236	-144	-7235	-3143
programmation 205- 70 ans	530	572	975	1766	-250	-455	-523	483	-3038	-2894	-1180	-636	-2759	-2777	-727	1613	3843	-744	-7748	-4650
programmation 206 - 40 ans	900	1519	662	1685	-75	-450	-235	363	-2808	-1951	-1006	-549	-1982	-882	-579	1500	4766	-396	-6314	-1944
programmation 206 - 70 ans	945	1055	1047	1616	-117	-785	-515	430	-2927	-2115	-1159	-630	-2099	-1844	-626	1416	4664	-987	-6830	-3153

7.3. ANALYSE DES LIGNES D'EAU

7.3.1. Méthodologie adoptée

L'analyse du scénario sans intervention structurante est indispensable pour aider à la construction du programme final car elle va permettre de quantifier les impacts sédimentaires relatifs des différents leviers présentés précédemment sur le comportement de la ligne d'eau à différents débits.

Comme le montre les résultats précédents à +40 et 70 ans, il n'y a que peu de différence d'évolution des fonds entre les programmations 201, 202 et 203. Cependant, le scénario P203 présentant un bilan sédimentaire légèrement plus favorable, l'analyse des lignes d'eau a donc été conventionnellement faite sur ce scénario, sans action complémentaire consistant à relever artificiellement la ligne d'eau (aménagement de Bellevue et d'Ancenis).

Les débits caractéristiques retenus sont :

- ☐ L'étiage (220 m³/s)
- ☐ Le module (850 m³/s)
- ☐ Le débit de crue annuelle (2260 m³/s)

Les lignes d'eau à différents débits ont été calculées de la façon suivante :

- ☐ Simulation des scénarios tendanciel et P203 sur 75 ans et enregistrement des fonds modifiés.
- ☐ Simulation, pour la situation à + 40 ans et avec fonds modifiés, des conditions d'écoulements à 220 m³/s, 850 m³/s et 2260 m³/s. Afin de permettre une mise en eau progressive des bras, une rampe de débits croissants a été appliquée en entrée du modèle.

Les résultats analysés correspondent à la situation en régime permanent établi après plusieurs heures. Il convient donc de noter que cette situation prend également en compte une évolution possible des fonds durant la simulation.

Les résultats analysés portent sur :

- ☐ Les cotes d'eau et de fond dans les différents bras ;
- ☐ Les volumes d'érosion et de dépôts dans les biefs filaires et dans les systèmes d'épis ;
- ☐ Les débits dans les différents bras.

7.3.2. Evolution de la ligne d'eau d'étiage

Scénario tendanciel

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 dans 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 (PK92 à 82)
- ☐ entre Saint Florent-le-Vieil et Ancenis (PK 104 à 92)
- ☐ en aval de Chalonnes-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.

Scénario P203

L'évolution de la ligne d'eau est reportée sur le profil en long joint. Les résultats obtenus appellent les principaux commentaires ci-après.

Par rapport à la situation actuelle, la ligne d'eau d'étiage remonte :

- ☐ en aval de Mauves (aval du PK 70)
- ☐ entre les PK 86 (boire de la patache) et 74 (boire d'Anjou)
- ☐ dans le secteur d'Ancenis (PK 92 à 90)
- ☐ entre Montjean et Ingrandes (PK 116 à 112.5)

Ailleurs elle baisse.

7.3.3. Evolution des lignes d'eau au module

Scénario tendanciel

Les évolutions de ligne d'eau pour le débit moyen annuel sont nettement moins marquées.

On note :

- ☐ une stabilité relative de la ligne d'eau en amont d'Ingrandes ;
- ☐ une baisse de la ligne d'eau entre Ingrandes et Oudon d'environ 0.1 à 0.3 m ;
- ☐ une relative stabilité en aval (+0 à -0.2 m).

Scénario P203

La baisse de la ligne d'eau est plus marquée (-0.2 à -0.5m) et se fait sentir sur un linéaire plus important (tout le bief en amont d'Oudon). En aval d'Oudon, on note une relative stabilité (légère baisse entre Oudon et Mauves, hausse en aval).

7.3.4. Evolution des lignes d'eau pour le débit de crue annuelle

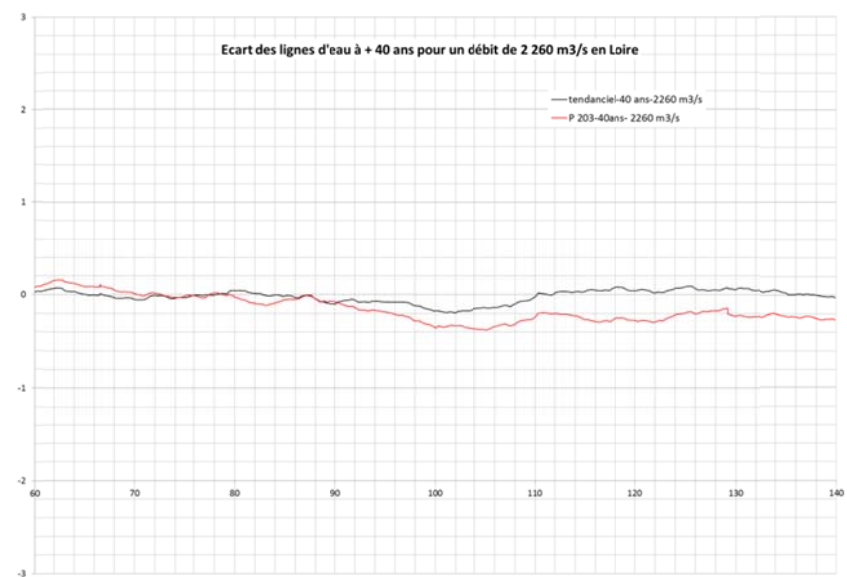
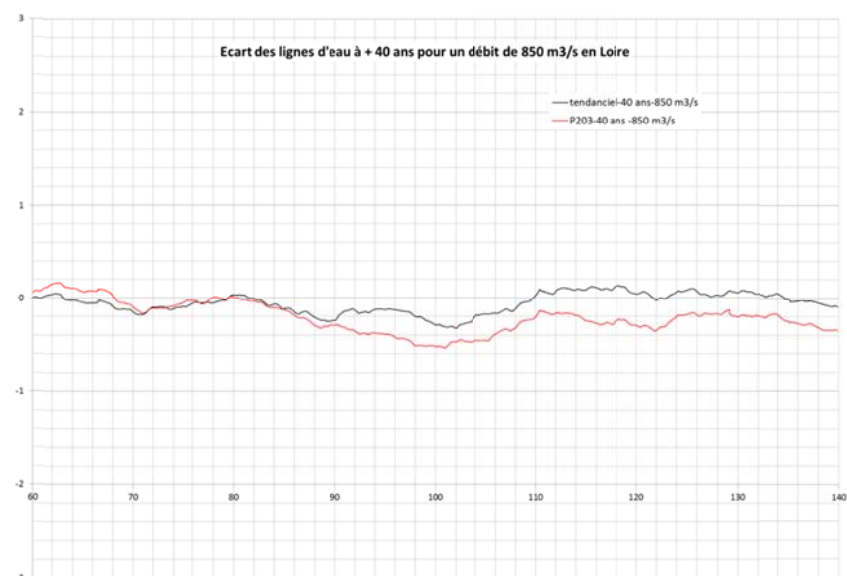
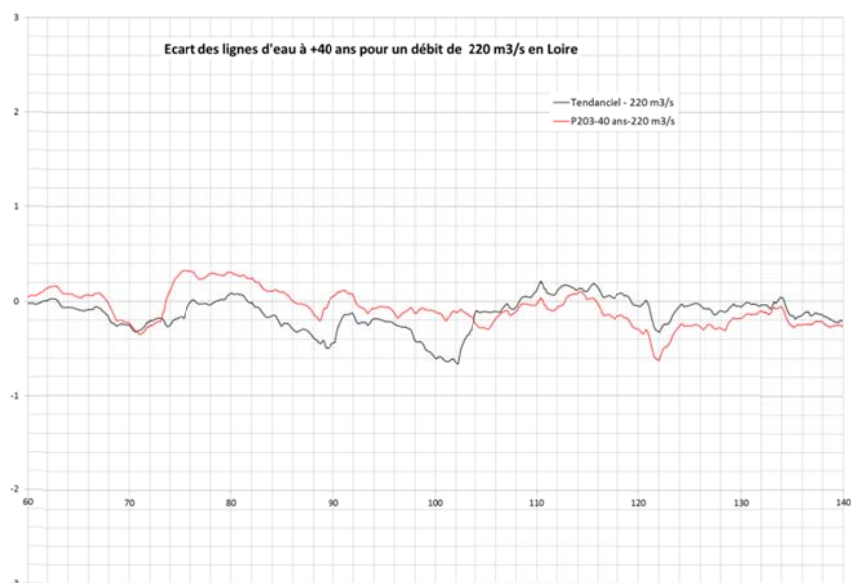
Scénario tendanciel

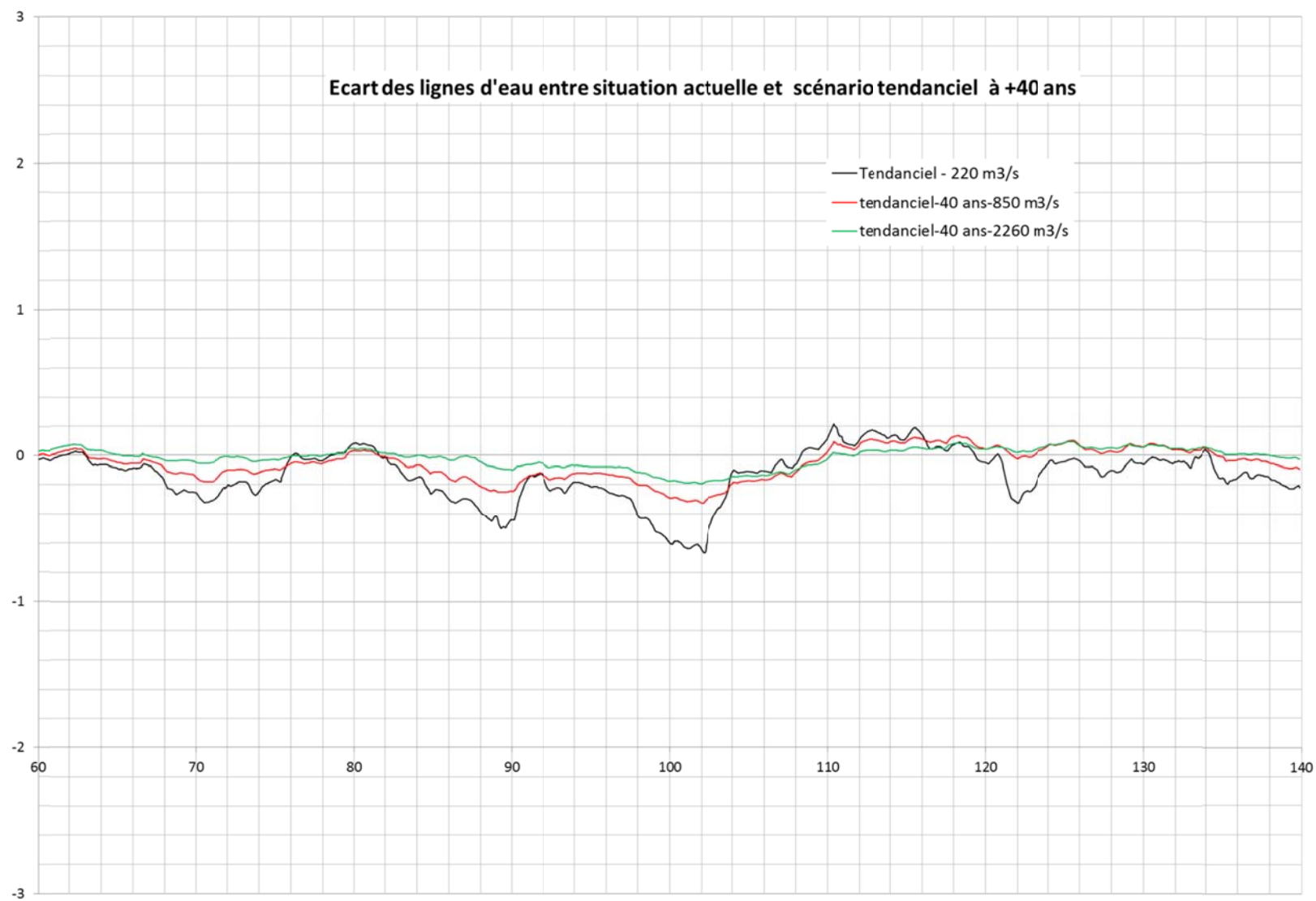
On note les mêmes tendances observées pour le débit de 850 m³/s avec des écarts cependant plus faibles, avec :

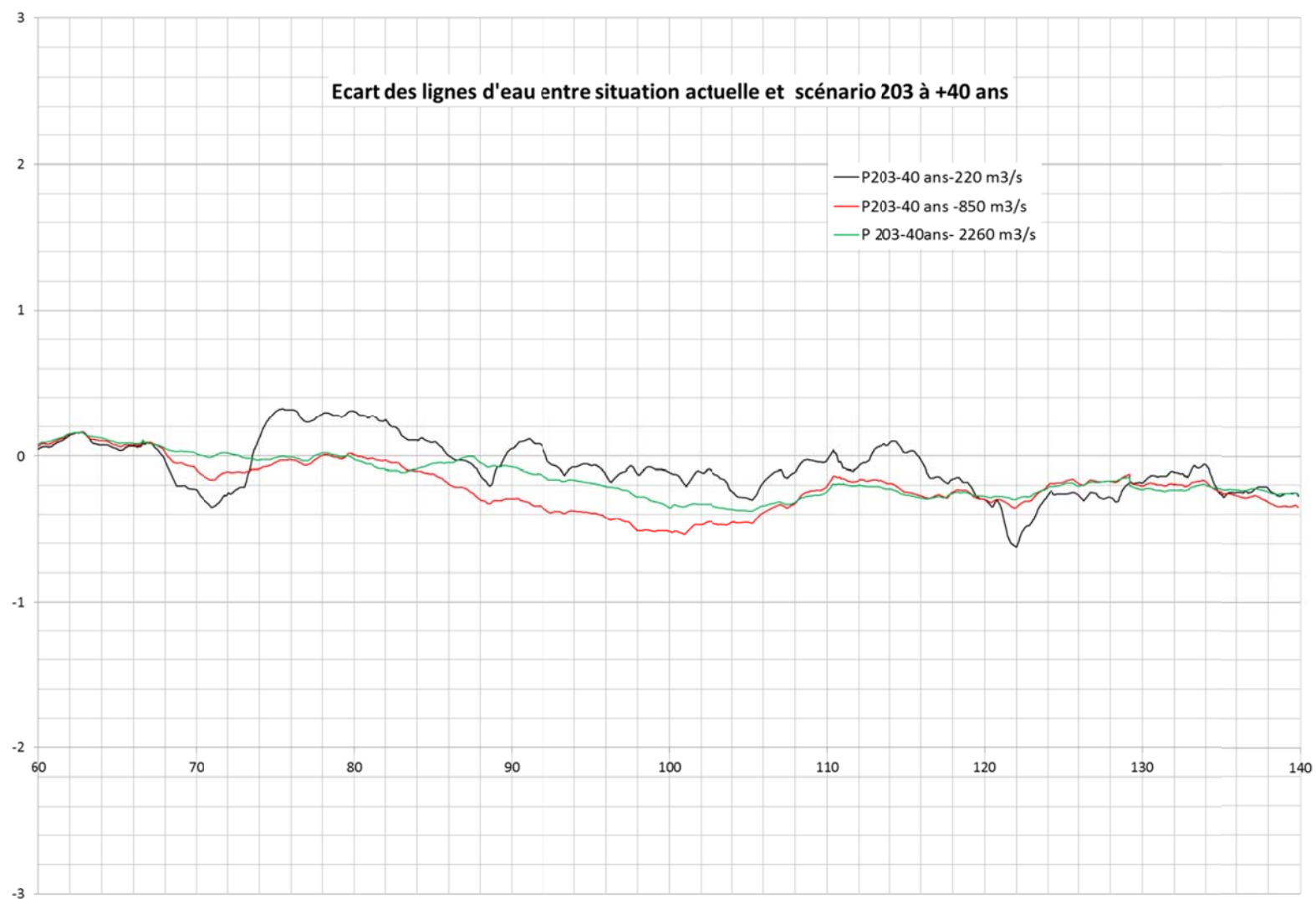
- ☐ une stabilité relative de la ligne d'eau en amont d'Ingrandes ;
- ☐ une baisse de la ligne d'eau entre Ingrandes et Oudon d'environ (0.1 à 0.2 m) ;
- ☐ une relative stabilité en aval (-0.1 m à +0.1 m).

Scénario P203

La baisse de la ligne d'eau se fait sentir sur tout le bief en amont d'Oudon, avec cependant des écarts moins importants que pour le module entre Ingrandes et Oudon. En aval d'Oudon, on note une relative stabilité (légère baisse entre Oudon et Mauves, hausse en aval).







7.4. LES PRINCIPALES CAUSES DES ÉVOLUTIONS CONSTATÉES

7.4.1. Les principales causes possibles des évolutions de ligne d'eau

Les évolutions des lignes d'eau calculées par le modèle résultent de la complexité des mouvements sédimentaires ayant des conséquences sur l'évolution des fonds et sur la répartition des débits entre les différentes composantes du lit actif : chenal navigable, bras secondaires et bancs situés entre les épis.

Aussi une ligne d'eau d'étiage peut-elle baisser alors que le fond du chenal principal s'engrave si le débit se réparti sur une plus grande largeur au miroir (augmentation des bras en eau, ou élargissement du lit principal après érosion des bancs entre les épis).

Il convient d'ailleurs d'être très prudent sur les résultats de ces calculs tant le modèle mis en œuvre ne peut rendre compte de la complexité locale des processus de réajustement du lit suite aux actions qui pourraient être réalisées. Le reméandrement du lit d'étiage ou les processus de dépôt et reprise de matériaux pouvant conduire à recréer un pseudo tressage dans l'espace libéré par la suppression des épis sont ainsi des processus qui ne peuvent être restitués par le modèle.

On propose dans les paragraphes suivants de préciser les principales causes pouvant expliquer les évolutions observées des lignes d'eau. On rappellera au préalable les principaux résultats du bilan sédimentaire, puis nous analyserons l'évolution des caractéristiques hydrauliques du lit d'étiage.

7.4.2. Bilan sédimentaire et évolution des fonds

Les principales tendances du bilan sédimentaire mises en évidence par le modèle entre La Pointe et Bellevue, sont rappelées ci-après (apport solide amont pris égal à 60% de la capacité de transport théorique par charriage).

- ☐ En situation tendancielle à 40 ans. Les évolutions seront modérées avec globalement une poursuite du processus d'érosion du chenal principal.
 - Ensemble du lit (bras principal + bras secondaire+ systèmes d'épis) : équilibre dépôt/érosion ;
 - Lit principal (hors système d'épis) : déstockage de matériaux avec poursuite de l'incision (volume d'érosion annuel moyenné sur 40 ans, de 30 000 m³ environ) ;
 - Bras secondaires : dépôt (sans doute proche de 20 000 m³/an) ;
 - Système d'épis : équilibre relatif ($\pm 10\,000$ m³/an).
- ☐ Scénario 203 à 40 ans : stabilisation du fond du chenal principal et forte érosion des systèmes d'épis.
 - Ensemble du lit (bras principal + bras secondaire+ systèmes d'épis) : déstockage de matériaux (sans doute compris entre 50 000 et 100 000 m³/an)
 - Lit principal (hors système d'épis) : stabilisation et léger engravement des fonds ;
 - Bras secondaires : relatif équilibre (léger engravement) ;
 - Système d'épis : forte érosion des bancs entre épis (-100 000 m³/an).

Ces tendances masquent une réalité plus complexe à une plus petite échelle. Une analyse des évolutions du lit a donc été menée bief par bief, représentant quelques kilomètres de Loire. Les tableaux page suivante portent sur les résultats obtenus dans le chenal principal. Ils indiquent l'évolution des volumes d'érosion/dépôt, des fonds et des lignes d'eau.

Ces résultats appellent les principaux commentaires ci-après :

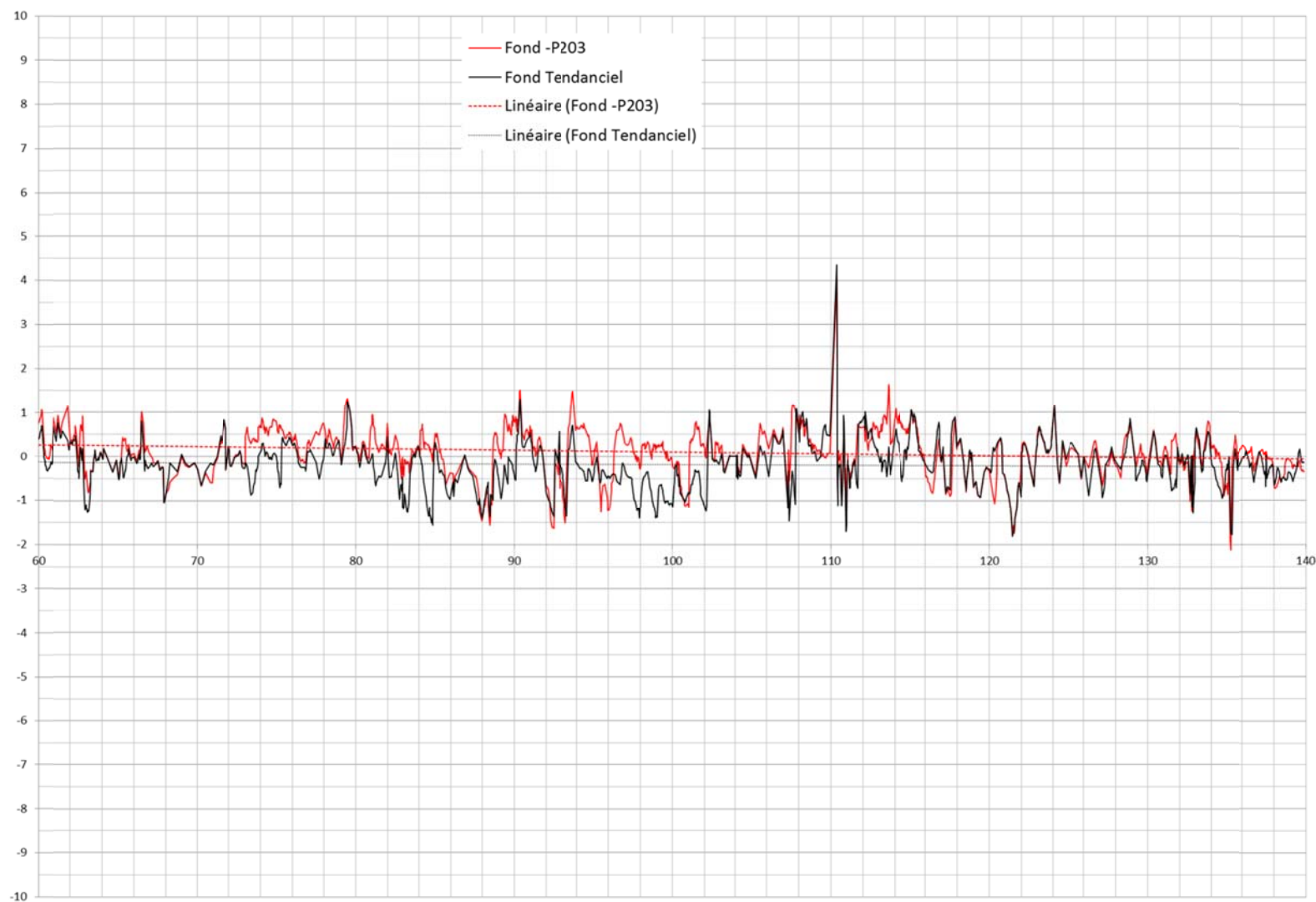
☐ Pour le scénario tendanciel :

- L'évolution de la ligne d'eau d'étiage suit l'évolution des fonds.
- Pour le module, on observe un léger rehaussement de la ligne d'eau dans le bras de Chalennes en aval de la Possonnière alors que le fond s'incise. Cela s'explique par une modification de la répartition des débits en faveur du bras de Chalennes sans doute liée à l'incision du bras principal en amont de la Possonnière. Ailleurs l'évolution de la ligne d'eau suit l'évolution des fonds.
- Pour le débit de crue annuelle, on observe les mêmes évolutions que celles observées au module avec néanmoins des écarts plus faibles.

☐ Pour le scénario P203 :

- L'évolution de la ligne d'eau d'étiage ne suit pas systématiquement l'évolution des fonds. C'est particulièrement vrai en amont de Saint Florent-le-Vieil où l'augmentation des débits dans le bras de Varades, entraîne une baisse consécutive de la ligne d'eau dans le bras principal jusqu'à Ingrandes. Cette remarque s'applique également pour le bras principal de Chalennes (augmentation des débits dans le bras de Saint-Georges entraînant une baisse de la ligne d'eau dans le bras principal).
- Pour le module et le débit de crue annuelle, on note un abaissement significatif des lignes d'eau de la Pointe jusqu'à Mauves malgré un engravement des fonds sur certains secteurs. Pour cette gamme de débits, la diminution des lignes d'eau est principalement liée à l'augmentation de la section mouillée libérée par l'érosion des bancs entre épis.

Écart des fonds entre situation actuelle et situations tendancielle et P203 à 40 ans



Evolution des fonds et des lignes d'eau pour le scénario tendanciel à 40 ans (analyse par bief)

	Bellevue		Thouaré	Mauves			Oudon			Ancenis				St Florent				Ingrandes	Montjean					Pont de l'Alleud	Possonnière		La Pointe
bief	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	154	56	-52	-336	51	82	-35	-225	-405	-39	-53	-415	-171	-9	-18	-50	303	63	10	15	-29	-113	34	14	-43	-120	-179
évolution moyenne du fond (cm)	16	11	-29	-56	8	9	-7	-59	-66	-22	-18	-66	-66	-8	-8	-57	57	10	42	11	-22	-43	49		-9	-29	-30
Evolution ligne d'eau (cm)																											
220 m3/s	4.7	-5.7	-3.3	-29.0	-22.0	-0.8	0.4	-23.0	-49.0	-15.0	-19.0	-43.0	-60.0	-35.0	-14.0	-8.0	7.2	9.6	10.0	7.9	-2.7	-26.0	-4.0	-11.7	-3.0	-17.0	-22.0
850 m3/s	4.2	-5.9	-8.1	-12	-10	-6	2.8	-8.3	-25.3	-16.2	-12	-20	-31.2	-26.8	-17.3	-14.3	6.6	9.2	9.9	12.9	6.5	3.1	9.4	2.2	6.7	-3.7	-8.2
2260 m3/s	7.4	-0.4	-0.3	-5.5	-1.8	0.0	2.9	0.2	-9.9	-8.2	-6.9	-12.1	-18.6	-17	-14.4	-12.4	1.6	3.1	4.3	7.9	5.4	4.5	7.3	4.7	5.3	0.9	-1.9
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706	705	704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	134		10	15	74	35	51	3	-108	-15	-5	11	95		17	45	31	-263		5	1	8	24	-5	-30	-55	48

Evolution des fonds et des lignes d'eau pour le scénario P203 à 40 ans (analyse par bief)

	Bellevue		Thouaré	Mauves			Oudon			Ancenis				St Florent				Ingrandes	Montjean					Pont de l'Alleud	Possonnière		La Pointe
bief	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	303	174	-30	-268	89	465	169	22	-15	-89	91	-49.0	-61.0	25	123	26	256	234	8	-7	-45	-133	42	40	3	-21	-80
Dif/tendanciel	149	118	22	68	38	383	204	247	390	-50.0	144	366	110	34	141	76	-47.0	171	-2.0	-22.0	-16.0	-20.0	8	26	46	99	99
évolution moyenne du fond (cm)	49.0	27.0	-17.0	-45.0	15.0	50.0	33.0	6.0	-2.0	-49.0	31.0	-8.0	-23.0	22.0	51.0	30.0	48.0	39.0	33.0	-6.0	-33.0	-50.0	59.0	132.0	1.0	-5.0	-13.0
Evolution ligne d'eau (cm)																											
220 m3/s	7.6	4.2	2.7	-2.7	21.0	25.0	27.4	10.6	-2.0	2.0	-6.8	-7.2	-11.6	-19.7	-3.0	-9.9	-4.0	10.1	-7.0	-17.6	-33.6	-48.0	-27.0	-31.0	-13.5	-27.9	-26.0
850 m3/s	15.7	6.4	8.9	-9.7	-10.4	-5.3	-1.7	-11.2	-29.8	-36.8	-38.0	-51.3	-49.6	-47.1	-45.8	-35.4	-17.4	-19.3	-27.2	-23.3	-29.8	-25.0	-16.0	-17.5	-18.9	-25.9	-34.0
2260 m3/s	15.7	8.7	8.4	1.3	-1.8	0.2	-7.8	-7.5	-6.9	-15.4	-17.2	-28.3	-32.7	-35.6	-37.6	-33.1	-19.5	-23.4	-29.3	-24.8	-27.6	-25.0	-18.4	-17.2	-24.2	-23.4	-25.6
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706	705	704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137	134	10	15	-174	-340	-510	-55	-350	-112	-99	-776.0	-205.0		-251	-196	-97	-1261		5	1	8	24	7	-232	-377	-656
Dif/Tendanciel	3	134	0	0	-248	-375	-561	-58	-242	-97	-94	-787	-300	0	-268	-241	-128	-998	0	0	0	0	0	12	-202	-322	-704

7.4.3. Répartition des débits entre les différents bras

L'ouverture de certains bras conduit à des modifications sensibles de la répartition des débits entre bras secondaire et bras principal.

Les tableaux ci-après précisent la répartition des débits entre les bras pour trois situations hydrologiques caractéristiques (étiage, module, crue annuelle) et les trois situations simulées : situation actuelle, scénario tendanciel à 40 ans, scénario 203 à 40 ans.

Les valeurs indiquées pour le scénario 203 appellent les principales observations ci-après :

- ☐ Les évolutions les plus importantes concernent les bras suivants (écart entre situation actuelle et scénario 203 à 40 ans):
 - Bras des Lombardières : débit passant de 175 m³/s à 186 m³/s en étiage et de 660 m³/s à 710 m³/s pour le module.
 - Bras de Saint-Georges : débit passant de 23 m³/s à 50 m³/s en étiage et de 351 m³/s à 358 m³/s pour le module.
 - Bras de Varades : débit passant de 60 m³/s à 93 m³/s en étiage et de 371 m³/s à 470 m³/s pour le module.
 - Bras de Cul de Bœuf : débit passant de 16 m³/s à 12 m³/s en étiage et de 252 m³/s à 193 m³/s pour le module. C'est le seul bras secondaire où l'on constate une diminution des débits au profit du bras principal. La cause est sans doute à rechercher dans la suppression des épis situés à l'entrée du bras principal d'Ingrandes.
 - Bras de l'île de Neuve-Macrière : débit passant de 0 m³/s à environ 3 m³/s en étiage et de 27 m³/s à 94 m³/s au module.
- ☐ Ces évolutions ont un impact sur les conditions d'écoulement dans ces bras et en particulier sur les lignes d'eau. On note ainsi un abaissement de la ligne d'eau dans le bras de Saint Florent-le-Vieil alors que dans le même temps le fond s'engrave. Cette même remarque peut être faite dans une moindre mesure pour le bras de Chalonnes.
- ☐ On constate que l'ouverture des bras contribue à augmenter, en étiage et pour le module, les débits y transitant. Elle limite ainsi, l'effet de rehaussement de la ligne d'eau dans le bras principal qui résulterait d'un engrèvement des fonds.
- ☐ Pour le débit de crue annuelle les répartitions de débits entre les bras évoluent différemment. Pour ce niveau de crue, il convient toutefois de préciser que les calculs sont menés en considérant le lit mobile durant la simulation et que l'interprétation des résultats est de ce fait plus compliquée.

Module 220				Situation actuelle	Situation tendancielle (40 ans)	Scénario 203 (40 ans)
Bras	N° bief	PK Modèle	PK GIP	débit (m3/s)	débit (m3/s)	débit (m3/s)
Bras des Lombardières	48			175.2	180.6	186
Bras de la Guillemette	147	0.14		44.8	39.4	34
bras de Chalennes	51	122.27	128.49	183.7	196.7	169.3
Bras de Saint Georges	150	122.21	128.56	29.2	22.6	50.2
Bras du Fresne sur Loire	2	140.68	110.08	208.1	203.8	212
Bras de Cul de Bœuf	102	0.80		15.6	19.7	12
Bras de Saint Florent	4	145.08	105.68	153.9	158.3	121.5
Bras de Meilleraie	105	1.29		6	6	6
Bras de Varades	103			60.1	55.7	92.5
Bras principal de Champtoceaux	10	163.22	87.54	226.5	226.5	224.3
Bras des Brevets	110	1.12		2.8	2.8	2.8
Bras de Neuve-Macrière	111	0.22		2	2	4.7
Bras principal la pierre percée	15	181.24	69.52	227	227.6	227.5
Bras de la Sauterelle	115	181.18	69.58	1	1	1
Bras principal de Boire Courant	17	185.80	64.96	227.2	227.8	227.7
bras de Thouaré	117	185.91	64.85	0.9	0.9	0.9

Module 850				Situation actuelle	Situation tendancielle (40 ans)	Scénario 203 (40 ans)
Bras	N° bief	PK Modèle	PK GIP	débit (m3/s)	débit (m3/s)	débit (m3/s)
Bras des Lombardières	48			660.7	667.6	709.6
Bras de la Guillemette	147	0.14		189.3	182.4	140.4
bras de Chalennes	51	122.27	128.49	456.4	493.8	459.3
Bras de Saint Georges	150	122.21	128.56	350.9	324.8	357.9
Bras du Fresne sur Loire	2	140.68	110.08	601.7	621.3	660.1
Bras de Cul de Bœuf	102	0.80		251.7	232.2	193.4
Bras de Saint Florent	4	145.08	105.68	382.1	385.8	323.1
Bras de Meilleraie	105	1.29		96.6	68.3	57.1
Bras de Varades	103			371.3	395.9	469.8
Bras principal de Champtoceaux	10	163.22	87.54	780.2	822.7	739
Bras des Brevets	110	1.12		53.8	32.4	28.6
Bras de Neuve-Macrière	111	0.22		27.2	6	93.6
Bras principal la pierre percée	15	181.24	69.52	808.8	823.6	824.4
Bras de la Sauterelle	115	181.18	69.58	49.1	34.3	33.4
Bras principal de Boire Courant	17	185.80	64.96	857.1	857	857
bras de Thouaré	117	185.91	64.85	0.9	0.9	0.8

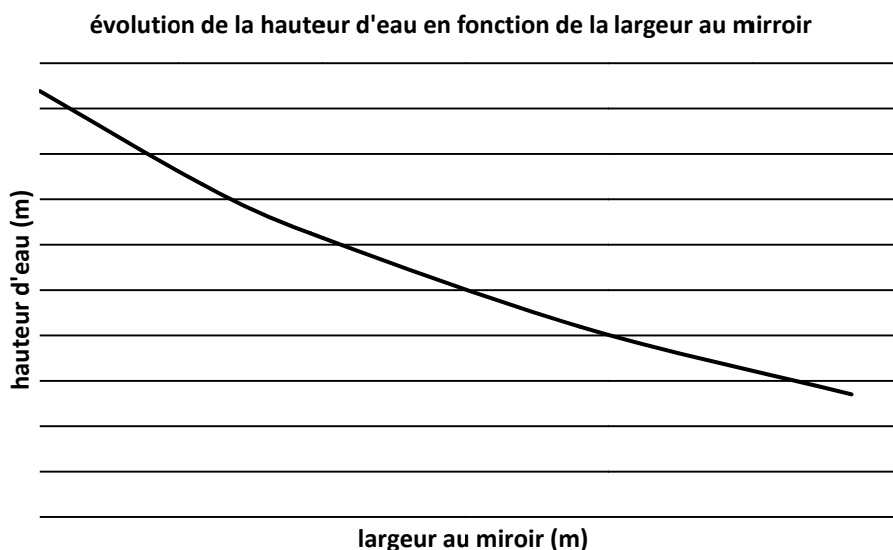
Module 2260				Situation actuelle	Situation tendancielle (40 ans)	Scénario 203 (40 ans)
Bras	N° bief	PK Modèle	PK GIP	débit (m3/s)	débit (m3/s)	débit (m3/s)
Bras des Lombardières	48			1762	1768.3	1824.4
Bras de la Guillemette	147	0.14		498	491.7	435.6
bras de Chalennes	51	122.27	128.49	868.3	921.3	894.8
Bras de Saint Georges	150	122.21	128.56	1220.4	1184.1	1229.6
Bras du Fresne sur Loire	2	140.68	110.08	1280	1297.6	1362.3
Bras de Cul de Bœuf	102	0.80		980.1	964.3	901.2
Bras de Saint Florent	4	145.08	105.68	796.9	796.4	712.6
Bras de Meilleraie	105	1.29		629.1	569.2	530.1
Bras de Varades	103			834	894.4	1017.3
Bras principal de Champtoceaux	10	163.22	87.54	1237.4	1388	1421.7
Bras des Brevets	110	1.12		344	304.7	313.5
Bras de Neuve-Macrière	111	0.22		686.2	576.7	535.8
Bras principal la pierre percée	15	181.24	69.52	1487.4	1556.4	1572.6
Bras de la Sauterelle	115	181.18	69.58	776.5	709.3	695.1
Bras principal de Boire Courant	17	185.80	64.96	1991.5	1974.4	1966.6
bras de Thouaré	117	185.91	64.85	272.4	291.3	301.1

7.4.4. Erosion des bancs entre les épis

L'érosion des bancs entre les épis conduit à augmenter la largeur au miroir de l'écoulement et à diminuer la hauteur d'eau pour les bas débits. Ce phénomène est très net au droit des systèmes d'épis importants (Mauves, Oudon, Ancenis, Ingrandes,...).

La largeur mouillée du lit d'étiage peut ainsi passer de 150 m (largeur actuelle entre les épis) à plus de 250 m après érosion des bancs. La baisse de la ligne d'eau résultant de cette « sur largeur » créée par l'érosion des bancs peut en théorie correspondre à plusieurs décimètres (voir figure ci-après). Cette diminution sera plus faible dans la réalité, les écoulements se refaçonnant un lit unique ou multiple de dimension intermédiaire.

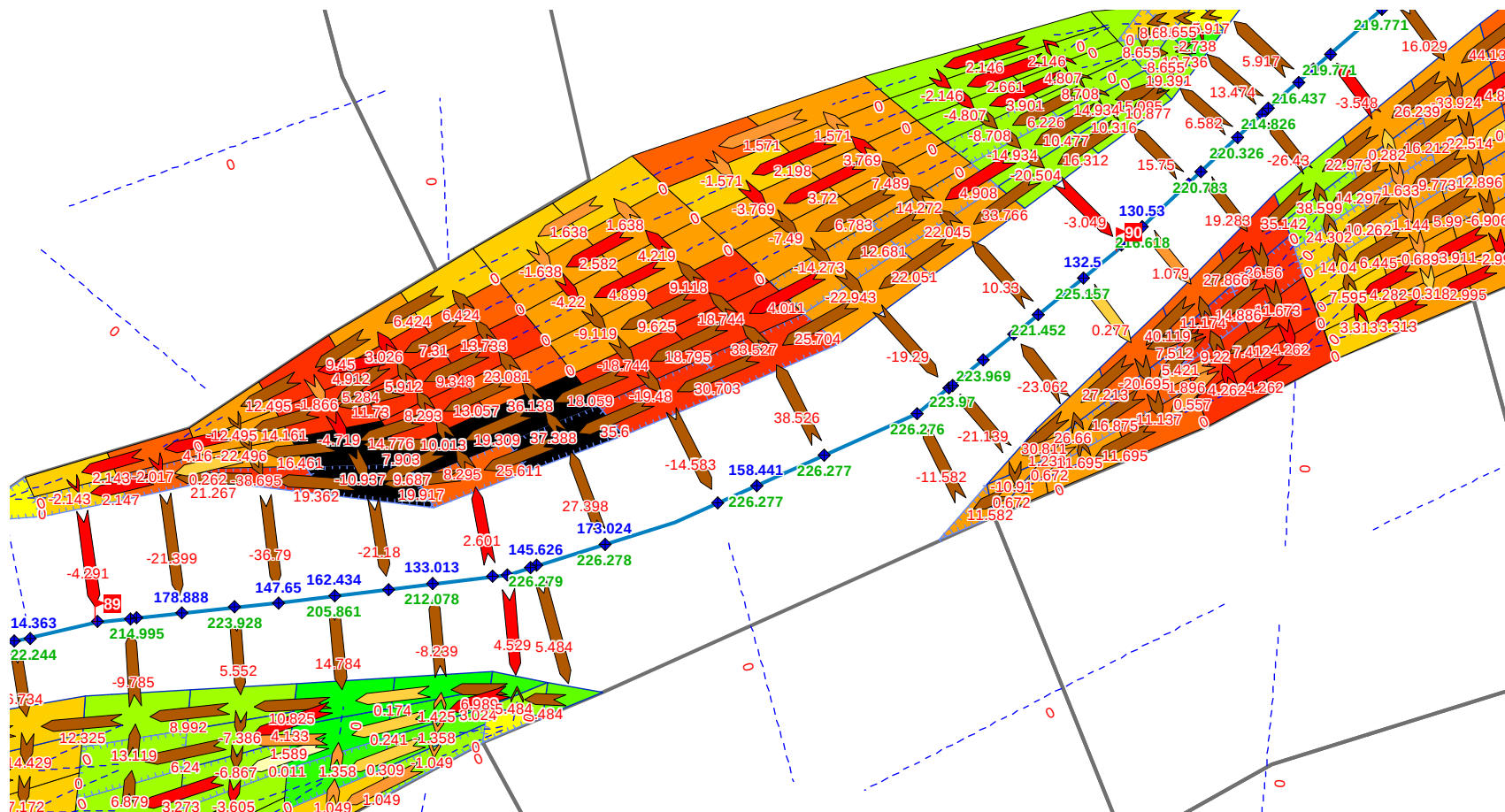
La figure ci-après illustre la baisse de la hauteur d'eau en fonction de la largeur au miroir en considérant une pente constante et une géométrie invariante du lit (lit trapézoïdal dans le cas présent)



L'érosion des épis peut atteindre jusqu'à deux mètres d'épaisseur. Elle est en général plus marquée en s'approchant du lit vif.

Les planches annexées au présent document proposent une cartographie des dépôts et des érosions dans les systèmes d'épis et dans le lit vif pour le scénario tendanciel et le scénario 203 à 40 ans.

Erosion du système d'épis dans le secteur d'Ancenis et impact sur la répartition des débits d'étiage dans le lit

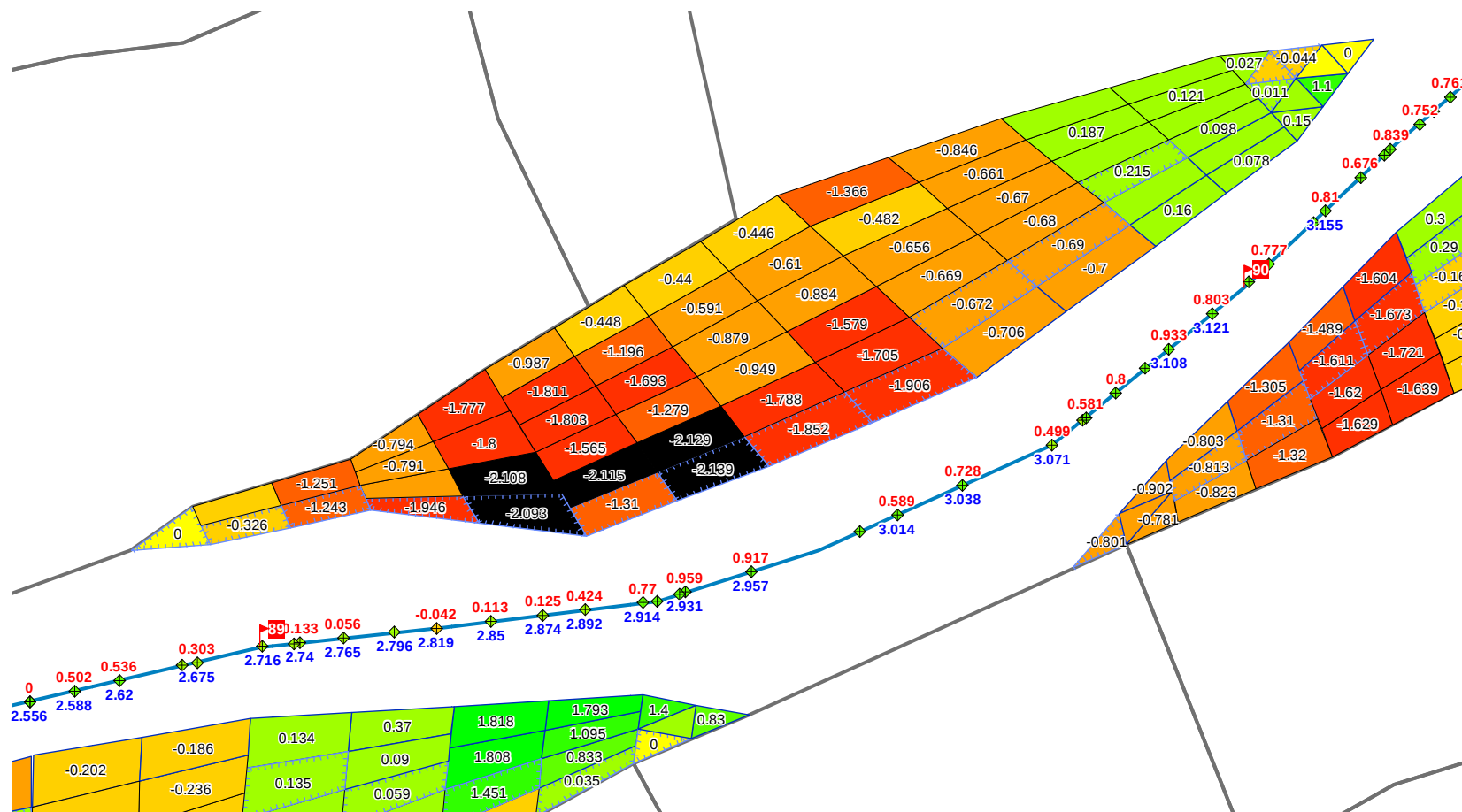


170.592 : débit dans le chenal navigable après érosion des épis

221.103 : débit dans le chenal navigable – situation actuelle

7.543 : débit dans les mailles 2D représentant les systèmes d'épis

Erosion du système d'épis dans le secteur d'Ancenis et impact sur l'engravement du chenal navigable

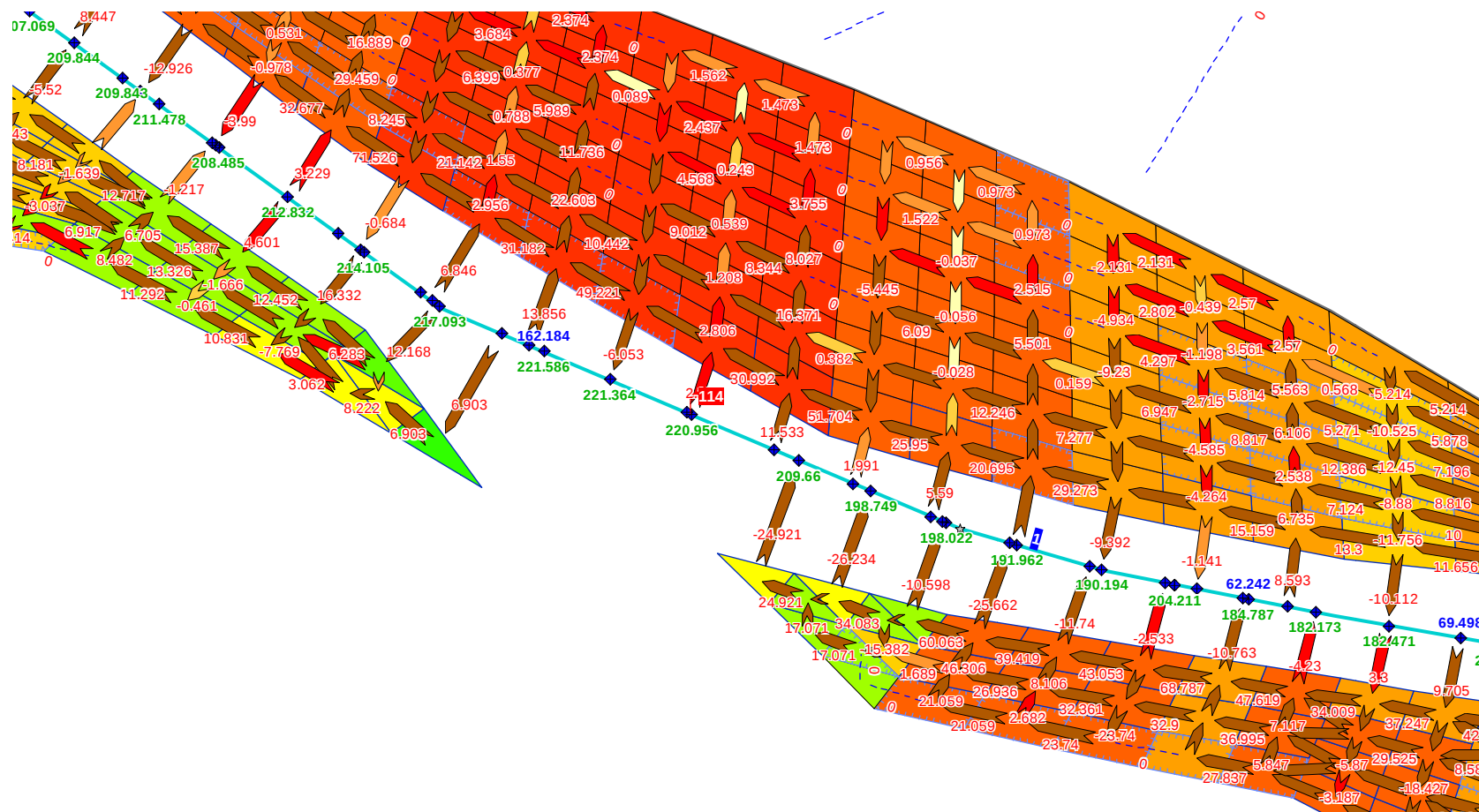


2.592 : Cote d'eau dans le chenal navigable après érosion des épis

-1.512 : épaisseur de dépôt/érosion dans les systèmes d'épis

0.435 : épaisseur de dépôt/érosion dans le chenal navigable

Erosion du système d'épis en amont d'Ingrandes et impact sur la répartition des débits d'étiage dans le lit

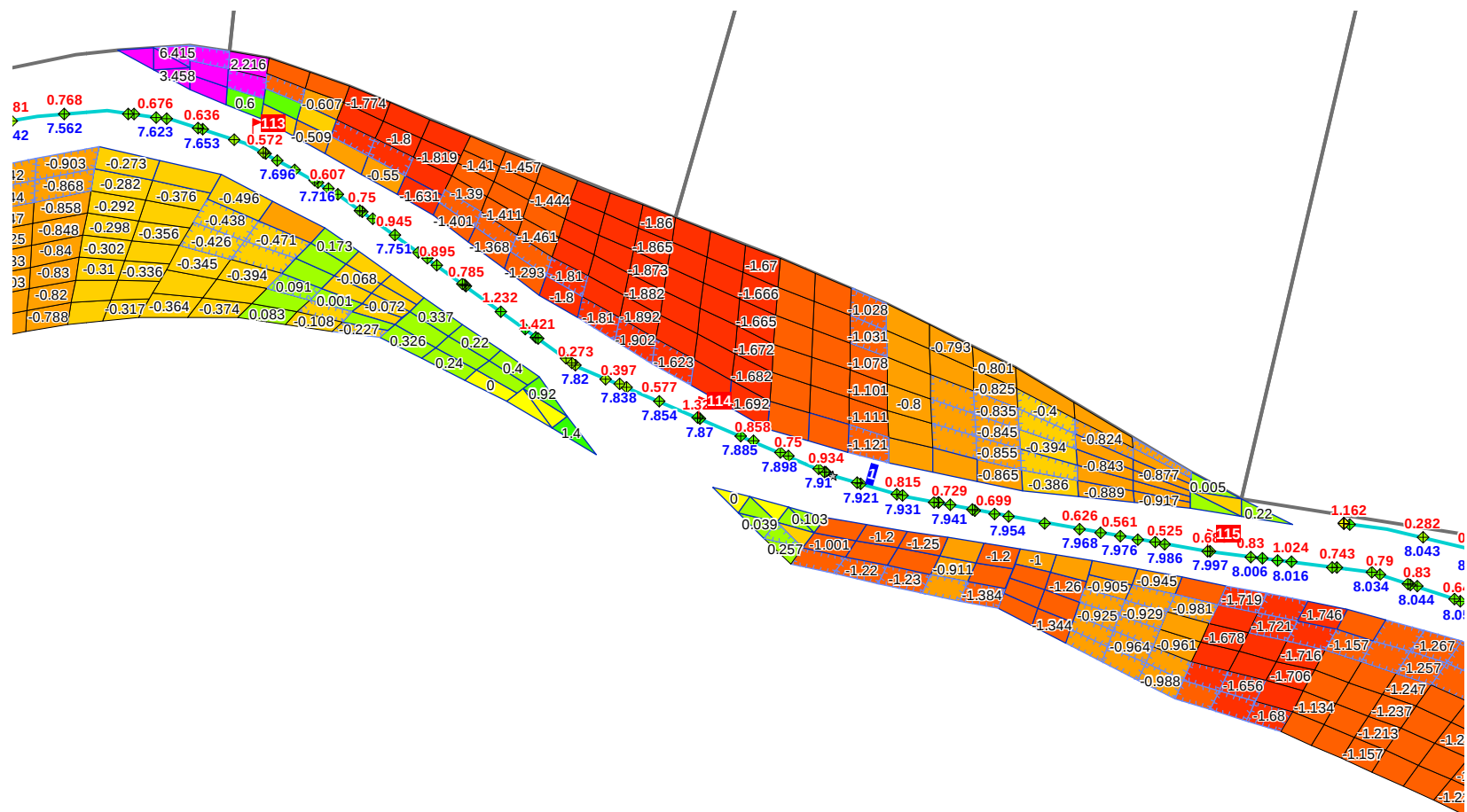


170.592 : débit dans le chenal navigable après érosion des épis

221.103 : débit dans le chenal navigable – situation actuelle

7.543 : débit dans les mailles 2D représentant les systèmes d'épis

Erosion du système d'épis en amont d'Ingrandes et impact sur l'engravement du chenal navigable



7.592 : Cote d'eau dans le chenal navigable après érosion des épis

-1.512 : épaisseur de dépôt/érosion dans les systèmes d'épis

0.707 : épaisseur de dépôt/érosion dans le chenal navigable

7.5. CONCLUSIONS

Le modèle hydrosédimentaire a été mis en œuvre pour calculer les évolutions des conditions d'écoulements pour trois situations différenciées et sur une période de 70 ans :

- ☐ Situation actuelle ;
- ☐ Situation tendancielle à 40 ans ;
- ☐ Scénario P203 à 40 ans, programme visant à stabiliser le fond du bras principal.

Une analyse détaillée des résultats hydrauliques d'une part et des bilans sédimentaires par bief d'autre part a été réalisée et a permis d'en tirer les principaux enseignements ci-après :

- ☐ Le bilan sédimentaire de la Loire dépend directement de l'hypothèse prise pour le volume d'apport solide amont. Pour une hypothèse basse correspondant à 60% de la capacité de charriage théorique, le processus d'incision du chenal principal se poursuivra sans doute lentement ; l'incision moyenne pouvant être estimée à environ 30 à 50 cm au bout de 40 ans. Pour une hypothèse haute (80% de la capacité de charriage théorique), on note une relative stabilité du lit principal. L'équilibre sédimentaire « global » (équivalence entre dépôt et érosion tous biefs confondus) semble être atteint pour un volume d'apport solide amont d'environ 240 000 m³/an, soit une valeur proche de l'hypothèse « basse » prise en compte dans les calculs. Cet équilibre sédimentaire tous biefs confondus, masque une autre réalité plus complexe lorsque l'on considère le bras principal de Loire, les bras secondaires et les systèmes d'épis. On peut ainsi différencier le bras principal soumis à l'érosion et les marges alluviales (bras secondaires et systèmes d'épis) qui du fait de leur déconnexion au lit principal s'engravent progressivement.
- ☐ Les travaux de décorsetage du lit (travaux sur les épis et réouverture des bras secondaires) visent à rétablir un équilibre hydraulique entre ces différents compartiments du fleuve, condition principale pour inverser la tendance actuelle à l'érosion dans le bras principal.
- ☐ En considérant une hypothèse d'apport solide provenant de l'amont correspondant à 270 000 m³/an en moyenne (soit 60% de la capacité de transport théorique par charriage) :
 - La suppression des systèmes d'épis contribue à libérer près de 5.5 Mm³ de sable en 40 ans (soit 140 000 m³/an).
 - Un rééquilibre semble s'établir après 40 ans, se traduisant par une stabilisation du bras principal (pas d'érosion significative entre 40 et 70 ans) et l'arrêt des érosions dans les anciens systèmes d'épis.
 - Plus de la moitié (55%) du volume de sable libéré entre les épis ne se dépose pas dans le lit et transite vers l'aval. Ainsi sur les 5,5 Mm³ libérés, 3,0 Mm³ transitent vers l'aval (soit environ 75 000 m³/an). Le reste se dépose pour partie (1,3 Mm³) dans le lit principal et pour l'autre (1,0 Mm³) dans les bras secondaires.
 - Le bilan sédimentaire met donc en évidence durant cette période, un volume de sédiment sortant égal à 75 000 m³/an + 270 000 m³/an = 345 000 m³/an.

- ❑ En considérant une hypothèse d'apport solide provenant de l'amont correspondant à 360 000 m³/an en moyenne (soit 80% de la capacité de transport théorique par charriage) :
 - Les volumes d'érosion observés dans les systèmes d'épis sont identiques (environ 5.3 Mm³)
 - On note un engravement plus important du lit principal correspondant à un volume de dépôt de 3.9 Mm³ dans le bras principal et de 1.5. Mm³ dans les bras secondaires.
 - Le bilan sédimentaire est donc nul (équivalence entre volumes d'érosion et de dépôt).
 - Il convient de noter que la différence de volume solide annuel entre les deux hypothèses de charge amont (360 000 -270 000 = 90 000m³/an) correspond grosso modo au déficit sédimentaire obtenu avec la première hypothèse (75 000 m³/an).

- ❑ Les évolutions de lignes d'eau calculées après évolution des fonds mettent en évidence la difficulté de remonter les niveaux d'eau même en cas d'engravement du fond. Les deux principales raisons sont :
 - Une meilleure répartition des écoulements dans les différents bras après réouverture des chevrettes ;
 - Une largeur au miroir disponible plus importante dans le bras principal après érosion des bancs entre épis.

- ❑ Ces résultats montrent ainsi la difficulté de restaurer le fonctionnement morphologique de la Loire par simple remobilisation des matériaux disponibles et réouverture des bras. D'une part la pente générale du lit et la granulométrie des sédiments contribuent à favoriser le transit des matériaux vers l'aval au détriment d'une dynamique de dépôt, d'autre part la répartition des écoulements entre les différents compartiments du lit tend à limiter l'effet bénéfique de l'engravement du lit principal sur le relèvement de la ligne d'eau.

- ❑ Les actions peuvent paraître contreproductives vis-à-vis de l'objectif de relèvement des lignes d'eau (abaissement des cotes par étalement des débits dans les différents bras et dans l'espace alluvial libéré par l'érosion des bancs). Il faut toutefois relativiser ce résultat en particulier en étiage, le modèle hydrosédimentaire 1D ne pouvant restituer la complexité du réajustement morphologique suite au remodelage des épis.

- ❑ Il convient donc de poursuivre la définition du programme de travaux du scénario P203 en privilégiant les différents axes suivants :
 - Ouverture en priorité les bras secondaires qui sont situés dans les secteurs les plus soumis au risque d'incision.
 - Ouverture du bras de Saint-Georges. Elle n'apporte pas de gain significatif sur le réengravement du bras principal. Néanmoins ce bras devrait constituer le chenal où transite la plus grande partie du débit en crue, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui. La suppression de la chevette de l'Alleud ne constitue pas une mesure suffisante pour modifier cette répartition de débits (écoulement rapidement noyé en aval de l'ouvrage). Seule une action de type « seuil à radier d'Ingrandes » permettrait de modifier de façon significative cette répartition.
 - Suppression des systèmes d'épis entre Montjean et Ingrandes est bénéfique pour le réengravement du lit. Cette action, même si elle ne semble pas avoir d'impact significatif sur la ligne d'eau, devrait malgré tout contribuer à la restauration morphologique du fleuve. On propose donc de tester la réduction de la longueur des épis dans le banc de convexité rive gauche au droit du pont et de supprimer les épis en amont (rive droite et rive gauche). Dans la mesure où les érosions dépassent 1,0 m dans le banc rive

droite en amont d'Ingrandes, nous testerons également l'abaissement des épis de -1 m par rapport à la cote actuelle.

- Réouverture du bras de Varades est bénéfique pour le réengrèvement du bras principal de Saint Florent-le-Vieil mais ne permet pas la remontée des lignes d'eau dans ce même bras. Cette mesure constitue néanmoins une action nécessaire pour le décorsetage du lit dans ce secteur.
- 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 avec un abaissement important de la ligne d'eau à l'étiage et au module. La suppression des systèmes d'épis constitue donc une mesure prioritaire sur ce secteur. Dans le secteur d'Ancenis et d'Oudon, l'érosion des bancs ne dépasse généralement pas 1 mètre, nous proposons de tester un raccourcissement des épis (moitié de leur longueur).
- Entre Oudon et Bellevue, la suppression des épis a pour conséquence un réengrèvement significatif du lit, à l'exception du secteur compris entre Mauves et Thouaré et correspondant au bras principal de l'île Arrouix et du bras secondaire de la Sauterelle. Une action complémentaire portant sur la réouverture du bras de la Sauterelle est donc proposée et nous testerons son efficacité.

8. CONSTRUCTION DU PROGRAMME D'ACTIONS

8.1. ANALYSES DE SENSIBILITÉ

8.1.1. Remodelage des épis

Le modèle hydrosédimentaire a été mis en œuvre en distinguant 3 scénarios de remodelage des épis :

- ☐ Suppression totale des épis.
- ☐ Raccourcissement d'une demi-longueur d'épis depuis le lit vif.
- ☐ Abaissement de 1 m de la cote d'arase supérieure des épis.

Plusieurs zones tests ont été considérées :

- ☐ Ingrandes : système d'épis rive droite et rive gauche en amont et au droit du pont.
- ☐ Ancenis : système d'épis rive droite et rive gauche en amont et au droit du pont.
- ☐ Oudon : système d'épis rive droite au droit et en aval du pont.
- ☐ Mauves : système d'épis rive droite en amont du pont.

Le tableau ci-dessous récapitule les tests complémentaires qui ont été simulés.

Test	libellé	description
2032	scénario 203 avec suppression ou raccourcissement des épis à Ingrandes	Ingrandes : Suppression des épis dans le bief 701 sauf banc rive gauche au droit du pont pour lequel les épis sont raccourcis à une longueur de 3 pavés à partir de la berge
2033	scénario 203 avec arasement des épis à Ingrandes	Ingrandes : arasement des épis dans le bief 701 à une profondeur de -1.0 m/cote actuelle
2034	scénario 203 avec raccourcissement des épis à Ancenis	Ancenis : raccourcissement épis du bief 709 (2 pavés à partir berge RD)- raccourcissement des épis du bief 710 en rive gauche au droit du pont et en rive droite en aval immédiat (laisser longueur équivalente aux 3 pavés depuis la berge)
2035	scénario 203 avec arasement des épis à Ancenis	Ancenis : arasement épis des biefs 709 et 710 en rive gauche au droit du pont et en rive droite en aval immédiat à -1m/cote actuelle
2036	scénario 203 avec raccourcissement des épis à Oudon	Oudon : raccourcissement des épis du banc rive gauche en aval du pont (bief 712) à 4 pavés à partir de la berge
2037	scénario 203 avec arasement des épis à Oudon	Oudon : raccourcissement des épis du banc rive gauche en aval du pont (bief 712) à 4 pavés à partir de la berge et arasement des longueurs restante à cote -1.0 m/cote actuelle
2038	scénario 203 avec raccourcissement des épis à Mauves	Mauves : raccourcissement des épis du banc rive gauche en amont du pont (bief 714) à 4 pavés à partir de la berge sur moitié amont du banc et 3 pavés sur moitié aval
2039	scénario 203 avec raccourcissement/arasement des épis à Ingrandes, Ancenis, Oudon et Mauves	Ingrandes : Suppression des épis dans le bief 701 sauf banc rive gauche au droit du pont pour lequel les épis sont raccourcis à une longueur de 3 pavés à partir de la berge Ancenis : suppression épis du bief 709 - raccourcissement des épis du bief 710 en rive gauche au droit du pont et en rive droite en aval immédiat (laisser longueur équivalente aux 3 pavés depuis la berge) Oudon : raccourcissement des épis ou arasement Mauves : raccourcissement des épis du banc rive gauche

Nous avons analysé les résultats du modèle portant sur les lignes d'eau et les volumes d'érosion/dépôt dans le bras principal, les bras secondaires et les systèmes d'épis.

Les tableaux ci-après (pages suivantes) récapitulent les évolutions des volumes d'érosion/dépôt calculés pour les différents tests de sensibilité par rapport au scénario de référence P203.

Les valeurs indiquées mettent en évidence les principaux résultats suivants :

- ❑ Le raccourcissement des épis entraîne peu de différence sur le bilan sédimentaire et sur les lignes d'eau par rapport à une suppression totale des ouvrages. On note une légère diminution des volumes d'érosion des bancs concernés et des volumes d'engrèvement dans le bras principal ; les écarts entre volume d'érosion des bancs d'une part et volume d'engrèvement du bras principal d'autre part étant comparables.
- ❑ Les volumes d'érosion des bancs entre épis sont plus marqués dans le cas d'un raccourcissement des épis que dans le cas d'un simple arasement.
- ❑ Les impacts sur les lignes d'eau sont quasi nuls. On note toutefois pour les tests consistant à araser les épis à Ingrandes et à Ancenis (P2033 et 2035), un léger rehaussement de la ligne d'eau par rapport au scénario P203 (voir figure page 108).

Les principales dispositions constructives pour le remodelage des épis que l'on peut tirer de ces différents résultats, sont définies ci-après :

- ❑ Baisser de 1.0 m environ la cote d'arase des épis au droit des zones de forte érosion potentielle. Cette disposition devrait permettre de limiter l'effet négatif de l'augmentation de la section mouillée sur la ligne d'eau d'étiage et le module tout en agissant vers une stabilisation voire un réengrèvement du bras principal. Par ailleurs cette mesure s'avère plus favorable pour la navigation (maintien du débit d'étiage dans le chenal navigable).
- ❑ Raccourcir les épis sur la moitié de leur longueur dans les secteurs de plus faible érosion (bancs à Oudon et à Mauves). Les résultats de simulation montrent en effet que le raccourcissement des épis n'entraîne pas de gros écart sur les volumes d'érosion par rapport à leur suppression pure et simple.
- ❑ Supprimer les épis dans les secteurs étroits et fortement contraints (bras d'Ingrandes, bras de Champtoceaux).

8.1.2. Réouverture des bras

Nous avons réalisé des simulations supplémentaires portant sur :

- ❑ L'ouverture du bras de la Sauterelle pour délester en crue un débit plus important dans ce bras et ainsi réduire la contrainte d'érosion dans le bras principal.
- ❑ Le maintien de la chevette barrant le bras de Saint-Georges et le bras de Varades avec suppression des épis dans ce dernier bras.

Ces simulations mettent en évidence les principaux résultats ci-après :

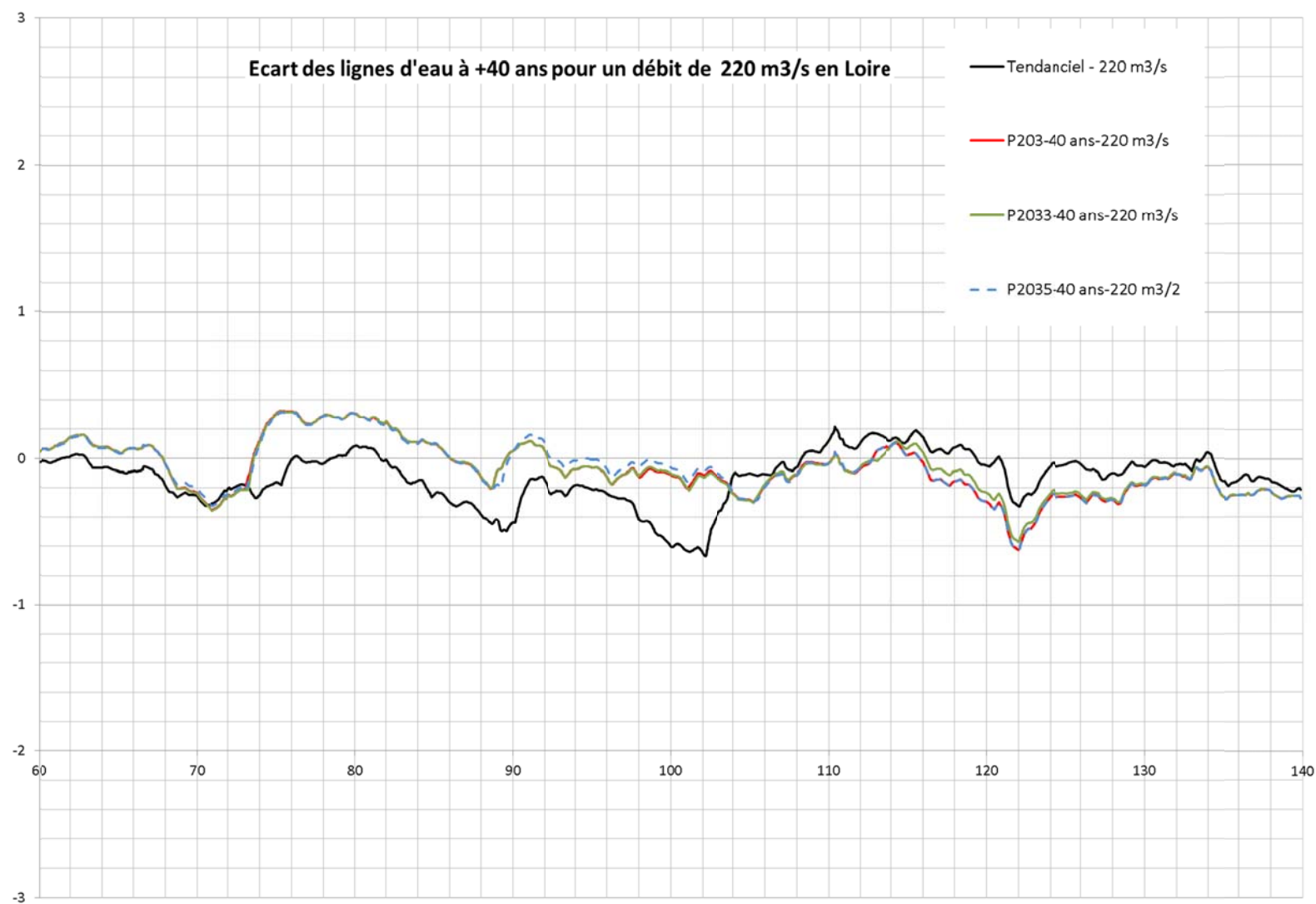
- ❑ Effet bénéfique de l'ouverture du bras de la Sauterelle sur le bilan sédimentaire et la ligne d'eau d'étiage dans le bras principal entre Mauves et Thouaré.
- ❑ Effet positif du recalage de la chevette barrant les bras de Saint-Georges et de Varades, sur la ligne d'eau d'étiage dans les bras principaux.

Analyse des évolutions des volumes de dépôt/érosion par rapport au scénario de référence P203

	Bellevue		Thouaré	Mauves			Oudon			Ancenis				St Florent				Ingrandes	Montjean							Pont de l'Alleud	Possonnière		La Pointe	Bilan /P203
Scénario 2032																														
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	302	175	-30	-268	88	446	168	24	-12	-84	90	-50.0	-72.0	25	123	24	264	217	8	-6	-43	-131	42	40	3	-20	-80		1243	
dif/P203	-1.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-19.0	-1.0	2.0	3.0	5.0	-1.0	-1.0	-11.0	0.0	0.0	-2.0	8.0	-17.0	0.0	1.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0		-29	
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-173	-341	-510	-54	-350	-112	-99	-775.0	-205.0		-249	-196	-97	-1223		5	1	8	24	7	-234	-377	-659		-5446	
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	38.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	0.0	-3.0		37	
Scénario 2033																														
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	301	175	-30	-269	87	445	168	29	-12	-89	90	-46.0	-61.0	1	123	25	267	139	9	0	-39	-125	44	43	4	-21	-80		1178	
dif/P203	-2.0	1.0	0.0	-1.0	-2.0	-20.0	-1.0	7.0	3.0	0.0	-1.0	3.0	0.0	-24.0	0.0	-1.0	11.0	-95.0	1.0	7.0	6.0	8.0	2.0	3.0	1.0	0.0	0.0		-94	
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-174	-340	-510	-55	-350	-112	-99	-778.0	-204.0		-251	-196	-97	-1143		5	1	8	24	7	-235	-376	-657		-5369	
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	118.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0	1.0	-1.0		114	
Scénario 2034																														
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	301	176	-30	-268	94	464	168	23	-39	-88	98	-41.0	-53.0	26	123	27	256	234	8	-7	-44	-134	42	39	4	-20	-80		1279	
dif/P203	-2.0	2.0	0.0	0.0	5.0	-1.0	-1.0	1.0	-24.0	1.0	7.0	8.0	8.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0	0.0	-1.0	1.0	1.0	0.0		7	
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-173	-340	-510	-55	-324	-103	-97	-770.0	-205.0		-249	-196	-97	-1260		5	1	8	24	6	-235	-377	-659		-5443	
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	26.0	9.0	2.0	6.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	0.0	-3.0		40	
Scénario 2035																														
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	290	183	-29	-268	107	445	170	13	-108	-76	118	-30.0	-44.0	27	112	23	272	234	8	-8	-45	-133	42	39	5	-21	-80		1246	
dif/P203	-13.0	9.0	1.0	0.0	18.0	-20.0	1.0	-9.0	-93.0	13.0	27.0	19.0	17.0	2.0	-11.0	-3.0	16.0	0.0	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	2.0	0.0	0.0		-26	
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747			
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-174	-339	-510	-55	-212	-86	-94	-745.0	-196.0		-245	-195	-95	-1297		5	1	8	24	6	-235	-377	-661		-5309	
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	138.0	26.0	5.0	31.0	9.0	0.0	6.0	1.0	2.0	-36.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	0.0	-5.0		174	

Analyse des évolutions des volumes de dépôt/érosion par rapport au scénario de référence P203 (suite)

Scénario 2036																												
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47	
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	298	168	-34	-270	90	477	145	26	-9	-88	91	-48.0	-58.0	26	122	27	256	234	8	-8	-45	-133	42	39	4	-20	-80	1260
dif/P203	-5.0	-6.0	-4.0	-2.0	1.0	12.0	-24.0	4.0	6.0	1.0	0.0	1.0	3.0	1.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	1.0	1.0	0.0	-12
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747	
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-174	-339	-482	-54	-349	-112	-99	-776.0	-204.0		-251	-196	-97	-1261		5	1	8	24	6	-235	-376	-659	-5457
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	28.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	1.0	-3.0	26
Scénario 2037																												
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47	
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	298	171	-32	-269	93	471	139	31	-6	-88	90	-50.0	-62.0	25	122	27	256	234	8	-7	-44	-134	42	40	3	-20	-80	1258
dif/P203	-5.0	-3.0	-2.0	-1.0	4.0	6.0	-30.0	9.0	9.0	1.0	-1.0	-1.0	-1.0	0.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	-14
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747	
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-174	-339	-493	-54	-348	-112	-98	-776.0	-204.0		-248	-196	-97	-1261		5	1	8	23	7	-233	-377	-659	-5462
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	17.0	1.0	2.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	0.0	-1.0	0.0	-3.0	21
Scénario 2038																												
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47	
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	306	177	-32	-280	89	478	170	25	-13	-88	91	-48.0	-56.0	25	122	26	256	233	8	-8	-45	-133	41	39	4	-21	-80	1286
dif/P203	3.0	3.0	-2.0	-12.0	0.0	13.0	1.0	3.0	2.0	1.0	0.0	1.0	5.0	0.0	-1.0	0.0	0.0	-1.0	0.0	-1.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	14
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747	
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	137		10	16	-183	-339	-513	-54	-350	-112	-99	-777.0	-207.0		-250	-196	-97	-1261		5	1	8	24	7	-235	-377	-660	-5502
dif/P203	0.0	0.0	0.0	0.0	-9.0	1.0	-3.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0	0.0	-4.0	-19



8.2. PROPOSITION D'UNE PROGRAMMATION D'ACTIONS VISANT À STABILISER LE LIT

8.2.1. Définition du programme

Les tests complémentaires réalisés sur le modèle à partir du scénario P203, conduisent à proposer un ajustement des actions. Ces différents ajustements visent :

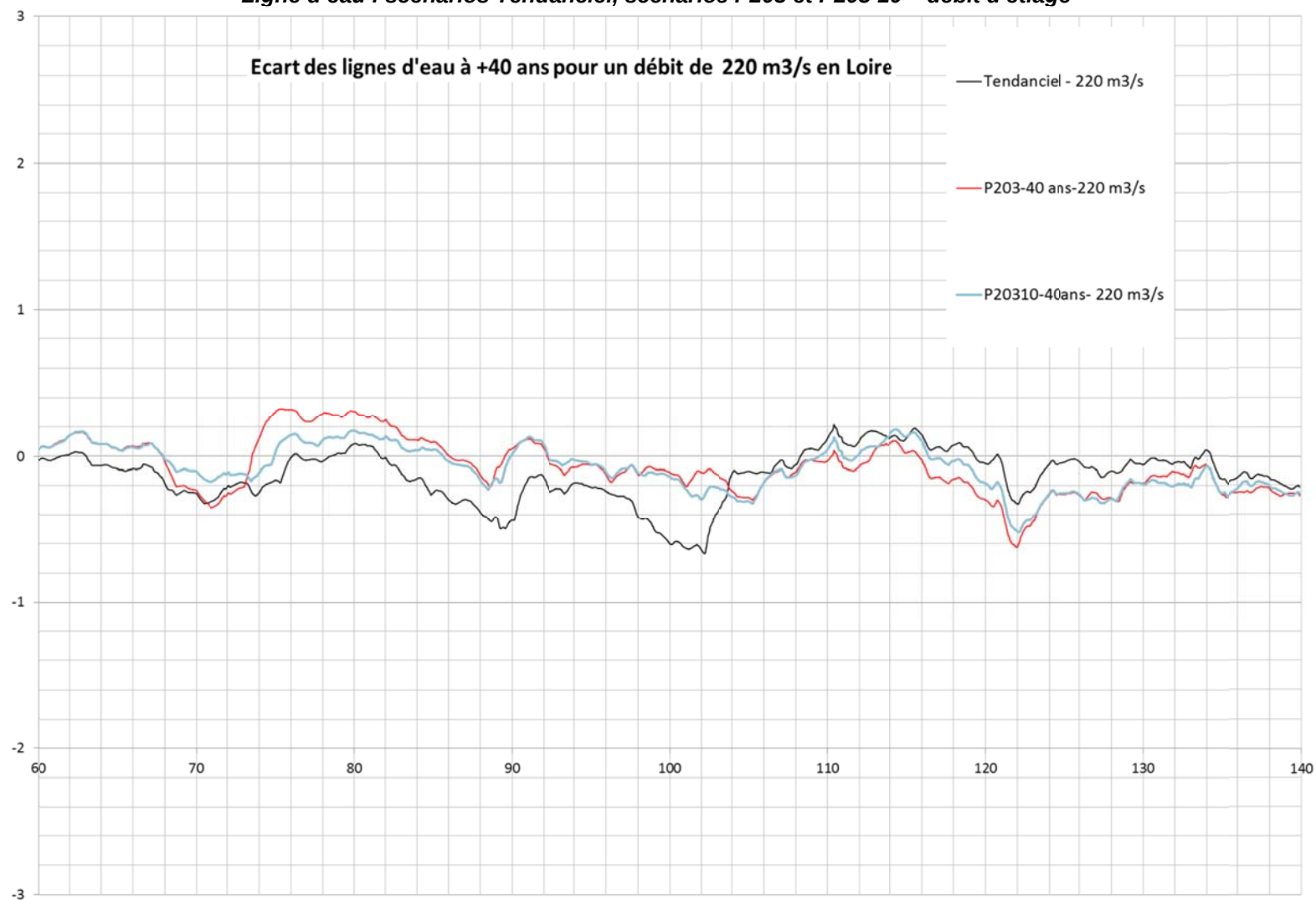
- ☐ A réduire dans le secteur amont les risques de baisse des lignes d'eau suite à la réouverture des bras et la suppression des épis ;
- ☐ A minimiser le coût des travaux.

Les différentes actions proposées sont les suivantes.

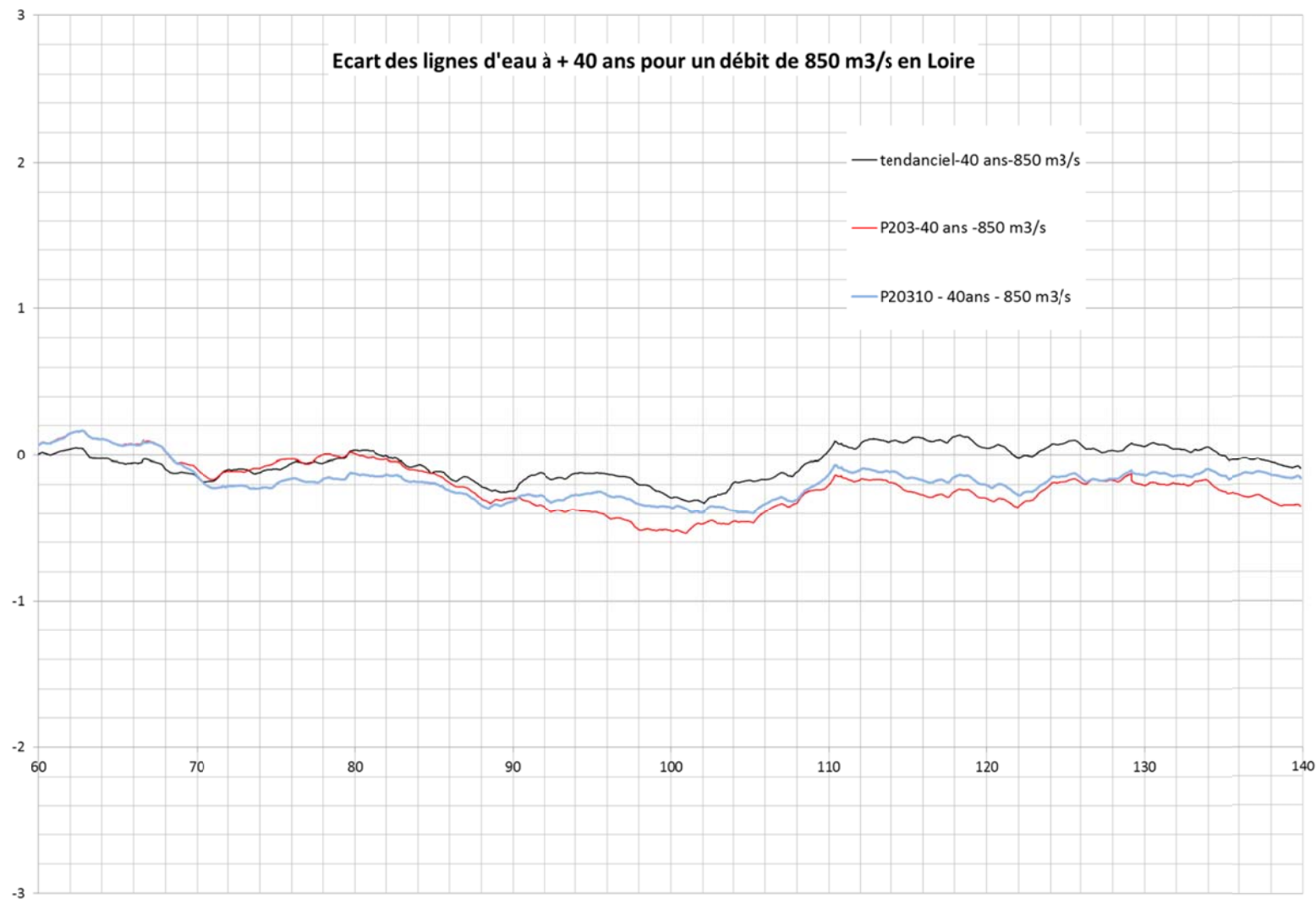
- ☐ Maintien des épis entre la Pointe et le pont de l'Alleud (bief 747, 748, 749).
- ☐ Réouverture du bras de Saint-Georges en maintenant toutefois un contrôle pour le débit d'étiage (reconfiguration de la chevette actuelle).
- ☐ Suppression des épis en rive gauche au droit du pont de l'Alleud (bief 750).
- ☐ Maintien des épis dans le bras de Chalonnes (bief 751, 752 et 753, 754 et 755).
- ☐ Arasement des épis à -1 m par rapport à la cote actuelle entre Montjean et Ingrandes (bief 701).
- ☐ Maintien des épis dans le bras d'Ingrandes (bief 702).
- ☐ Suppression des épis dans le bras de Varades (bief 703, 704) avec maintien de la chevette barrant l'entrée du bras de Varade pour assurer un contrôle de la ligne d'eau en étiage dans le bras de Saint Florent-le-Vieil.
- ☐ Raccourcissement des épis dans le lit entre Le Marillais et l'amont d'Ancenis (bief 706, 707, 708)
- ☐ Arasement des épis de -1m à Ancenis (dans bief 709 et 710).
- ☐ Suppression des épis et de la chevette barrant le bras de l'île de Neuve-Macrière.
- ☐ Suppression des épis dans le bras principal à Champtoceaux (bief 711).
- ☐ Raccourcissement des épis à Oudon en rive gauche et suppression des épis en rive droite (bief 712).
- ☐ Arasement des épis en aval de l'île Perdue jusqu'à Mauves (bief 713).
- ☐ Raccourcissement des épis à Mauves (bief 714).
- ☐ Ouverture du bras de la Sauterelle par suppression des épis et chevette à l'entrée du bras (bief 715).
- ☐ Maintien des épis entre Thouaré et Bellevue (bief 716, 717 et 718).

Le programme ainsi défini (dénommé par la suite P203 10) a été simulé sur une période de 75 ans. Les principaux résultats de simulation sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

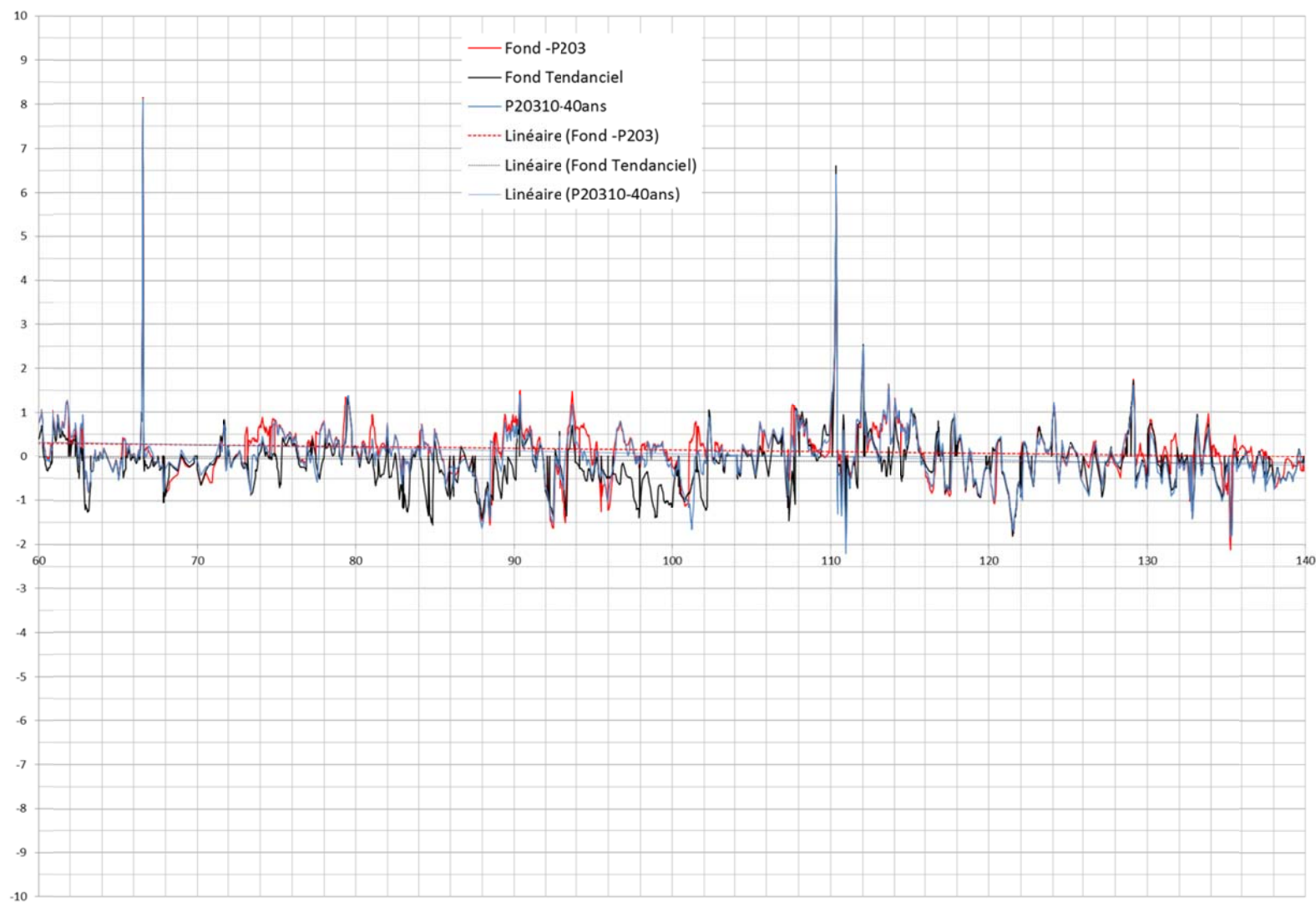
Ligne d'eau : scénarios Tendanciel, scénarios P203 et P203 10 – débit d'étiage



Ligne d'eau : scénarios Tendanciel, scénarios P203 et P203 10 – Module



Evolution des fonds : scénarios Tendanciel, scénarios P203 et P203 10



8.2.2.Effets sur les lignes d'eau

La ligne d'eau d'étiage est rehaussée par rapport au scénario P203 à Mauves, en amont d'Ingrandes et dans une moindre mesure dans le secteur d'Ancenis. Elle baisse par contre ailleurs, en particulier entre le Cellier (PK 74) et Champtoceaux (PK 86).

Pour le module, la ligne d'eau est rehaussée par rapport au scénario P203, en amont d'Ancenis. Elle baisse jusqu'à Mauves et se stabilise en aval.

8.2.3.Effet sur l'évolution des fonds

Le bilan sédimentaire reste globalement positif dans le bras principal en aval du pont de l'Alleud (+900 000m³). Ce bilan permet de maintenir des fonds stables.

En amont du pont de l'Alleud, la tendance à l'incision va se poursuivre.

8.3. AMÉNAGEMENTS COMPLÉMENTAIRES

8.3.1. Principes

Les actions complémentaires visent à créer des pertes de charges localisées permettant de rehausser les lignes d'eau d'étiage et des crues courantes, et ainsi réduire les pentes hydrauliques en amont.

Elles portent sur :

- ☐ Un aménagement à Bellevue permettant de rehausser la ligne d'eau d'étiage de 1.0 m.
- ☐ Un aménagement à Ancenis permettant de créer une perte de charge égale à 0.5 m constante avec le débit.
- ☐ La restauration des seuils à échancrure du Fresne-sur-Loire sur Loire permettant de restaurer la perte de charge de 0.5 m et considéré en première approche constante avec le débit.
- ☐ La reprise d'érosion sur les berges

Nous avons simulé à l'aide du modèle hydro-sédimentaire les trois aménagements pré cités combinés avec les trois situations différentes :

- ☐ La situation actuelle ;
- ☐ La situation correspondant à la programmation P 203 ;
- ☐ La situation correspondant à la programmation P 203 10 (correspondant au P 203 optimisé).

8.3.2. Bilan sédimentaire

Les tableaux ci-après détaillent les volumes d'érosion et de dépôt ainsi que les évolutions moyennes des fonds bief par bief et pour les trois situations testées :

- ☐ P2061 : scénario tendanciel avec aménagement du lit à Bellevue, Ancenis et Ingrandes (réaménagement des seuils du Fresne-sur-Loire) ;
- ☐ P2062 : scénario P203 avec aménagement du lit à Bellevue, Ancenis et Ingrandes (réaménagement des seuils du Fresne-sur-Loire) ;
- ☐ P2063 : scénario P203 optimisé (P203-10) avec aménagement du lit à Bellevue, Ancenis et Ingrandes (réaménagement des seuils du Fresne-sur-Loire) ;

Ces résultats appellent les différentes observations suivantes :

- ☐ La réalisation des aménagements localisés sans aucune autre action conduira à un ralentissement du processus d'érosion sans pour autant permettre d'inverser la tendance. On note en effet un bilan sédimentaire légèrement négatif dans le bras principal. Dans les bras secondaires et les systèmes d'épis, le bilan sédimentaire n'évolue guère (tendance au dépôt toutefois légèrement plus marquée). Ce bilan sédimentaire entraîne une légère évolution des fonds avec une tendance à l'engravement de 0.2 m en aval de la zone d'étude.
- ☐ La combinaison des aménagements localisés avec les actions optimisées pour la réouverture des bras secondaires et de remodelage des épis dans le lit du fleuve (P203 ou P20310) entraînera un réengravement généralisé du fond du bras principal décroissant de l'aval vers l'amont. L'engravement sera négligeable à la Possonnière et atteindra près de 75 cm en aval.

8.3.3. Lignes d'eau

Les lignes d'eau pour les trois débits caractéristiques ont été calculées. Les profils en long des écarts sont indiqués sur les figures ci-après.

Les résultats appellent les commentaires suivants.

Pour les débits d'étiage :

- ☐ Les lignes d'eau sont logiquement rehaussées en amont des aménagements localisés. La remontée de la ligne d'eau correspond à la valeur de la perte de charge des aménagements. Elle décroît ensuite plus ou moins lentement en fonction des actions programmées dans le lit du fleuve.
- ☐ Les actions prévues au scénario P203 améliorent d'autant l'efficacité des aménagements localisés sur le relèvement des lignes d'eau. Les lignes d'eau ainsi calculées se situent au-dessus de celle du scénario tendanciel excepté en amont de Montjean.

Pour le module et le débit de crue annuelle :

- ☐ Les lignes d'eau se situent au-dessus de celle du scénario tendanciel excepté en amont d'Ingrandes.
- ☐ Les actions prévues au scénario P203 améliorent l'efficacité de l'aménagement de Bellevue.

8.4. CONCLUSIONS

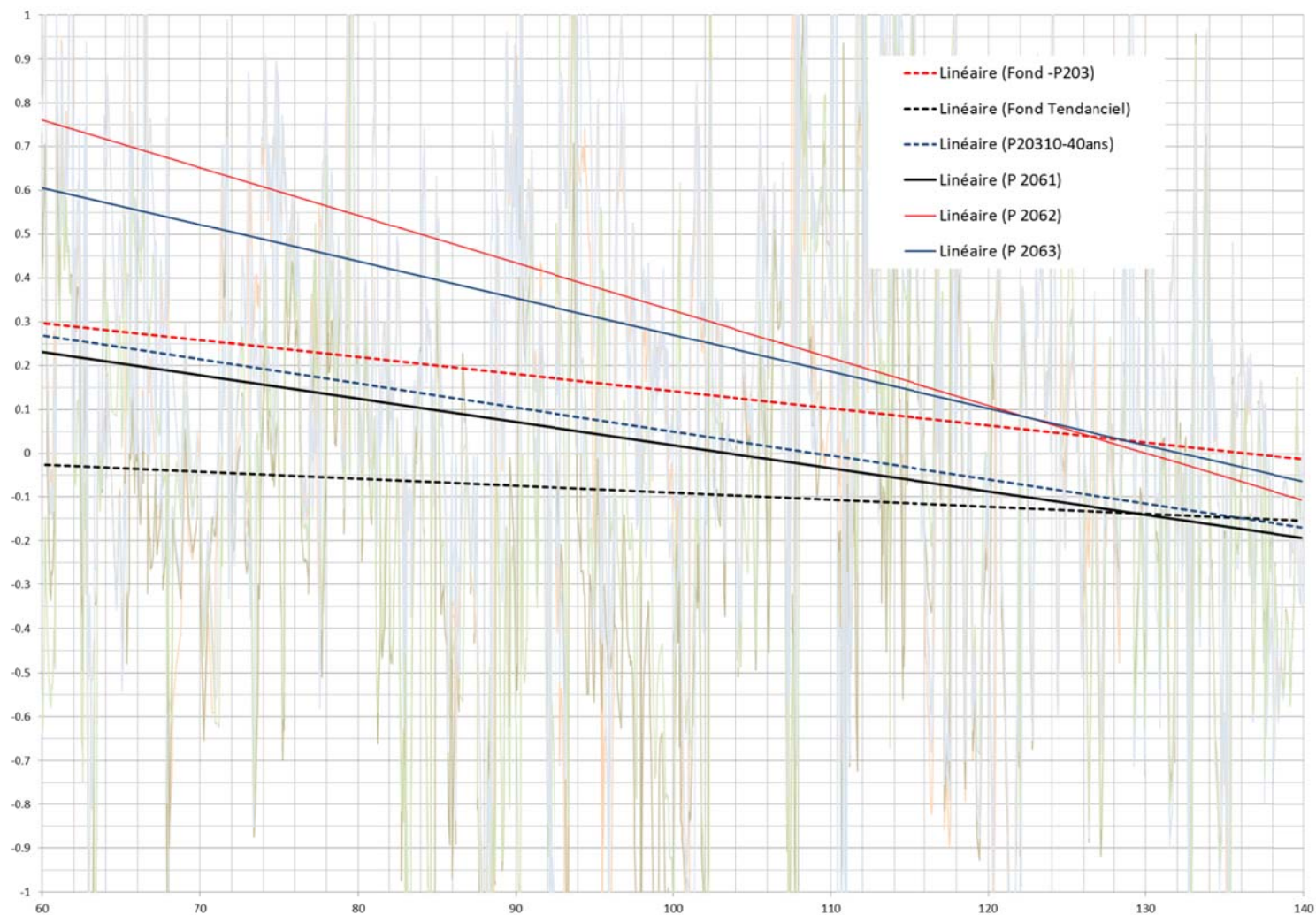
Plusieurs enseignements peuvent se dégager des différentes simulations effectuées :

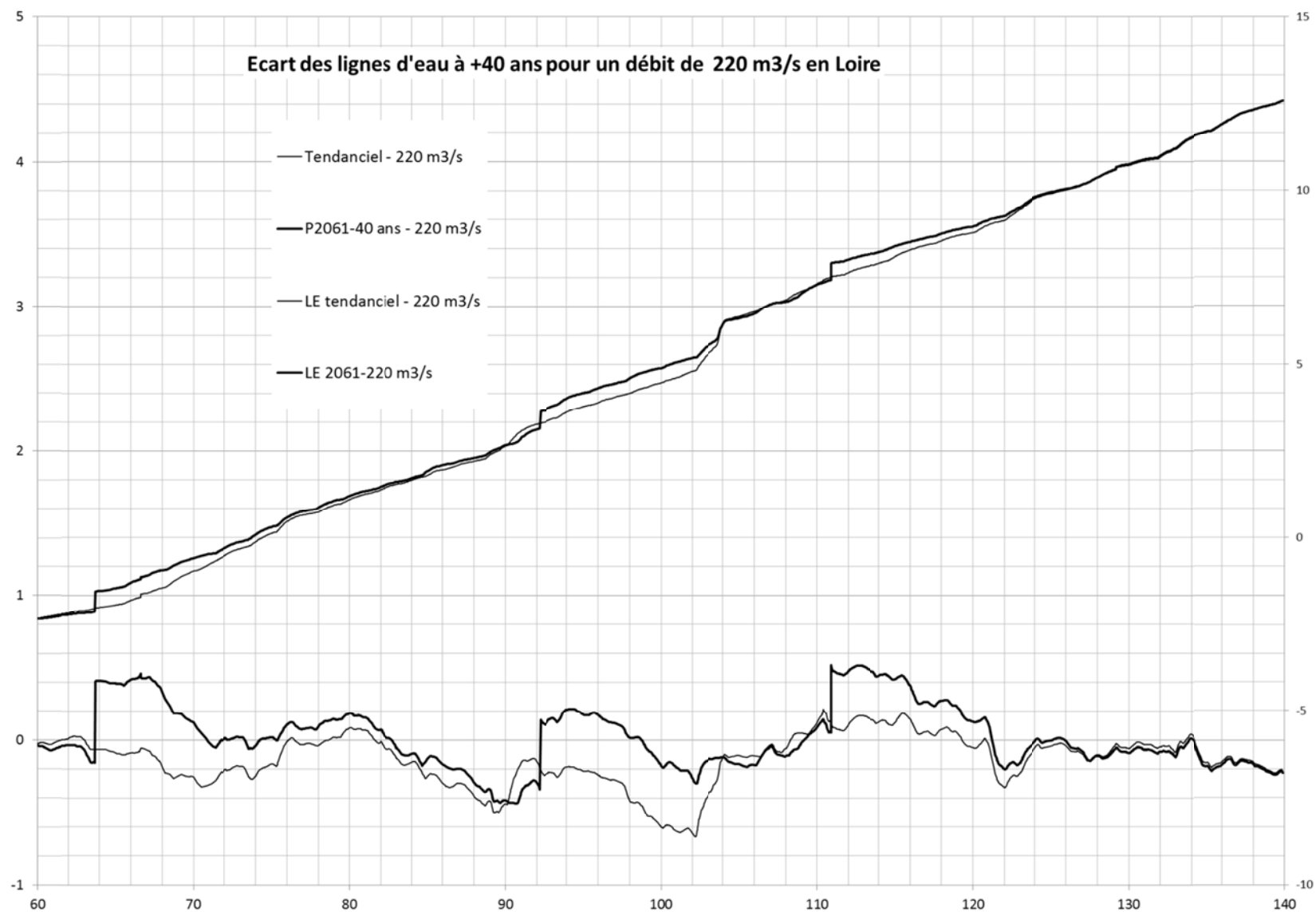
- ❑ La combinaison d'actions visant à décorseter le lit (remodelage des épis et ouverture des bras secondaires) et à créer des pertes de charges localisées permet de satisfaire au double objectif de réengrèvement du fond du chenal et de rehaussement des lignes d'eau par rapport au scénario tendanciel, à l'exception du secteur situé en amont de Montjean et intéressant plus particulièrement le bras de Chalonnes et le lit de la Loire entre la Pointe et la Possonnière.
- ❑ Les chevrettes en amont des bras contrôlent les lignes d'eau d'étiage dans le bras principal en amont. De ce fait, la réouverture des bras secondaires, permettant de réduire les contraintes d'érosion dans le bras principal pour une large gamme de débits du fleuve, doit être réalisée en prenant soin de maintenir un contrôle des lignes d'eau aux bas débits. L'ouverture des bras secondaires consistera donc à araser les chevrettes en calant la crête au-dessus de la ligne d'eau d'étiage.
- ❑ Dans ce contexte, le réaménagement de la chevette de l'Alleud (réglage de la cote d'arase et fermeture de la brèche actuelle) constitue la mesure la plus efficace pour maintenir la ligne d'eau du fleuve en amont. Les épis du secteur en amont de la Possonnière ont déjà été remodelés par VNF dans le bras des Lombardières en 2009 et ce remodelage semble produire ses effets. En revanche, à l'aval, le déstockage de sable entre les épis sur ce secteur risque d'entraîner un abaissement non désiré des lignes d'eau. Dans ces conditions, le remodelage des épis en amont de la chevette de l'Alleud n'est pas souhaitable.
- ❑ C'est entre Ingrandes et Oudon, que la ligne d'eau connaît la plus forte baisse (étiage, module et crue annuelle). Il convient donc d'agir en priorité sur ce secteur.
- ❑ Le décorsetage du lit par remodelage des épis libère une grande quantité de matériaux qui transite vers l'aval. Une fraction de ce volume se redépose dans le bras principal. Dans ces conditions, il convient de privilégier lorsque cela est possible un rechargement du lit principal avec des matériaux non érodables ou faiblement érodables ($D_{50} > 15$ mm).

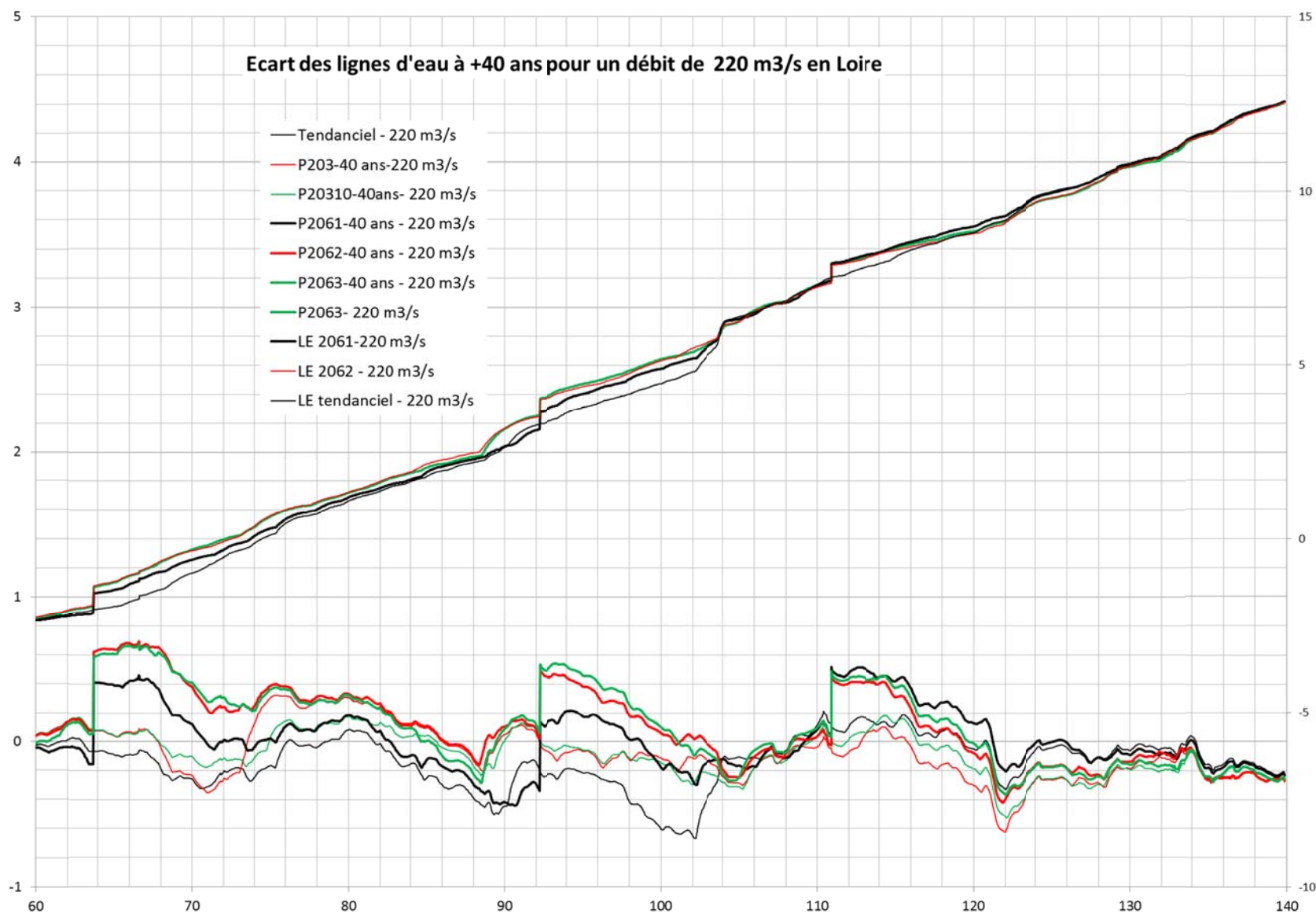
Bilan sédimentaire à 40 ans – Aménagements localisés dans le lit combinés aux trois situations : actuelle, programmation P203 et P20310

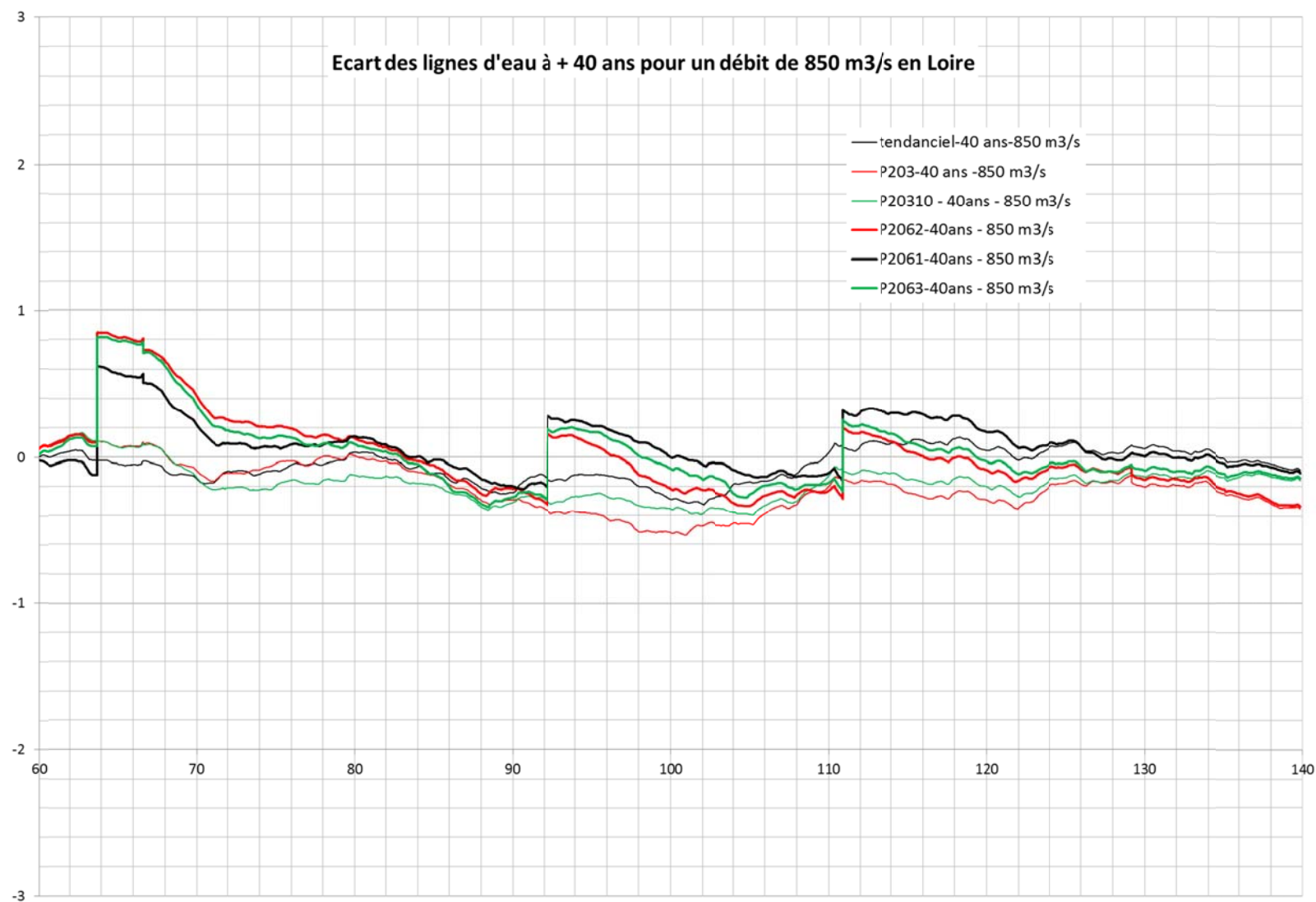
	Bellevue		Thouaré	Mauves			Oudon			Ancenis				St Florent				Ingrandes	Montjean						Pont de l'Alleud	Possonnière		La Pointe	Bilan
Scénario 2061																													
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47		
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	-51	354	-1	-136	-16	160	-10	-206	-353	-67	68	-162.0	-101.0	3	-23	-70	484	191	16	49	8	-68	49	26	-73	-129	-186	-244	
dif/Tendanciel	-205	298	51	200	-67	78	25	19	52	-28	121	253	70	12	-5	-20	181	128	6	34	37	45	15	12	-30	-9	-7	1266	
Evolution des fonds (cm)	-8	55	0	-23	-3	17	-2	-54	-57	-37	23	-26	-39	3	-9	-80	91	31	69	37	6	-25	70	74	-15	-31	-31		
dif/Tendanciel	-24	44	29	33	-11	8	5	5	9	-15	41	40	27	11	-1	-23	34	21	27	26	28	18	21	74	-6	-2	-1		
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747		
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	133	42	10	18	77	47	58	-3	-95	-8	8	34	91		43	48	17	-209		5	1	11	27	-6	-33	-56	47	307	
dif/tendanciel	-1	42	0	3	3	12	7	-6	13	7	13	23	-4		26	3	-14	54		0	0	3	3	-1	-3	-1	-1	181	
Scénario 2062																													
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47		
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	285	638	48	-15	194	477	140	27	-9	18	239	174	-34.0	24	113	24	429	397	12	21	-21	-85	51	53	16	-18	-76	3122	
dif/Tendanciel	131	582	100	321	143	395	175	252	396	57	292	589	137	33	131	74	126	334	2	6	8	28	17	39	59	102	103	4632	
Evolution des fonds (cm)	46	98	27	-3	32	51	27	7	-1	10	81	28	-13	21	47	27	81	66	52	16	-16	-32	73	124	3	-4	-13		
dif/Tendanciel	30	87	56	53	24	42	34	66	65	32	99	94	53	29	55	84	24	56	10	5	6	11	24	124	12	25	17		
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747		
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	136	43	10	18	-144	-334	-484	-54	-350	-103	-86	-686	-180		-224	-188	-37	-989		5	1	9	25	5	-230	-372	-654	-4863	
dif/tendanciel	2	43	0	3	-218	-369	-535	-57	-242	-88	-81	-697	-275		-241	-233	-68	-726		0	0	1	1	10	-200	-317	-702	-4989	
Scénario 2063																													
bief 1D	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	56	55	54	53	52	50/51	49	48	47		
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	233	654	50	33	172	428	118	-34	-213	20	175	178	-51.0	2	45	38	435	368	14	31	-14	-88	44	31	-125	-149	-207	2188	
dif/Tendanciel	79	598	102	369	121	346	153	191	192	59	228	593	120	11	63	88	132	305	4	16	15	25	10	17	-82	-29	-28	3698	
Evolution des fonds (cm)	38	101	29	6	28	46	23	-9	-35	11	59	28	-20	2	19	43	82	61	59	24	-11	-33	62	92	-26	-36	-35		
dif/Tendanciel	22	90	58	62	20	37	30	50	31	33	77	94	46	10	27	100	25	51	17	13	11	10	13	92	-17	-7	-5		
bief 2D	718	717	716	715	714	713	712	711	710	709	708	707	706		704	703	702	701		755	754	753	752	750	749	748	747		
volume d'érosion/dépôt (x 1000 m3)	135	43	10	-234	-151	-342	-454	-55	-257	-79	-109	-648	-110		-203	-182	17	-874		5	1	9	26	-27	-36	-61	38	-3538	
dif/tendanciel	-14	43	0	-249	-225	-377	-505	-58	-149	-64	-104	-659	-205		-220	-227	-14	-611		0	0	1	2	-22	-6	-6	-10	-3679	

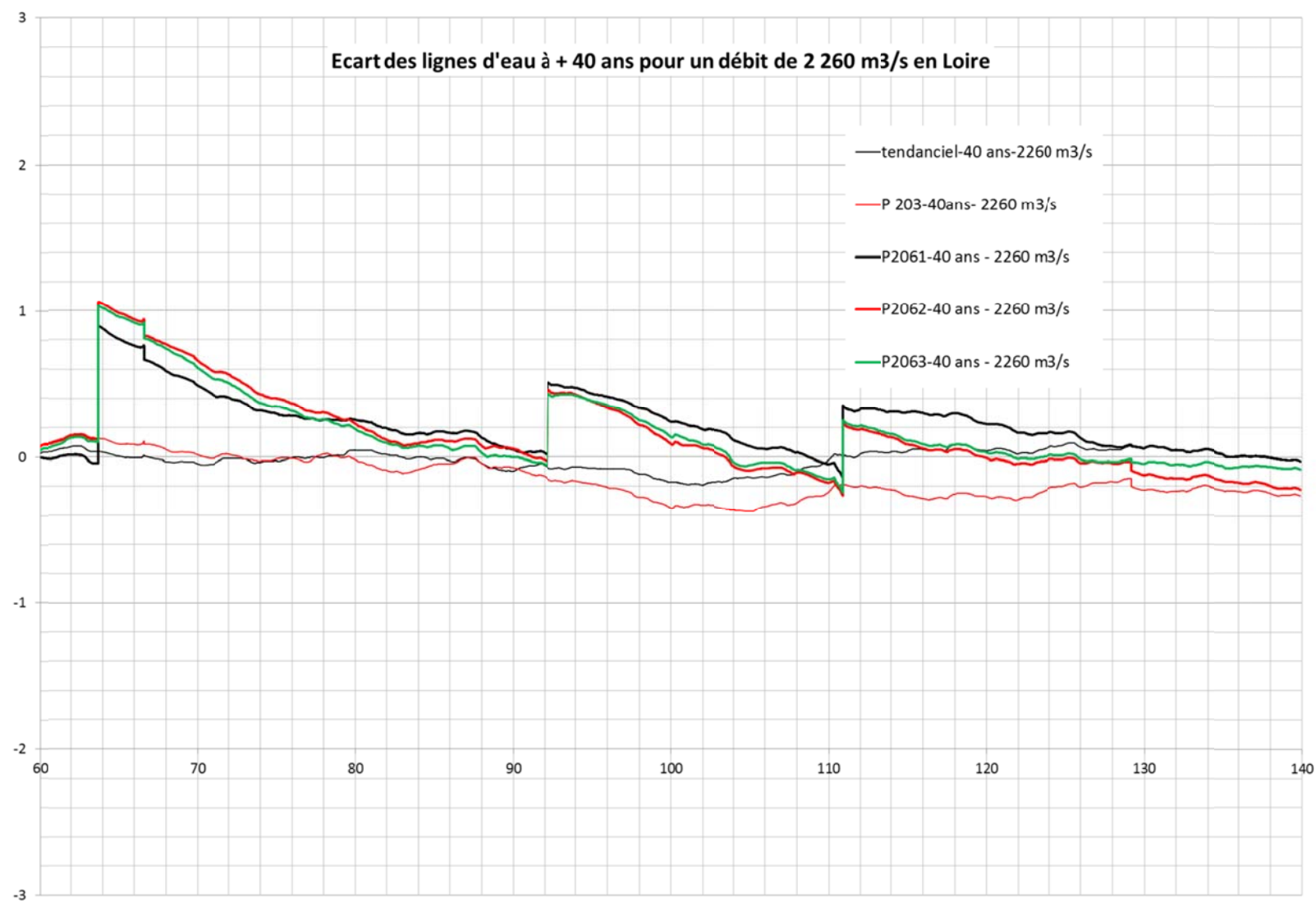
Evolution des fonds – tendances pour les trois situations testées à 40 ans :
Aménagements localisés combinés à la situation actuelle, programmation P203 et P20310











9. ANALYSE DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

9.1. PRÉAMBULE

L'impact de la reconquête du lit de la Loire se fera sentir sur le chenal principal et l'ensemble des annexes hydrauliques ; soit directement pour les zones connectées à la Loire (directement ou lors des crues) ou indirectement par remontée de la nappe d'accompagnement et lors des crues. Les habitats ou espèces évoqués dans le contexte réglementaire (Natura 2000 ou des ZNIEFF) ne seront pas repris ici.

Ces éléments d'analyses sont repris sur la cartographie des enjeux environnementaux présentée en annexe.

9.2. DANS LE LIT MINEUR

Différents types d'organismes seront concernés directement ou indirectement par les évolutions de la ligne d'eau.

9.2.1. Les peuplements piscicoles

Pour la partie dulçaquicole de la zone d'étude, 31 espèces ont été recensées par l'ONEMA entre 1977 et 2005 sur le site de Montjean-sur-Loire.

<i>Able de Heckel</i>	<i>Brochet</i>	<i>Ide mélanote</i>	<i>Pseudorasbora</i>
<i>Ablette</i>	<i>Chevaine</i>	<i>Lamproie de rivière</i>	<i>Rotengle</i>
<i>Alose feinte</i>	<i>Ecrevisse américaine</i>	<i>Lamproie marine</i>	<i>Sandre</i>
<i>Anguille</i>	<i>Flet</i>	<i>Loche de rivière</i>	<i>Silure glane</i>
<i>Barbeau fluviatile</i>	<i>Gardon</i>	<i>Mulet porc</i>	<i>Spiralin</i>
<i>Bouvière</i>	<i>Goujon</i>	<i>Perche</i>	<i>Tanche</i>
<i>Brème</i>	<i>Grémille</i>	<i>Perche soleil</i>	<i>Vandoise</i>
<i>Brème bordelière</i>	<i>Hotu</i>	<i>Poisson chat</i>	

Liste d'espèce issue des données de suivi ONEMA sur la station de Montjean sur Loire

Cette grande diversité d'espèce et la nature des espèces présentes illustre bien la diversité des conditions de milieux offertes par le lit principal de la Loire, ses bras secondaires et ses annexes hydrauliques. La présence d'espèce amphihalines accroît notablement cette diversité.

La partie aval de la zone d'étude (en aval d'Oudon) a fait l'objet d'un inventaire des poissons. Cette étude a été réalisée à la demande du GIP Loire Estuaire par le Muséum National d'Histoire Naturelle. Vingt trois stations ont été prospectées. Cet inventaire a permis de caractériser la présence de 29 espèces de poissons, elles sont réparties au sein de 7 guildes écologiques.

Gilde	Nom commun	Nom scientifique	Occurrence
MAA	Callionyme lyre	<i>Callionymus lyra</i>	accidentelle
	Merlu	<i>Merluccius merluccius</i>	accidentelle
	Motelle à cinq barbillons	<i>Ciliata mustela</i>	rare
	Mulet doré	<i>Liza aurata</i>	accidentelle
	Tacaud	<i>Trysopterus luscus</i>	rare
MJA	Vieille	<i>Centrolabrus exoletus</i>	accidentelle
	Athérine	<i>Atherina presbyter</i>	accidentelle
	Bar	<i>Dicentrarchus labrax</i>	occasionnelle
	Merlan	<i>Merlangius merlangus</i>	rare
	Sole	<i>Solea solea</i>	rare
CAT	Sprat	<i>Sprattus sprattus</i>	occasionnelle
	Anguille	<i>Anguilla anguilla</i>	accidentelle
	Flet	<i>Platichthys flesus</i>	commune
ANA	Mulet porc	<i>Liza ramada</i>	occasionnelle
	Alose feinte	<i>Alosa fallax</i>	accidentelle
	Eperlan	<i>Osmerus eperlanus</i>	rare
ESR	Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	accidentelle
	Epinoche	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	accidentelle
	Gobie buhotte	<i>Pomatoschistus minutus</i>	rare
	Gobie tacheté	<i>Pomatoschistus microps</i>	accidentelle
FWA	Nonnat	<i>Aphia minuta</i>	accidentelle
	Breme	<i>Abramis brama</i>	occasionnelle
	Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	rare
	Idé mélanotte	<i>Leuciscus idus</i>	accidentelle
	Sandre	<i>Stizostedion lucioperca</i>	accidentelle
FWR	Vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i>	accidentelle
	Barbeau	<i>Barbus barbus</i>	accidentelle
	Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>	accidentelle
	Perche franche	<i>Percha fluviatilis</i>	accidentelle

Liste d'espèce issue de l'inventaire MNHN /GIPLE 2010

Cette étude a montré que l'estuaire est exploité en hiver par les flets et les mullets porcs et les soles, les merlans et les bars. En aval, le peuplement de poisson est largement concentré autour de la zone polyhaline de l'estuaire (de Saint-Nazaire à Donges), ceci étant probablement lié à une rapide diminution de la salinité avec la distance à la mer, et la température froide de la masse d'eau continentale.

En amont, les zones oligohalines et limniques sont géographiquement étendues de Sainte-Anne à Oudon. Le peuplement de poisson y est dominé par les flets et par les brèmes. Il a été observé une dominance de juvéniles pour les espèces dominantes telles que les tacauds, les soles, les bars, les mullets porcs, les merlans et les flets, suggérant que l'estuaire assure un rôle de nourricerie en hiver pour les individus de l'année.

Les présences d'éperlans adultes, d'anguilles et d'anguillettes, et de jeunes lamproies marines démontrent aussi l'utilisation en cette saison de l'estuaire comme zone de transit pour les poissons amphihalins.

9.2.2. Les poissons migrateurs amphihalins

Parfaitement centré sur la façade occidentale de l'Europe, le bassin de la Loire bénéficie d'une position biogéographique privilégiée par rapport à l'aire de répartition des espèces amphihalines de l'Atlantique Nord (Larinier & Steinbach, 2003). La plupart des poissons migrateurs d'intérêt patrimonial empruntent le chenal endigué de la Loire et circulent dans la zone d'étude.

Deux types de poissons migrateurs amphihalins circulent dans la zone d'étude (station RHP-ONEMA de Montjean-Sur-Loire ; Lasne, 2007) :

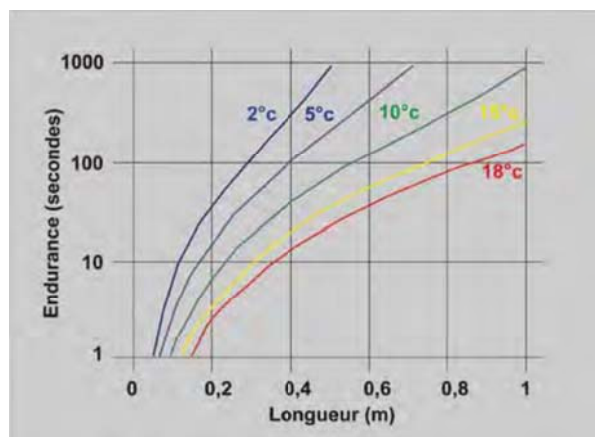
- ☐ les migrateurs anadromes (reproduction en eau douce et grossissement en mer)
- ☐ les migrateurs catadromes (reproduction en mer et grossissement en eau douce).

La période de montaison de ces espèces est également précisée dans le tableau ci-dessous (Larinier & Steinbach, 2003 ; Bach, Parouty & Lelièvre, 2009 ; Baglinière & Elie, 2000) :

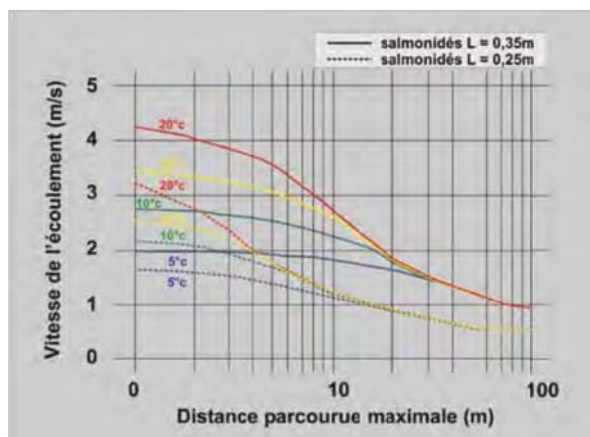
taxons			migration	Statut de protection	
migration	espèces	noms latin	montaison	Intérêt comunaautaire	Protection nationale
anadrome	Saumon atlantique	<i>Salmo salar</i>	début novembre - mi-juin	annexe II & V	
	Truite de mer	<i>Salmo trutta trutta</i>	début avril - fin novembre		x
	Alose vraie	<i>Alosa alosa</i>	mi-mars - mi-juin	annexe II & V	x
	Alose feinte	<i>Alosa fallax</i>	mi-mars - mi-juin	annexe II & V	x
	Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	début janvier - fin mai	annexe II	x
	Lamproie fluviatile	<i>Lampetra fluviatilis</i>	début janvier - fin mai	annexe II & V	x
	Eperlan d'europe	<i>Osmerus eperlanus</i>	fin mars - mai		
catadrome	Anguille européenne	<i>Anguilla anguilla</i>	civelles : début janvier - mi-juin anguillettes et anguilles jaunes : mi-avril - mi octobre printemps - été avril - juin		
	Flet	<i>Platichthys flesus</i>			
	Mulet porc	<i>Liza ramada</i>			

Les aménagements futurs ne doivent pas entraver la libre circulation des migrants. Dans le cas où des ouvrages de type seuil ou épis à radier sont retenus, la notion de franchissabilité des ouvrages devra être respectée pour chacune des espèces migratrices présentes dans la zone d'étude. La franchissabilité d'un ouvrage dépend des conditions hydrodynamiques sur et au pied de l'obstacle (vitesses, tirants d'eau, configuration des jets, aération, turbulence...) en relation avec la capacité de nage et de saut des espèces considérées (Larinier et al., 1999). Les conditions hydrodynamiques dépendent à la fois de la géométrie de l'ouvrage et des débits qui y transitent, c'est-à-dire des conditions hydrologiques en période de migration.

La température de l'eau est également un facteur limitant les capacités de nage des poissons (figure ci-dessous). Plus la température est élevée, moins le poisson a d'endurance. De plus, plus le poisson est petit et la vitesse d'écoulement forte, plus la distance maximale parcourue est faible.



Endurance du poisson en fonction de la température de l'eau (Larinier et al., 1999)



Distance parcourue par un poisson en fonction de sa taille et de sa vitesse d'écoulement (Larinier et al., 1999)

Par exemple, pour les grands salmonidés migrants, les vitesses maximales d'écoulement admissibles sont de 3,5 m/s pour une distance de 5 à 6 m et de 3 m/s pour une distance d'une dizaine de m. Pour les aloses, ces vitesses sont de 3 m/s sur 5 à 6 m et 2,5 m/s pour une dizaine de m (Larinier & Steinbach, 2003).

Les capacités de saut sont également dépendantes de la température et de la taille du poisson. Ainsi, pour les grands salmonidés migrants, la hauteur de chute maximale admissible est de 1, 2 à 1,5 m.

Les anguilles et notamment les civelles ainsi que les lamproies, les éperlans, les flets et les mulets ont des capacités de nages inférieures aux salmonidés. En revanche ces espèces empruntent les courants de flot pour la montaison, ce qui leur permet potentiellement de franchir les obstacles jugés infranchissables à basse mer.

Les données issues des modélisations nous permettent de connaître les hauteurs d'eau, vitesses de courants et hauteurs de chute en fonction de différents débits caractéristiques et coefficients de marée. Ces paramètres peuvent alors être confrontés aux données biologiques concernant les migrateurs afin d'évaluer l'impact de chaque projet sur ces derniers.

9.2.3. La moule d'eau douce *Unio crassus*

La présence d'*Unio crassus*, espèce d'intérêt communautaire (annexes II et IV de la Directive « Habitats ») et protégée au niveau nationale, est avérée dans le lit mineur de la Loire sur une quinzaine de stations sur le site « Natura 2000 » (Bachi & Moriette, 2002 ; ONEMA ; fédérations de pêche 44 & 49 in CORELA, 2004). Cette espèce est sensible à la modification des conditions hydro-sédimentaires (risque de colmatage). Elle est également dépendante de la qualité du milieu aquatique.

Le rehaussement de la ligne d'eau et un ralentissement des vitesses de courant sont susceptibles d'avoir un impact sur la population d'*Unio crassus*.

9.3. DANS LE LIT MAJEUR : FONCTIONNALITÉ DES ANNEXES HYDRAULIQUES

9.3.1. Les habitats

Dix des quinze habitats décrits sur le site Natura 2000 concerné ont été recensés sur les annexes hydrauliques entre Nantes et Ponts-de-Cé à l'occasion de plusieurs inventaires floristiques (BD GIP LE, 2009), l'un d'entre eux est prioritaire (en orange) :

Habitats (code Corine Biotope)	Marais	Boires	Bras sec.	Annexes artif.	Totaux
Forêt mixte (91 FO)	1	0	0	0	1
Forêt alluviale (91 EO)	3	0	2	0	5
Prairie maigre (6510)	3	0	1	0	4
Prairie à molinie (6410)	0	0	1	0	1
Mégaphorbiaie eutrophe (6430)	0	0	3	0	3
Eaux eutrophes à végétation aquatique (3150)	2	7	1	1	11
Végétation de rivière (3260)	1	7	0	1	9
Végétation de characées (3140)	0	0	1	0	1
Végétation annuelle des rives exondées (3130)	1	0	10	0	11
Végétation des berges vaseuses (3270)	1	0	13	0	14

9.3.2. Les espèces

41 espèces recensées dans les annexes hydrauliques bénéficient d'un statut de protection au moins régional (cf. tableau ci-après) dont 22 bénéficiant d'un statut international.

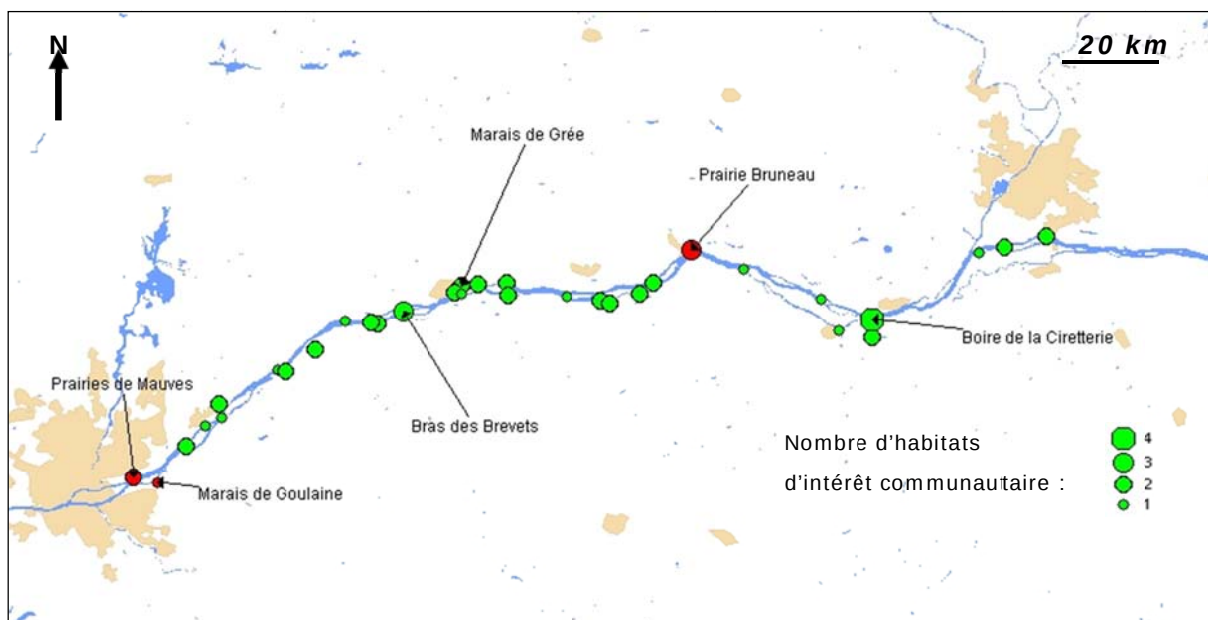
Sur les 17 espèces citées par l'annexe II de la directive « Habitats » présentes sur le site Natura 2000, 11 ont été recensées dans les annexes hydrauliques.

7 autres espèces d'intérêt communautaire citées dans les annexes IV et V ont été également inventoriées (annexe IV : « espèces animales et végétales présentant un intérêt communautaire nécessitant une protection stricte » et annexe V : « espèces animales et végétales d'intérêt communautaire dont le prélèvement dans la nature et l'exploitation sont susceptibles de faire l'objet de mesures de gestion »).

La présence de l'angélique des estuaires dans 3 annexes, du pique prune dans 2 annexes et de la Rosalie des alpes dans 2 annexes, doit amener les aménageurs et les gestionnaires à préserver en priorité leurs habitats.

5 espèces inscrites à l'annexe I de la directive « Oiseaux » sont rencontrées dans les annexes hydrauliques. 3 autres sont inscrites à l'annexe II.

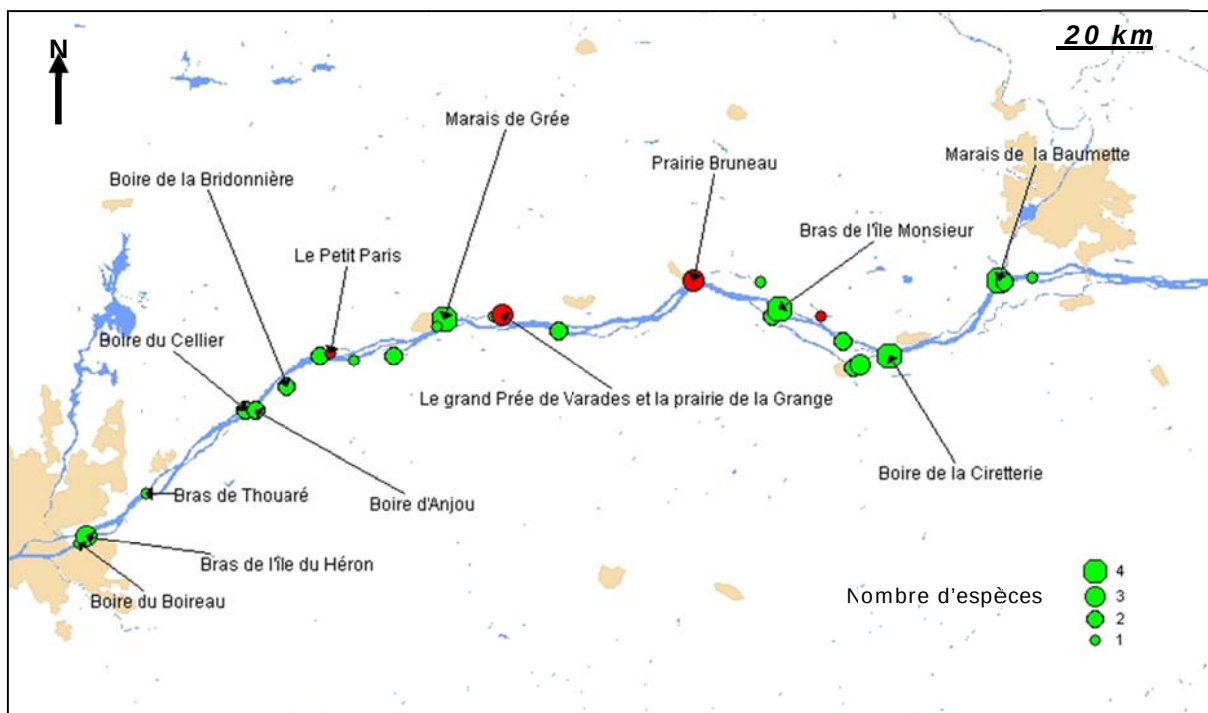
9.3.3. Biodiversité dans les annexes



Carte du nombre d'habitats d'intérêt communautaire présents dans les annexes connectées à la Loire (en vert) et non connectées à la Loire (en rouge), source : BD GIP LE, 2009

33 annexes sont caractérisées par des habitats d'intérêt communautaire. Parmi ces annexes, le bras secondaires des Brevets et la boire de la Ciretterie, directement connectés à la Loire présentent un minimum de 3 habitats d'intérêt communautaire. L'habitat prioritaire « forêt alluviale » (EO 91) est présent sur le Bras des Brevets. La Prairie de Mauves, non connectée à la Loire présente également 3 habitats d'intérêt communautaire.

Groupe	Taxons		Statut de protection			Annexes hydrauliques				
	Espèces	Nom latin	Dir. H-F-F/Oiseaux	Prot. Nat.	Prot. Rég.	Marais	Boires	Bras sec.	Artificielle	Totaux
Plantes	Angélique des estuaires	<i>Angelica heterocarpa</i>	annexe II et IV	x			1	2		3
	Butome en ombelle	<i>Butomus umbellatus</i>			x			1		1
	Cardamine à petite flore	<i>Cardamine parviflora</i>			x	1	1			2
	Céraiste douteux	<i>Cerastium dubium</i>			x		1			1
	Etoile d'eau	<i>Damasonium alisma</i>		x		1	1			2
	Fausse giroflée	<i>Erysimum cheiranthoides</i>			x			1		1
	Gagée de Bohême	<i>Gagea bohemica</i>		x		1				1
	Gratiola officinale	<i>Gratiola officinalis</i>		x		1	3			4
	Inule d'Angleterre	<i>Inula britannica</i>			x	1	3			4
	Marclée à quatre feuilles	<i>Marsilea quadrifolia</i>	annexe II et IV	x			1			1
	Pesse d'eau	<i>Hippuris vulgaris</i>			x	1				1
	Pigamon des rives	<i>Thalictrum flavum</i>			x			2		2
	Pulicaire vulgaire	<i>Pulcaria vulgaris</i>		x		1	1	1		3
	Renoncule à feuille d'ophioglosse	<i>Ranunculus ophioglossifolius</i>		x		1	1			2
	Scirpe épinglé	<i>Eleocharis acicularis</i>			x			1		1
	Scutellaire à feuilles hastées	<i>scutellaria hastifolia</i>			x	1	2			3
	Trèfle de Micheli	<i>Trifolium michelianum</i>			x	1	1			2
Mammifères	Castor d'europe	<i>Castor fiber</i>	annexe II, IV et V	x				3		3
	Loutre d'europe	<i>Lutra lutra</i>	annexe II et IV	x				2		2
Oiseaux	Barge à queue noire	<i>Limosa limosa</i>	annexe II			2				2
	Bruant des roseaux	<i>Emberiza schoeniclus</i>		x		1				1
	Chouette chevêche	<i>Athene noctua</i>		x		3				3
	Grèbe castagneux	<i>Tachybaptus ruficollis</i>		x		1	1			2
	Guifette moustac	<i>Chlidonias hybrida</i>		x		1				1
	Marouette de Baillon	<i>Porzana pusilla</i>	annexe I			1				1
	Marouette ponctuée	<i>Porzana porzana</i>	annexe I	x		1				1
	Martin pêcheur	<i>Alcedo atthis</i>	annexe I	x		1				1
	Oie cendrée	<i>Anser anser</i>	annexe II et III			2				2
	Petit Gravelot	<i>Charadrius dubius</i>		x				1		1
	Râle des genêts	<i>Crex crex</i>		x		10	2	2		14
	Sterne pierregarrin	<i>Sterna hirundo</i>	annexe I	x				1		1
	Sterne naine	<i>Sterna albilrons</i>	annexe I	x				1		1
	Vanneau huppé	<i>Vanellus vanellus</i>	annexe II			3				3
Poissons	Barbeau fluviatile	<i>Barbus barbus</i>	annexe V					2		2
	Bouvière	<i>Rhodeus amarus</i>	annexe II	x		2	9	5	1	17
	Brochet	<i>Esox lucius</i>		x			5	4		9
	Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>						1		1
	Lamproie marine	<i>Petromyzon marinus</i>	annexe II	x			1			1
Amphibiens	Vandoise	<i>Leuciscus leuciscus</i>		x				2		2
	Crapaud calamite	<i>Bufo calamita</i>	annexe IV	x		1				1
	Crapaud commun	<i>Bufo bufo</i>		x		1	1			2
	Grenouille agile	<i>Rana dalmatina</i>	annexe IV	x		1	4	2		7
	Grenouille de lessona	<i>Pelophylax lessonae</i>	annexe IV	x				1		1
	Grenouille verte	<i>Pelophylax kl. esculenta</i>	annexe V	x		2	4			6
	Pélodyte ponctué	<i>Pelodytes punctatus</i>		x		1	2			3
	Rainette arboricole	<i>Hyla arborea</i>	annexe IV	x		1	2			3
	Salamandre tachetée	<i>Salamandra salamandra</i>		x		2		1		3
	Triton crêté	<i>Triturus cristatus</i>	annexe II et IV	x				2		2
	Triton palmé	<i>Lissotriton helveticus</i>		x		2	2	1		5
	Triton ponctué	<i>Lissotriton vulgaris</i>		x				1		1
Insectes	Gomphe à pattes jaunes	<i>Gomphus flavipes</i>	annexe IV	x				1		1
	Gomphe serpent	<i>Ophiogomphus cecilia</i>	annexe II et IV	x		1		2		3
	Grand capricorne	<i>Cerambyx cerdo cerdo</i>	annexe II et IV	x		2		1		3
	Pique-prune	<i>Osmoderma eremita</i>	annexe II et IV	x				1	1	2
	Rosalie des alpes	<i>Rosalia alpina</i>	annexe II et IV	x				2		2



Carte du nombre d'espèces d'intérêt communautaire présentes dans les annexes connectées à la Loire (en vert) et non connectées à la Loire (en rouge), source :BD GIP LE, 2009

Les marais de Grée et de Baumette, le bras de l'île Monsieur et le Bras de la Ciretterie, connectés à la Loire, sont favorables à l'installation d'une forte biodiversité et présentent au moins 3 espèces d'intérêt communautaire.

Le marais de Grée est un site d'intérêt ornithologique national. Il est propice au stationnement de l'avifaune migratrice et est un site de nidification de nombreux oiseaux et notamment pour la marouette de Baillon et la marouette ponctuée, espèces d'intérêt communautaire. Il constitue également un habitat pour les amphibiens et présente une forte population de grenouilles verte et de tritons.

Le marais de Baumette présente un intérêt ornithologique international notamment pour le stationnement d'anatidés et de limicoles et le passage migratoire (oies, vanneaux, barges à queue noire...). La nidification d'espèces caractéristiques des prairies mésophiles à hygrophiles comme le râles des genêts est également avérée. C'est également un site de reproduction pour de nombreuses espèces de batraciens : Crapaud calamite, Crapaud commun, Rainette arboricole, Triton palmé et Salamandre tachetée. L'insecte coléoptère grand capricorne a été inventorié sur le site.

Le bras de l'île Monsieur est propice au batracien et accueille 3 espèces d'intérêt communautaire au niveau de la boire Boileau : la grenouille verte, la grenouille agile, la rainette arboricole. La bouvière, poisson inscrit à l'annexe II, a également été inventorié sur le site.

Le Bras de la Ciretterie présente une très forte biodiversité et abrite 6 espèces d'intérêt communautaire :

- ☐ la bouvière,

- ☐ la loutre et le castor d'Europe,
- ☐ la grenouille de Lessona et la grenouille verte,
- ☐ un coléoptère : le grand capricorne.

Certains sites non connectés à la Loire présentent également des intérêts en terme de biodiversité :

- ☐ la grande Prée de Varades et la prairie de la Grange sont propices au stationnement de l'avifaune migratrice. La présence des oiseaux d'intérêt communautaire oie cendrée, vanneau huppé, barge à queue noire et râle des genêts est avérée sur le site,
- ☐ la prairie Bruneau avec 3 espèces d'intérêt communautaire : le grand capricorne, le râle des genêts et la grenouille agile. La salamandre tachetée, protégée au niveau nationale, est également présente.

Il est à noter la présence de trois espèces d'intérêt communautaire prioritaires sur le site d'étude :

- ☐ l'angélique des estuaires dans la boire du Boireau, le bras de l'île du Héron et le bras de Thouaré,
- ☐ la rosalie des Alpes dans les bras de l'île Héron et du Cellier,
- ☐ le pique-prune dans le bras du Cellier et l'annexe artificielle du Petit Pâris.

9.3.4. Annexes hydrauliques et reproduction du brochet

Le brochet (*Esox lucius*), espèce cible de l'arrêté ministériel du 2 janvier 1986 et protégée au niveau national, est un migrateur holobiotique, c'est-à-dire qu'il réalise son cycle biologique entièrement en eau douce et que les zones de reproduction et de grossissement sont plus ou moins éloignées.

Sur son territoire, le brochet est moins gêné par les ouvrages transversaux que par le manque de connectivité de la Loire à ses annexes hydrauliques, zones indispensables à leur reproduction et au grossissement des juvéniles.

Le brochet, espèce protégée au niveau national, constitue un indicateur privilégié du fonctionnement des annexes hydrauliques du fait de sa position supérieure dans la chaîne alimentaire et de sa forte sensibilité à la baisse des niveaux d'eau, à la dégradation des habitats aquatiques latéraux et à leur déconnexion (Larinier & Steinbach, 2003).

Pour un fonctionnement écologique optimum des annexes, deux conditions de mise en eau des boires et marais doivent être remplies : submersion par la Loire de façon continue en mars-avril de chaque année pour le frai et connexion partielle avec le fleuve jusqu'en juin pour l'échappement des brochetons hors des frayères.

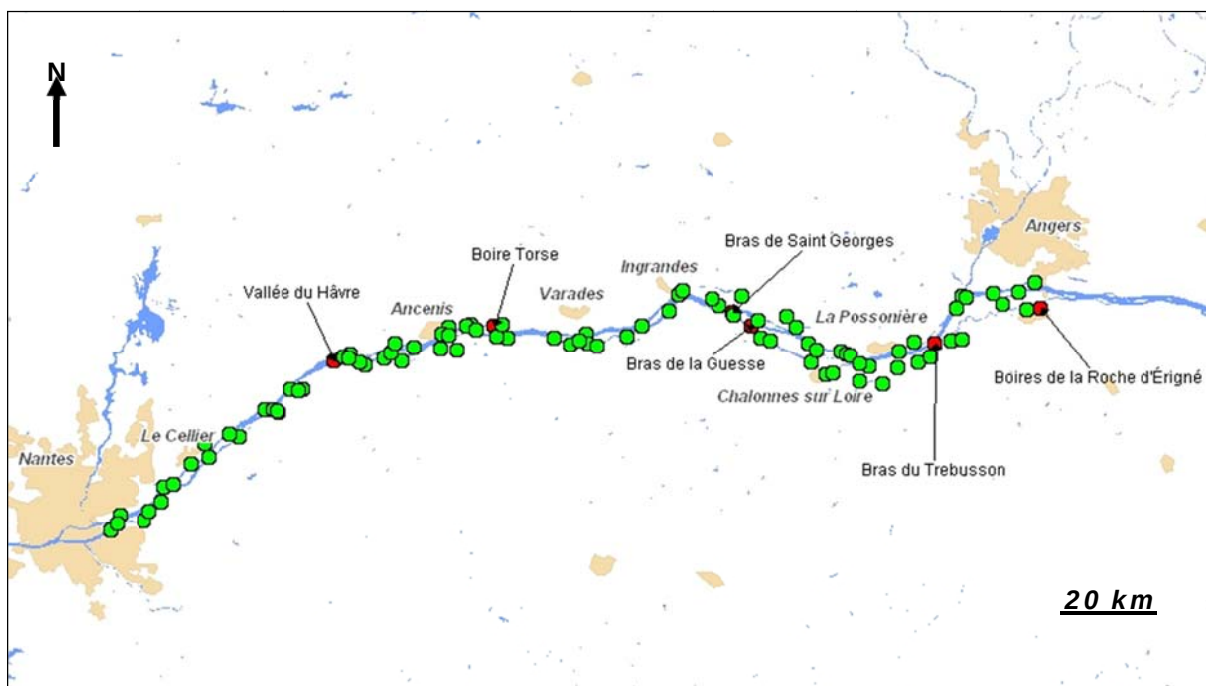
Les niveaux d'eau en Loire conditionnent donc fortement la bonne mise en eau de ces annexes et leur richesse écologique.

Des obstacles latéraux à la migration des géniteurs de brochet sont présents sur 6 annexes d'intérêt pour la reproduction du brochet (cf. carte ci-dessous) :

- ☐ l'accessibilité de la Vallée du Hâvre est limitée par une forte pente du chenal d'accès au port, un barrage d'enrochements, un barrage mobile et un radier de pont,
- ☐ pour la Boire Torse, la déconnexion précoce due à l'abaissement de la ligne d'eau provoque un envahissement par la végétation ligneuse et un envasement et donc la fermeture accélérée du milieu,
- ☐ la présence d'une vanne anti-retour bloque l'accès aux frayères de la Boire de la Roche d'Erigné,

- ❑ des seuils d'enrochement, destinés à concentrer le débit de la Loire vers le chenal de navigation, constituant des obstacles à la migration sur les bras secondaires de St Georges, de la Guesse et de Trébusson.

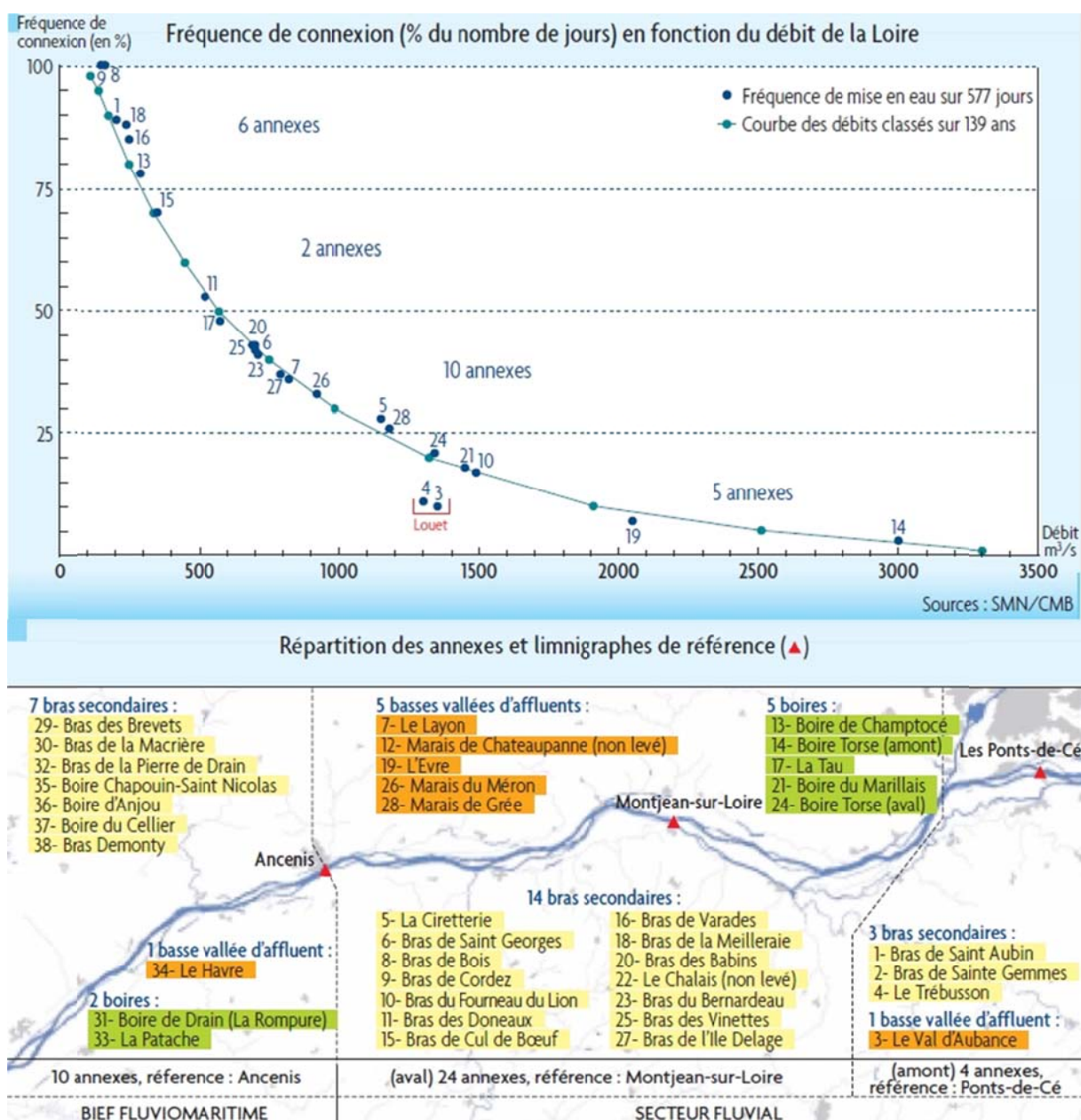
Remarque : des travaux ont été réalisés sur la Boire Torse en 2006-2007 afin de restaurer la continuité hydraulique et la communication entre la Boire et la Loire.



Carte des annexes hydrauliques sur la zone d'étude. Les annexes présentant des obstacles à la migration piscicole sont en rouge (source : BD GIP LE, 2009).

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

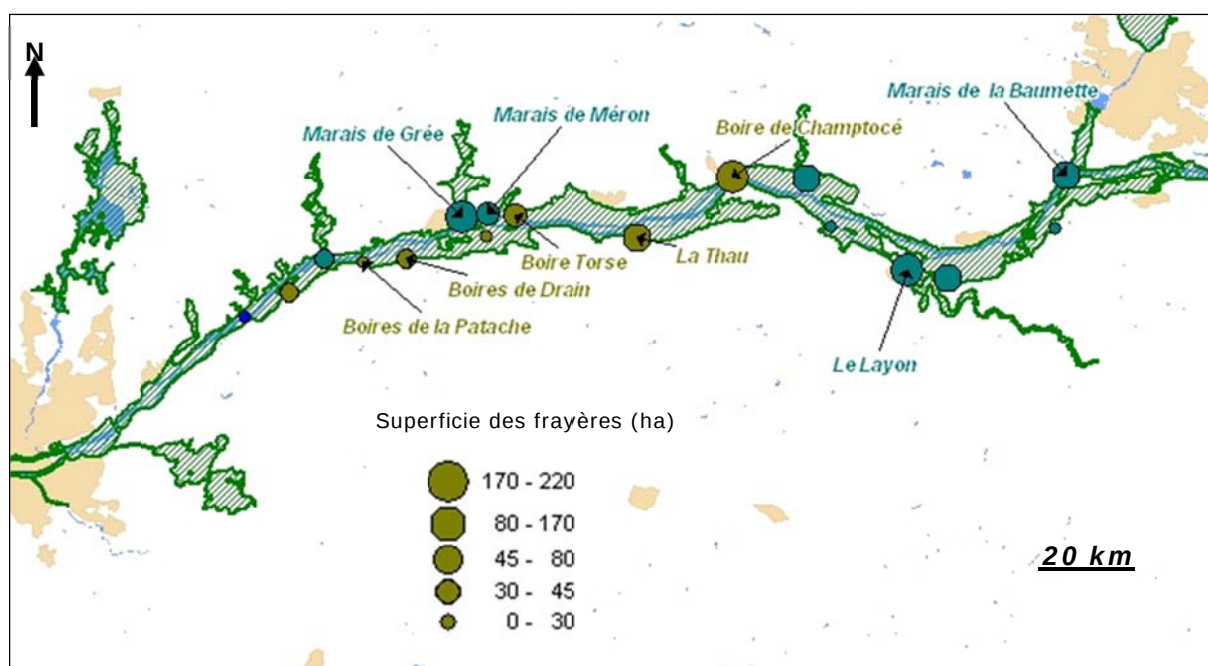
Sur les 23 annexes en relation directe avec la Loire, c'est-à-dire que l'alimentation de l'annexe se fait directement par le chenal et non par l'intermédiaire d'une boire ou d'un bras secondaire, et non soumises au marnage, 8 sont en eau la moitié du temps quand le débit du fleuve est supérieur à $571 \text{ m}^3/\text{s}$; 17 annexes ne sont plus connectées quand le débit descend sous $295 \text{ m}^3/\text{s}$ soit pendant un quart du temps (GIP LE, 2003).



Fréquence de connexion des annexes hydrauliques de la Loire fluviale d'Ancenis à Ponts-de-Cé (source : GIP LE, 2003).

Sur les 10 annexes soumises à la marée alimentées par le bief fluviomaritime (Loire de Ancenis à l'océan), seule la Boire de la Patache est en eau 9 jours sur 10, les autres assèchent en période estivale, de la mi-avril à la fin octobre.

Dans le cadre du groupe de travail « acteurs-usagers » mis en place par le GIP LE en 2008, un état des lieux a été réalisé sur les conditions de mise en eau des 52 annexes de type boires, bras morts, marais et basses vallées ainsi que des 36 bras secondaires présents sur le secteur d'étude (BD GIP-LE, 2009). Ce travail relativement empirique était basé sur le croisement de la connaissance terrain de certains acteurs, de données topographiques éparpillées et des emprises de submersibilité pour certaines conditions de débit.



Carte des annexes hydrauliques (boires en marron et prairies et marais en bleu) présentant un intérêt majeur pour la reproduction du brochet sur le site Natura 2000 FR 5200622 (zone hachurée en vert), Source : BD GIP-LE, 2009.

Il ressort de ce travail que 9 de ces annexes représentent plus de 80 % de la surface potentielle pour le frai du brochet (cf. carte ci-dessus). Environ 40% de ces surfaces sont aujourd'hui fonctionnelles, c'est-à-dire inondées et connectées au lit mineur de février à avril et partiellement connectées en juin et ce à un débit proche du module (850 m³/s).

10. CRITERES D'EVALUATION A PRENDRE EN COMPTE POUR LA CONSTRUCTION DU PROGRAMME D'ACTIONS

10.1. MILIEU PHYSIQUE

10.1.1. Lignes d'eau

Dans la mesure où la stratégie à retenir ne permettra pas un rehaussement des lignes d'eau sensible, il faudra veiller à ne pas dégrader la situation par rapport au scénario tendanciel.

L'outil de modélisation mis en place sera exploité pour analyser l'évolution des lignes d'eau sur l'ensemble du bief à long termes en fonction des actions retenues et de leur phasage.

Les résultats de simulation seront indiqués pour les débits de 220 m³/s (étiage), 850 m³/s (moyen), 2260 m³/s (crue).

10.1.2. Morphologie

Le bilan sédimentaire sera quantifié par rapport au scénario tendanciel afin de qualifier les effets des remobilisations du stock sédimentaire par les actions programmées, l'objectif étant de conserver les volumes de sable dans le bief.

Le programme d'actions sera également évalué en termes de largeur de bande active, c'est-à-dire l'estimation de la largeur de mobilité du lit vif rendu disponible par son décorsetage. 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.

10.2. FONCTIONS ET USAGES

10.2.1. Navigation

Les principaux usagers sont des plaisanciers et des pêcheurs, auxquels s'ajoutent un transporteur de sable et quelques bateaux à passagers.

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.

10.2.2. Crues

Les lignes d'eau seront spécifiquement analysées pour la crue centennale définie au PPRI (6230 m³/s, ordre de grandeur de la crue de 1910). Pour les crues plus importantes, le programme d'action sera optimisé pour rester en deçà de l'aléa défini au PPRI.

10.2.3. Environnement

L'objectif de ce volet sera d'évaluer et si possible prévoir les tendances d'évolution du milieu naturel en fonction des différentes options d'aménagement qui seront retenues dans ce secteur.

Au préalable, un bilan des données écologiques existantes a été réalisé par Asconit. Dans ce cadre, de nombreux échanges ont eu lieu avec le CORELA et la Fédération de pêche du 49.

10.3. FAISABILITÉ RÉGLEMENTAIRE

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.

10.4. ROBUSTESSE DES PROGRAMMES VIS-À-VIS D'UNE VARIATION DES DONNÉES D'ENTRÉE

10.4.1. Le régime hydrologique

Compte tenu des échelles de temps relativement longues caractérisant le charriage des matériaux de Loire (On estime que les matériaux rentrant à l'amont du système mettent vingt à trente ans pour atteindre Nantes), l'étude a porté sur des chroniques de Loire supérieures à 40 ans.

La période 1965-2005 a été retenue pour étudier les différents scénarios. Elle correspond à une hydraulité moyenne du fleuve. Des analyses complémentaires ont été réalisées sur la série de débits comprises entre 1945 et 1985, représentative d'une période plus sèche. Selon les études sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (projet ICC-HYDROQUAL), l'évolution future des débits devrait tendre vers une hydraulité encore plus faible que celle testée ici. En effet, le débit moyen sur la période projetée 2025-2045 serait d'environ 550 m³/s, contre 850 m³/s sur 1945-1985 et 1000 m³/s sur 1965-2005.

Sur ce dernier point, si les prévisions relatives au changement climatique montrent une diminution des débits annuels et des débits d'étiage, l'évolution des débits de crue est quant à elle très incertaine. Il s'agit, à ce stade de l'étude, d'un test de sensibilité au changement climatique.

10.4.2. 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.

A titre d'information, les mesures faites par l'université de Tours dans le lit de la Loire en amont de la confluence de la Vienne conduisent à une estimation du transport solide annuel sur le fond de 260 000 m³.

10.4.3. 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 SOGREAH² pour la Loire aval, sur la base des recommandations de l'ONERC³).

10.5. Coûts

Dans un premier temps des évaluations financières grossières ont été conduites. Elles portent sur l'ensemble des actions possibles, considérant l'ensemble des ouvrages (épis) et bras secondaires, sans considération de programmation réaliste à l'horizon 2020 mais visent à apporter des premiers éléments d'évaluation sur le long terme.

Une fois le programme d'action retenu et phasé, l'estimation sommaire des travaux sera réalisée sur une durée de 14 ans.

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