



Evolution morphologique du lit de la Loire au droit du secteur de Belleville et comparaison aux évolutions régionales



Rapport pour l'obtention du Master 2 IMACOF

**Rédigé par
Nicolas CLAUDE**

Stage encadré par Jean-Pierre BOUCHARD

Avril-août 2008

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement :

- Jean-Pierre Bouchard, pour m'avoir proposé ce stage et pour m'avoir encadré, ainsi que pour son aide, sa disponibilité, ses nombreux conseils et la confiance qu'il m'a accordé.
- Magali Jodeau, pour son analyse et les précieux conseils apportés pour la rédaction de ce rapport.

Enfin j'associe à ces remerciements tous les autres agents ainsi que les stagiaires du LNHE pour leur aide et leur contribution à l'ambiance de travail sympathique qui règne au sein du laboratoire.

Sommaire

Résumé	2
Abstract	2
Introduction	3
Partie1 : Présentation de l'entreprise et cadre général de l'étude	4
1. <i>Présentation de l'entreprise</i>	<i>4</i>
2. <i>Cadre de l'étude</i>	<i>5</i>
Partie 2 : Matériels et méthodes.....	11
1. <i>Bathymétrie</i>	<i>11</i>
2. <i>Analyse des photographies aériennes.....</i>	<i>12</i>
3. <i>Niveaux d'eau.....</i>	<i>15</i>
Partie 3 : Suivi de l'évolution morphologique de la Loire sur le secteur de Belleville	24
1. <i>Evolution de la bathymétrie.....</i>	<i>24</i>
2. <i>Evolution du tracé en plan</i>	<i>27</i>
3. <i>Evolution de la bande active</i>	<i>33</i>
4. <i>Evolution des points bas.....</i>	<i>35</i>
5. <i>Evolution des niveaux d'eau.....</i>	<i>36</i>
6. <i>Conclusion sur l'évolution morphologique du secteur de Belleville.....</i>	<i>43</i>
Partie 4 : Suivi de l'évolution morphologique de la Loire à une échelle régionale.....	45
1. <i>Synthèse bibliographique</i>	<i>45</i>
2. <i>Analyse des photographies aériennes.....</i>	<i>47</i>
3. <i>Analyse des lignes d'eau d'étiage</i>	<i>52</i>
4. <i>Conclusion de l'étude régionale.....</i>	<i>53</i>
Conclusion générale.....	54
Bibliographie.....	55
Table des figures	56
Table des tableaux	56
Table des matières	57
Annexes.....	60

Résumé

Dans le cadre du renouvellement d'occupation du Domaine Public Fluvial pour la centrale nucléaire de Belleville, l'administration a demandé en 1999, à EDF un diagnostic sur l'évolution, l'état et le fonctionnement morphologique et hydraulique de la Loire sur ce site.

L'objectif de ce stage est de compléter et d'actualiser l'étude de 2000 sur l'évolution morphologique autour de Belleville et de replacer ces évolutions locales dans un contexte régional.

Les travaux liés à la construction de la centrale (1979) ont provoqué une modification du tracé en plan au droit de la plate forme et un abaissement généralisé du profil en long. La réponse de la rivière à ces perturbations a été immédiate et très intense jusqu'à la moitié des années 1990. Les évolutions enregistrées se traduisent essentiellement par un fort comblement des zones surcreusées. Depuis, ces tendances ont nettement ralenti. En 2006, l'état d'avant travaux n'est pas encore atteint.

Il convient également de souligner une hausse de 20cm des niveaux de crue en amont de la zone d'étude.

L'étude régionale indique que le secteur de la centrale est une zone qui a connu des évolutions morphologiques très marquées depuis 1955. Toutefois, l'influence sur la période récente de l'évolution régionale sur celle du secteur de Belleville n'a pas pu être vérifiée.

Mots clés : Centrale nucléaire de Belleville, Loire, évolution morphologique, tracé en plan, profil en long, niveaux d'eau

Abstract

In order to renew the occupation of the River Public Area for the Belleville nuclear power station, in 1999 the French administration requested a local survey of the actual morphology of the river Loire, as well as its evolution and the characteristics of the flow.

The objective of this work is to complete and update the study on the morphological evolution around Belleville performed in 2000 and compare these local evolutions with the regional evolution.

It appears that, on Belleville sector, the construction work performed in 1979, caused a modification of the planform of the river in front of the power station and a general lowering of the river bed profile. The river response to these disturbances was immediate and very intense until the mid 1990's. These evolutions consisted mainly in a strong filling. Since, these trends have slowed significantly. In 2006, the state before construction work has not yet been reached.

It is also worth noticing an increase of 20cm of flood levels upstream from the study area.

The regional study shows that the power station sector is an area that has experienced very marked morphological changes since 1955. However, the influence of regional evolution on Belleville sector could not be verified for the recent period.

Key words : Nuclear power station of Belleville, Loire, morphological evolution, planform, river bed profile, water level

Introduction

Le développement économique de la seconde moitié du 20^{ème} a engendré une forte croissance des besoins énergétiques. Pour satisfaire cette demande, un parc de centrales nucléaires a été implanté sur l'ensemble du territoire français. C'est dans ce contexte qu'en 1979, la centrale nucléaire de Belleville (Cher, France) a été construite dans le lit majeur de la Loire.

En 1999, dans le cadre du renouvellement d'occupation du Domaine Public Fluvial de la centrale de Belleville, l'administration a demandé à EDF de réaliser un diagnostic morphologique, hydraulique et écologique du secteur de Belleville. L'objectif de ce travail était d'améliorer la compréhension des dynamiques morphologiques et hydrauliques sur le site, ainsi que de mettre en évidence les évolutions du lit depuis la construction de la centrale.

La présente étude vient compléter ce diagnostic. Le but est d'examiner l'évolution récente du lit de la Loire autour de la centrale de Belleville, et de replacer les évolutions locales enregistrées dans le cadre général à grande échelle et une sur longue période du lit de la rivière.

Ce rapport se découpe en plusieurs parties, dans lesquelles il sera présenté l'entreprise et le cadre général de l'étude, les matériels et les méthodes employés, l'évolution morphologique de la Loire sur le secteur de Belleville et l'évolution du lit à une échelle régionale.

Partie1 : Présentation de l'entreprise et cadre général de l'étude

1. Présentation de l'entreprise

1.1. Présentation du groupe EDF

Le groupe EDF est un des leaders de la production, la distribution et la commercialisation d'électricité en Europe. Il gère un parc de production d'une capacité de 130 GW. Il fournit énergies et services à 38 millions de clients dans le monde dont 27 millions en France, avec un ancrage territorial fort et un engagement dans les missions de service public.

Le groupe EDF est constitué d'Electricité de France (EDF) et d'un réseau de filiales européennes et de sociétés implantées dans le monde. EDF et les sociétés du Groupe exercent des activités centrées sur les métiers de l'énergie : production, négoce, transport, distribution, commercialisation et services.

1.2. Présentation du pôle recherche et développement

EDF R&D a pour missions principales de contribuer à l'amélioration des unités opérationnelles du Groupe EDF et d'identifier et de préparer les relais de croissance à moyen et long termes. EDF R&D se compose de 16 départements répartis sur quatre sites : Karlsruhe, Clamart, Renardières et Chatou. On retrouve parmi ces départements, le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.

1.3. Présentation du Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

Le LNHE regroupe les compétences d'EDF-Recherche et Développement dans le domaine de l'eau. Sa mission principale est d'apporter au groupe EDF une assistance technique à l'exploitation du parc des centrales hydrauliques, thermiques ou nucléaires. La réalisation de cette mission conduit à concevoir et mettre en œuvre des méthodes fondées sur des mesures in situ, des essais sur modèle physique et en laboratoire, le développement de codes de calcul pour modèles numériques.

Le LNHE compte une centaine de personnes réparties dans des groupes d'études, constitués pour une durée de trois ans. Actuellement, les cinq groupes du département sont :

- Le groupe « Modélisation des Apports Hydriques et Transferts Hydro-Sédimentaires »
- Le groupe « Modélisation multidimensionnelle et Approche Physique en Hydraulique Fluviale et Maritime »
- Le groupe « Qualité des eaux et Environnement »
- Le groupe « Evaluation des risques Environnementaux et Sanitaires »

C'est au sein du groupe « Modélisation des Apports Hydriques et Transferts Hydro-Sédimentaires », sous le tutorat de Jean-Pierre BOUCHARD que ce stage s'est déroulé du 1^{er} Avril au 15 Août 2008 sur le site d'EDF Chatou.

2. Cadre de l'étude

2.1. Contexte général

La Loire, comme l'ensemble des fleuves européens et nord-américains, a été façonnée par l'homme au cours des siècles. Son visage actuel s'est dessiné au gré des levées, des ouvrages de navigation (duits, épis, digues submersibles) et des extractions de granulats. Ces aménagements ont répondu avec plus ou moins de succès aux attentes et aux besoins des populations de l'époque : lutte contre les inondations, navigation, remblais pour les travaux publics.....

Le développement des besoins en énergie durant le 20^{ème} siècle n'a pas échappé à la règle. Il a inévitablement conduit les autorités à installer sur la Loire des barrages hydroélectriques tels que ceux de Naussac et de Villereest, et des centrales nucléaires à Belleville, Dampierre, Saint Laurent des Eaux et Chinon (Cf. Figure 1).

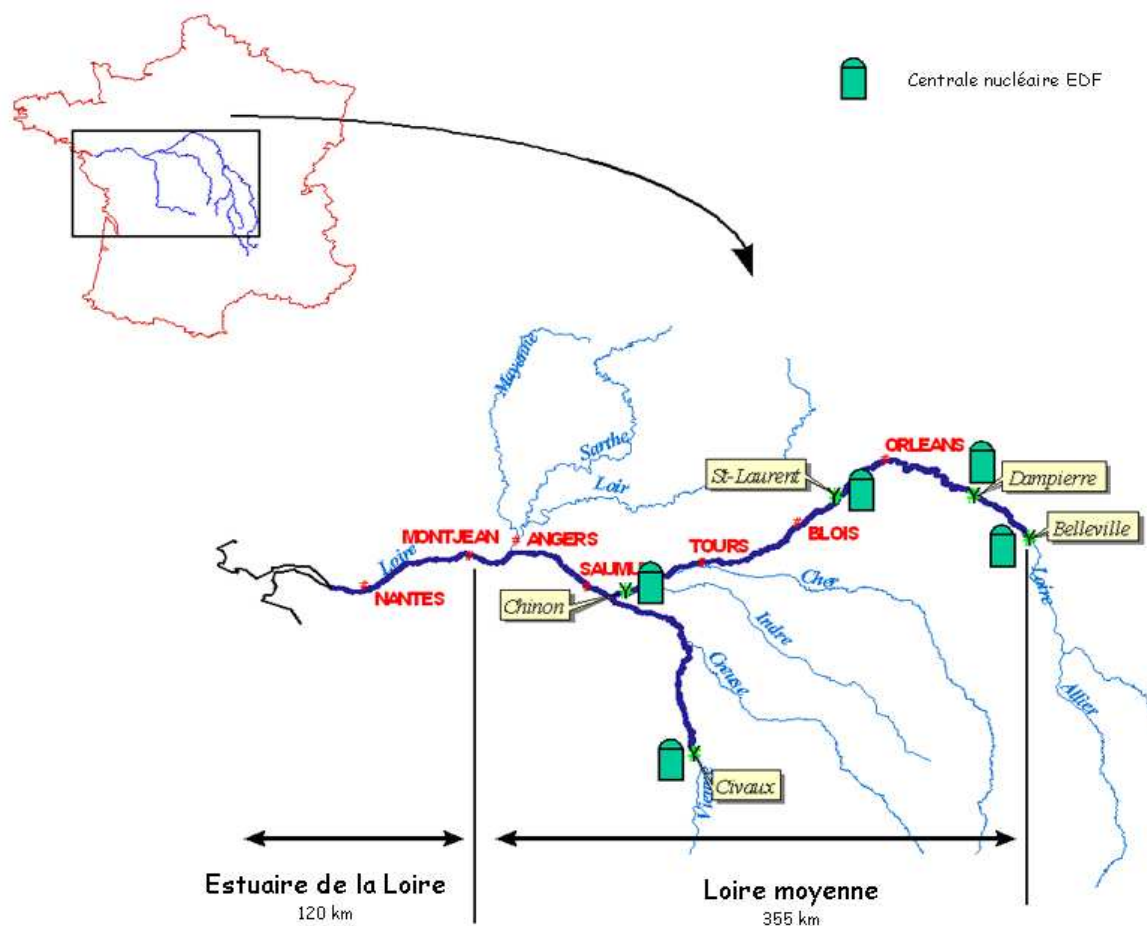


Figure 1: Localisation des centrales nucléaires sur la Loire
(Source : Besnard – Présentation EDF)

L'étude menée lors de ce stage s'intéresse à l'influence des travaux réalisés lors de la construction de la centrale nucléaire de Belleville sur l'évolution morphologique du lit de la Loire.

2.2. Présentation de la Loire

La Loire est le plus long fleuve de France avec un tracé d'environ 1012 km. Il prend sa source dans le Massif Central, dans le département de l'Ardèche, au Mont Gerbier de Joncs, à 1408m d'altitude. La Loire draine un bassin versant de 117 000km², ce qui représente 1/5 du territoire français.

Les affluents les plus importants (Cf. Figure 1) sont de l'amont vers l'aval, l'Allier, le Cher, l'Indre, la Vienne et la Maine.

Du point de vue de la morphologie fluviale, le secteur qui nous intéresse, c'est à dire le tronçon localisé entre le bec d'Allier et Briare, se caractérise par un style fluvial en anabranchement : « les îles végétalisées séparent les chenaux secondaires d'un chenal en tresse » (Nanson et Knighton, 1996, Rodrigues, 2004).

Les sédiments charriés sont majoritairement de nature cristalline. Leur composition se répartit essentiellement entre les sables grossiers et les graviers (Bertois, 1959, Babonaux, 1970, Brosse, 1982, Rodrigues, 2004).

2.3. Régime hydrologique

Avant de décrire les aménagements réalisés pour la centrale et le cadre réglementaire lié à l'étude, il est nécessaire de présenter les événements qui régissent les évolutions morphologiques du site. Il est établi que l'essentiel du transport solide se déroule durant les épisodes de forts débits. C'est pourquoi nous allons rapidement préciser le contexte hydrologique de la Loire à Belleville.

Les données présentées ici proviennent de la BanqueHydro et de la Division Technique Générale (DTG) d'EDF. Les débits ont été mesurés à Gien (station la plus proche, située à 29km en aval de Belleville) sur une période allant de 1936 à 2008.

2.3.1. Débits caractéristiques

Les valeurs du module et des débits des crues fréquentes sont les suivantes :

- module : 328m³/s ;
- crue biennale : 1600m³/s ;
- crue quinquennale : 2300m³/s ;
- crue décennale : 2700m³/s ;
- crue vicennale : 3100m³/s.

Le débit mensuel minimal annuel (QMNA) pour une période de 5 ans s'élève à 44m³/s.

2.3.2. Débits classés

La courbe des débits classés entre 1936 et 2008 est représentée ci-dessous :

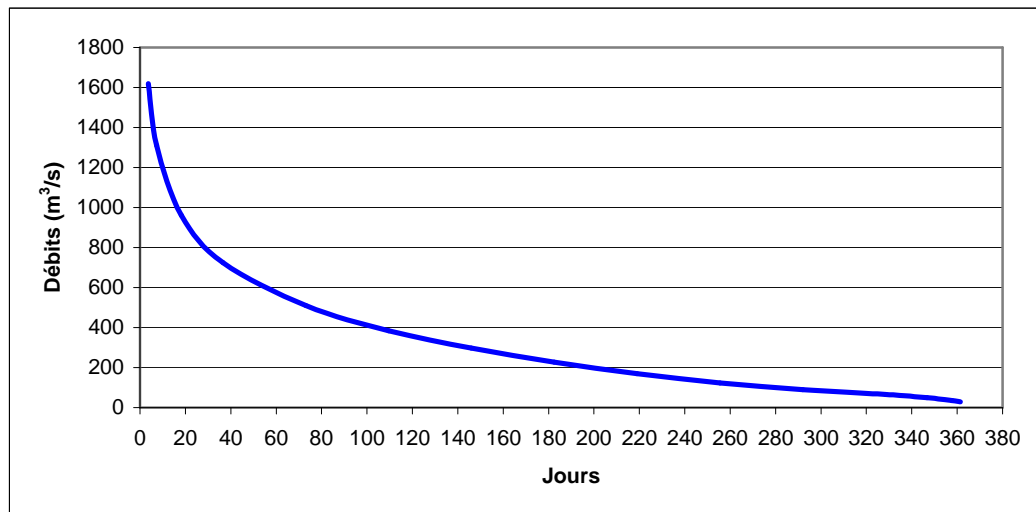


Figure 2 : Courbe des débits classés pour la station de Gien entre 1936 et 2008
(La courbe a été tracée à partir des données fournies par la BanqueHydro)

Cette figure permet de déterminer la durée annuelle de dépassement des débits forts. Ces durées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Durée moyenne annuelle de dépassement de quelques débits caractéristiques

Débit (m³/s)	500	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Durée moyenne de dépassement (j/an)	83	62	34	18,6	10,2	5,6	3,1	1,7	0,9

2.3.3. Caractéristiques hydrologiques de la période 1979-2008

Pour apprécier et comprendre correctement les modifications morphologiques du site, il peut être important de situer les caractéristiques hydrologiques de la période d'étude par rapport aux caractéristiques moyennes du régime du fleuve (Bouchard, Courivaud, 2000).

Ces caractéristiques hydrologiques peuvent être décrites à travers les débits moyens annuels. Si le débit moyen d'une année est supérieur au débit moyen calculé pour toute la période de suivi de la station de jaugeage, alors cette année a vu s'écouler des volumes d'eau plus importants qu'à la normale. Pour visualiser plus facilement l'écart entre le débit moyen de chaque année avec la moyenne de la période (soit 328m³/s pour 1936-2008), il a été décidé de tracer la courbe des écarts cumulés à la moyenne. Lorsque la courbe croît, nous sommes dans une période excédentaire du point de vu hydrologique (et inversement quand la courbe décroît).

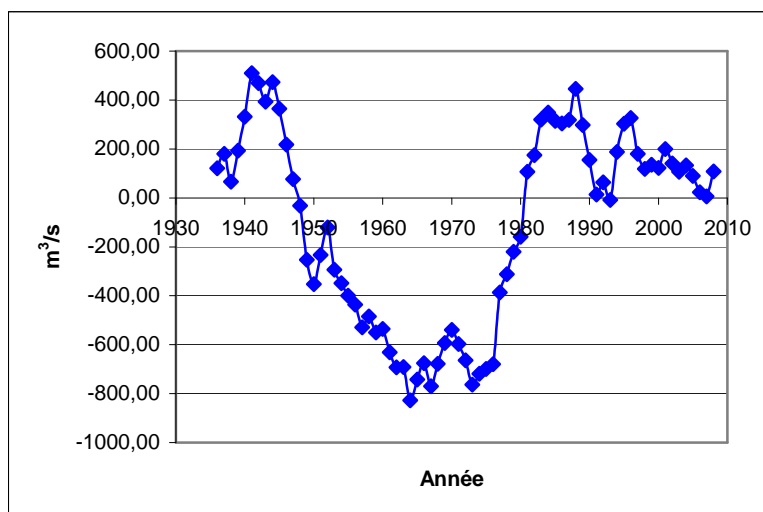


Figure 3 : Ecart à la moyenne cumulée des débits de 1936 à 2008

Cette figure illustre bien l'instabilité du régime de la Loire. Trois périodes peuvent être décrites : une période sèche de 1941 à 1964 (incluant l'étiage centennal de 1949), une période humide de 1973 à 1984 et une période hydrologiquement moyenne depuis 1984.

2.4. Localisation du site de l'étude

Le Centre Nucléaire de Production Electrique (CNPE) de Belleville est localisé en rive gauche de la Loire, au niveau de la commune de Belleville sur Loire (Cher) à une centaine de kilomètres à l'amont d'Orléans (Loiret). Le tronçon de Loire étudié se focalise sur une zone comprise entre Bonny sur Loire (Loiret) en aval et La Celle sur Loire (Nièvre) en amont (Cf. Figure 5). La pente du lit mineur est relativement élevée sur ce secteur, elle varie entre 0,50 et 0,53 ‰ (Ginestet, 1999).

2.5. Aménagements liés à la construction du CNPE

Le CNPE de Belleville a été construit en 1979. L'implantation de la centrale sur ce site a nécessité la mise en place de deux aménagements qui modifient les écoulements du fleuve : un seuil et une plate-forme.

Le seuil est destiné à assurer la fonctionnalité de la prise d'eau. Il mesure 377m de large, il se distingue par deux tronçons de cotes différentes : un tronçon de 283m en rive droite à 134m NGF et un tronçon de 94m en rive gauche à 133,67m NGF. Ce seuil concentre les écoulements en rive gauche, ce qui permet pendant l'étiage de maintenir devant la prise une quantité d'eau suffisante pour le refroidissement des réacteurs. Le seuil a, par la suite, été équipé de plusieurs passes à poissons et d'une écluse à bateaux.

La centrale étant implantée dans le lit majeur, elle a dû être construite sur une plate forme pour éviter les risques d'inondation. Pour compenser les pertes de débitance liées à l'obstruction du champ d'expansion des crues et pour ne pas rehausser les niveaux d'eau lors des forts débits, les maîtres d'ouvrage de l'époque ont étudié la possibilité de rescinder les îles et de creuser le lit. Ces mesures de compensation ont été mises en œuvre, et se sont essentiellement traduites par un dragage du lit en rive gauche, sur une bande de 100 à 150m de large, du lieu dit Les Chaumes Claires jusqu'au port de Neuvy sur Loire (Cf. Figure 4). Les matériaux

extraits ont servi à constituer la plate-forme. Les volumes prélevés entre 1979 et 1981 sont estimés à près de 3 850 000m³.

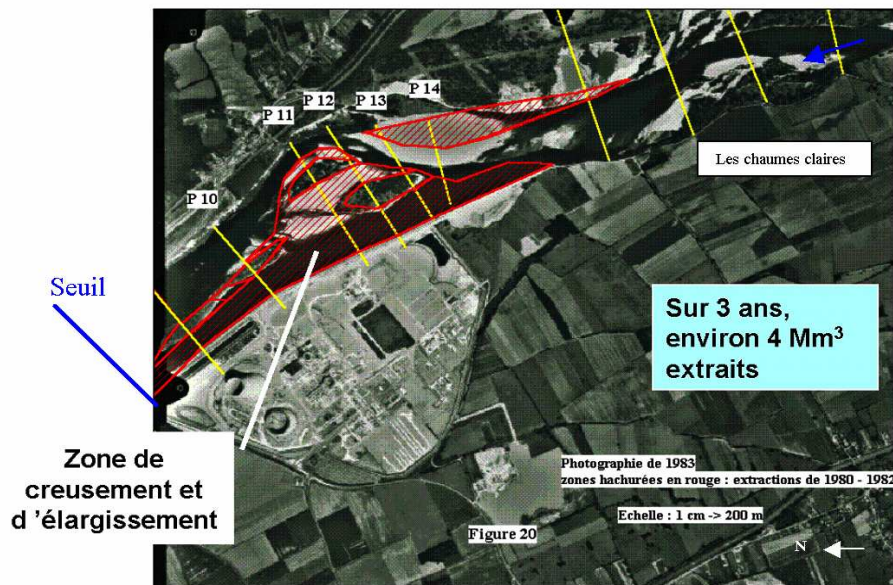


Figure 4: Localisation des extractions de sédiment au droit de la centrale de Belleville
(Source : Pons, 2000)

La flèche en bleu désigne le sens d'écoulement.

Dans le cadre de la procédure de renouvellement de l'autorisation d'occupation du Domaine Public Fluvial, la DDE de la Nièvre a demandé en 1999 à EDF un diagnostic morphologique, hydraulique, écologique ainsi qu'une étude de franchissement des passes à poissons et de l'écluse à bateaux. L'objectif de ces diagnostics est d'améliorer la compréhension des dynamiques morphologiques et hydrauliques de la zone influencée par le CNPE, et de définir par la même occasion des actions compensatoires visant à enrayer les dysfonctionnements relevés. Cette étude vise également à mettre en avant l'évolution locale du lit de la Loire, et à la replacer dans le contexte régional ligérien. Les résultats de ces travaux sont exposés dans les rapports du LNHE HP-73/00/020/A et HP-73/2000/044/A.

A l'issue de ce renouvellement d'autorisation, l'essartement des îles au droit de la centrale, réalisé régulièrement depuis la construction, a été arrêté. Le bras de liaison amont situé devant le CNPE et reliant le chenal rive gauche au chenal rive droite a été approfondi. Une nouvelle passe à poissons en enrochements a été mise en place en rive gauche à l'aval du seuil. Enfin pour satisfaire les usagers du port de Neuvy sur Loire, une modification du lit en rive droite accompagnée d'enrochements a été entreprise afin d'assurer un tirant d'eau quasi permanent devant le port.

2.6. Objectifs du stage

L'objectif de ce stage est de compléter et d'actualiser l'étude de 2000 sur l'évolution morphologique de la zone autour de la centrale de Belleville, et de tenter d'apprécier l'influence de l'évolution régionale sur l'évolution locale.

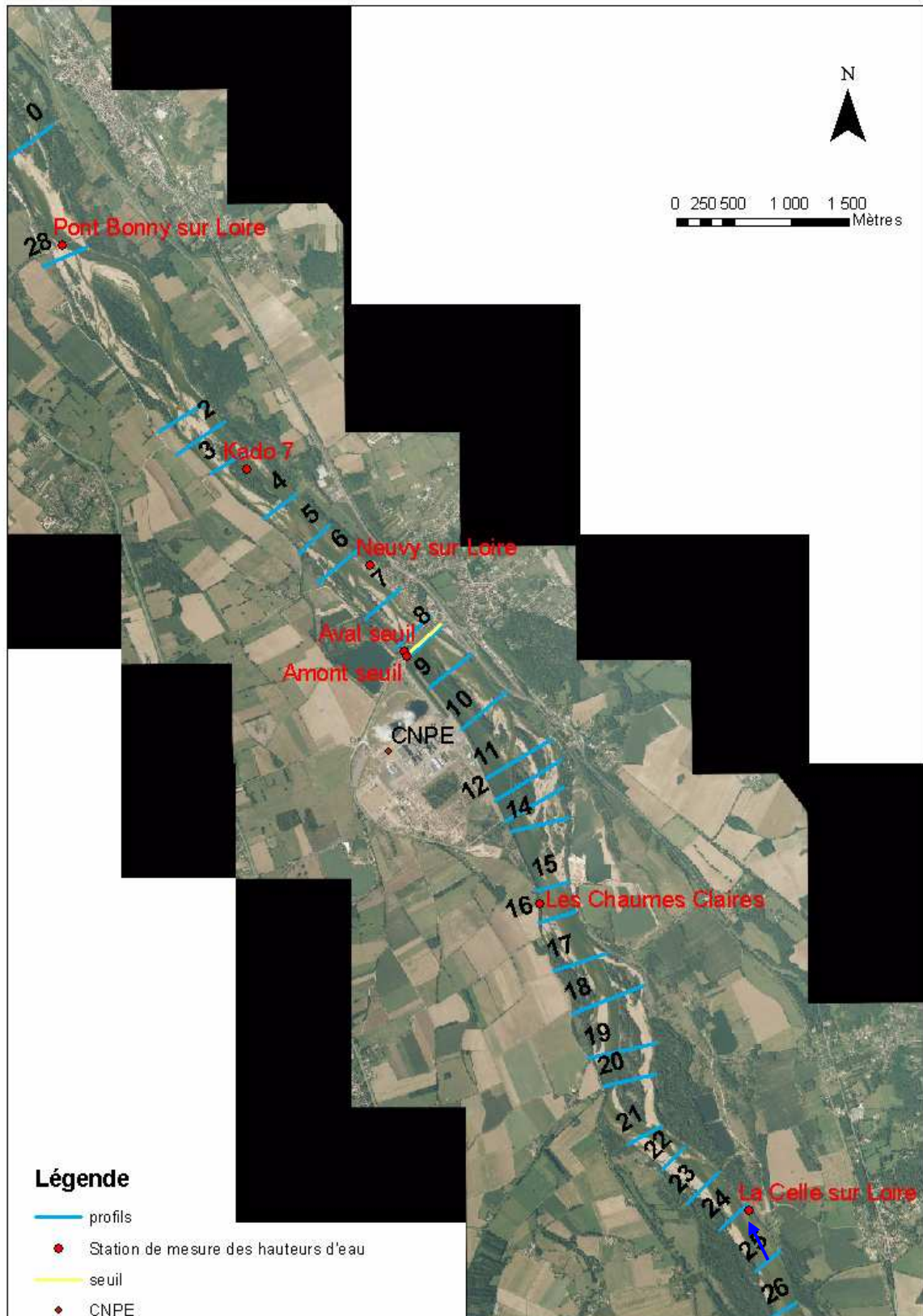


Figure 5 : Localisation des profils bathymétriques et des stations de mesure des hauteurs d'eau
La flèche en bleu désigne le sens d'écoulement.

Partie 2 : Matériels et méthodes

Cette partie a pour but de répertorier les données qui ont servi de base à ce travail et de présenter la manière dont elles ont été exploitées pour mettre en avant les évolutions morphologiques.

Pour répondre à la problématique de cette étude, deux échelles ont été définies : une locale sur le secteur autour de Belleville (Cf. Figure 5) et une régionale sur un tronçon de Loire de 80km centré sur la centrale.

1. Bathymétrie

1.1. Recueil des données

Les données disponibles ne permettent de suivre la bathymétrie qu'à l'échelle locale.

En effet, les données utilisées pour cette étude proviennent des levés bathymétriques réalisés dans le cadre du protocole de surveillance des mesures compensatoires sur le site de Belleville (Cf. partie 1, §2.5). Ces données ont été fournies par deux services d'EDF : le Centre National d'Equipement de Production Electrique (CNEPE) et la DTG.

Lors de chaque campagne bathymétrique 31 profils sont relevés. Les profils 0 à 26 sont localisés sur la Figure 5. Il faut préciser que nous n'avons pas pu récupérer les données du profil 28 (situé entre les profils 0 et 1) ainsi que celles des profils 101, 102 et 103 (situés en aval du profil 0).

Pour cette étude, nous avons eu à notre disposition les campagnes de 1977, 1982, 1984, 1985, 1986, 1988, 1990, 1993, 1994, 1996, 1998, 2002, 2004 et 2006. Pour compléter ces données, nous avons également eu accès à des relevés de 1978, 1980, 1985 et 1993. Toutefois, ces derniers sont incomplets et ne concernent qu'une partie des profils présentés sur la Figure 5.

1.2. Traitement des données

1.2.1. Outils bathymétriques

Depuis l'étude de 2000, le LNHE a développé de nouveaux programmes facilitant l'analyse des suivis bathymétriques. Même si ces outils sont destinés à la surveillance des fonds des retenues de barrage, il nous a paru judicieux de les utiliser dans le cadre de ce stage.

Les outils bathymétriques se présentent sous la forme de macros excel. Il en existe 5 qui s'appliquent dans l'ordre suivant:

- **Projection2Dvers1D**, cette macro projète sur un axe déterminé les profils fournis avec des coordonnées tridimensionnelles (X, Y, Z) afin d'obtenir des profils en deux dimensions (X, Z). Les coordonnées obtenues sont celles utilisées dans les macros suivantes ;
- **RecalageProfils**, cet outil déforme les profils afin de corriger les erreurs de saisie et les décalages entre profils ;

- **CompleteProfils**, ce programme permet d'ajouter ou de supprimer des points. Il est utile lorsqu'un relevé bathymétrique n'a pas été complété par un levé topographique ou bien quand des relevés présentent des points aberrants ;
- **VisuProfils**, ce classeur sert à visualiser les profils en travers ainsi qu'à calculer et afficher le profil en long. VisuProfils peut s'avérer particulièrement pratique pour observer graphiquement des évolutions morphologiques du type chenalisation ;
- **EvolutionComblement**, cet outil calcule des bilans d'évolution sédimentaire soit entre profils en travers, soit pour l'ensemble d'un bief. Ces bilans sont déterminés soit par évolution des surfaces mouillées, soit par évolution des surfaces sédimentaires.

Pour plus de précision sur ces outils, l'intéressé pourra se référer à la notice d'utilisation de Bertier (2007).

Tous les profils disponibles depuis la campagne bathymétrique de 1977 ont été traités avec ces classeurs.

1.2.2. Taux de sédimentation et intensité de sédimentation

Pour compléter les résultats fournis par les outils bathymétriques et affiner la description des phénomènes sédimentologiques, nous nous sommes appuyés sur deux indicateurs : un taux de sédimentation et une intensité de sédimentation.

Le taux de sédimentation (Ts) représente le volume moyen de sédiment déposé et/ou érodé par an, intégré sur un bief de longueur donnée. Ce paramètre s'exprime en m^3/an .

L'intensité de sédimentation (Is) traduit le volume moyen de sédiment déposé et/ou érodé par an et par unité de longueur de rivière. Cette intensité s'exprime en $\text{m}^3/\text{an}/\text{m}$.

2. Analyse des photographies aériennes

2.1. Données utilisées

L'analyse des paramètres cités ci-dessus a été réalisée à partir des photographies aériennes de 1955-1957, 1971, 1983, 1998, 2002 et 2005.

La première série regroupe deux années car la Loire en aval de Neuvy sur Loire a été photographiée en 1955 tandis que la partie en amont a été prise en 1957.

L'étude locale s'appuie sur toutes les campagnes afin d'avoir un suivi de l'évolution du secteur sur de faibles pas de temps. A noter que les séries des photographies de 1971 et 1983 ne sont pas complètes. Pour ces deux séries, la zone étudiée est comprise entre les profils bathymétriques (Cf. Figure 5) :

- 28 et 24 pour 1971 ;
- 28 et 11 pour 1983.

Le secteur visible sur les autres prises de vue s'étend de Myennes à Bonny sur Loire.

Ne pouvant pas utiliser les photographies de 1971 et 1983 pour l'étude régionale, nous n'avons traité que les photographies de 1955-1957 et 1998. Les photographies de 2002 et 2005 n'ont pas été utilisées car l'étude détaillée des évolutions récentes à l'échelle régionale n'entrait pas dans le cadre de cette étude.

Le secteur analysé est compris entre la Charité sur Loire et Lions en Sullias.

Les dates exactes des prises de vue ne sont connues que pour 1998. Les photos ont été faites le 7 août 1998. Le débit de la Loire à Gien, était de $78\text{m}^3/\text{s}$.

2.2. Traitement des photographies

2.2.1. Analyse du tracé en plan

Ce travail consiste à digitaliser pour chaque série de photos aériennes, les contours des surfaces immergées telles que les berges, les bancs de sables et les îles. Le logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) utilisé ici est ArcGIS Version 9.1.

L'analyse de l'évolution du tracé en plan se fait en superposant et en comparant deux à deux les couches digitalisées de campagnes successives.

2.2.2. Analyse de la largeur de la bande active

Le travail passe ici par la mesure de la largeur de la bande active sur chaque série de photographie. La bande active se définit comme « la partie du lit en eau pour les débits compris entre le module et la crue de pleins bords et constituée de bancs alluviaux peu ou pas végétalisés, remaniés et rajeunis par des événements hydrologiques de fréquence moyenne à forte » (Malavoi et Souchon, 1996).

Afin de comparer les résultats entre eux et de suivre l'évolution de la bande active, celle-ci est toujours mesurée sur les mêmes profils.

Pour décrire plus finement l'évolution de la bande active à l'échelle locale, les profils ont été concentrés sur les secteurs présentant des variations de la bande active importantes. La localisation des profils est consultable en Annexe 1.

Pour l'étude régionale, les profils ont été disposés tous les 500m.

2.2.3. Analyse de la largeur de l'enveloppe hydraulique

L'enveloppe hydraulique selon Ginestet (1999) est la partie du cours d'eau englobant les îles (végétalisées) et la bande active. Nous considérerons l'enveloppe hydraulique comme égale au lit mineur.

L'enveloppe hydraulique a été mesurée sur les mêmes profils que ceux de la bande active.

2.2.4. Nombre moyen de chenaux

Le nombre de chenaux a été comptabilisé sur les mêmes transects que ceux de la bande active. A été compté comme chenal toute partie du lit mineur en eau ou pas séparée par un massif végétal arborescent (Cf. Figure6).

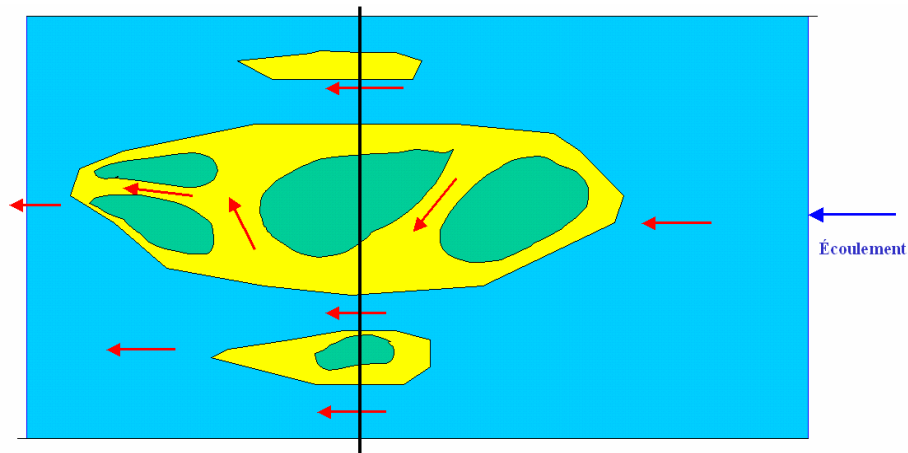


Figure 6 : Présentation de la méthode de comptabilisation des chenaux

Les îles sont représentées en jaune, les massifs boisés en vert et une flèche rouge est localisée sur chaque chenal. Sur le profil (ici le trait en noir), nous pouvons comptabiliser trois chenaux.

2.2.5. Indice de tressage

L'indice de tressage est un indicateur morphométrique des rivières en tresses. Il se définit selon J-L Peiry (1989) comme la somme des longueurs de chaque segment mesuré parallèlement à l'axe de la bande active de tressage, divisée par l'unité de longueur de référence de telle façon que : $I_t = (d_1 + d_2 + \dots + d_n) / d$.

Toutefois, une erreur sur la définition de cet indice, nous a conduit à le définir comme la somme des longueurs de chaque chenal, divisée par la longueur du chenal principal (Figure 7).

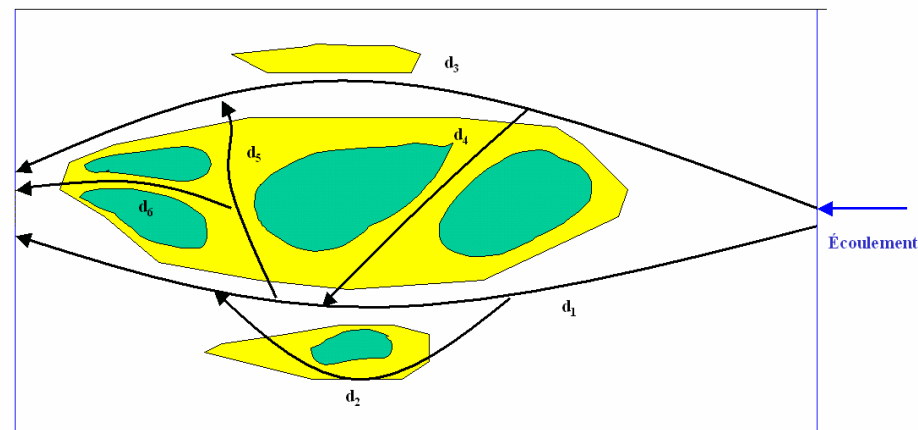


Figure 7 : Calcul de l'indice de tressage

Ici $I_t = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6) / d_1$ avec d_1 la longueur du chenal principal

L'indice de tressage et le nombre de chenaux sont deux indicateurs reflétant le nombre d'îles et leurs degrés de végétalisation. Nous avons mesuré ces deux paramètres car selon les cas, ils peuvent suivre des évolutions différentes, ce qui permet de mettre en évidence certaines particularités de l'évolution morphologique.

2.2.6. Paramètres mesurés sur chaque étude

Pour l'étude locale, les paramètres suivis sont le tracé en plan et la largeur de la bande active.

Pour l'étude régionale, les paramètres relevés sont le tracé en plan, la largeur de la bande active, la largeur de l'enveloppe hydraulique, le nombre de chenaux et l'indice de tressage.

3. Niveaux d'eau

Selon l'échelle des études, les méthodes employées sont différentes.

3.1. Etude locale

3.1.1. Recueil des données

Les niveaux d'eau sont relevés sur des échelles placées de part et d'autre du seuil. Les mires sont localisées sur la Figure 5. Les cotes ont été fournies par EDF. Les données disponibles pour chaque échelle sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Présentation des données disponibles sur les stations de mesures de hauteur d'eau autour de Belleville

Nom des échelles	Période de mesure	Pk (km)	Distance par rapport au seuil de la centrale (km)
Myennes	1977-2007	219,95	9,75
La Celle sur Loire	1977-1982 ; 1984-2004 ; 2007	223,6	6,1
Les Chaumes Claires	1989-2007	226,95	2,75
Amont seuil	1981-2007	229,7	0
Aval seuil	1981-2007	229,7	0
Neuvy sur Loire	1977-2007	230,3	0,6
Kado 7	1981-2007	231,45	1,75
Pont de Bonny	1981-2007	234,3	4,6
Les Loups	1981-2007	238,3	8,6

(Source : Pons, 2000)

Les niveaux sont relevés sur les périodes indiquées avec plus ou moins d'interruptions. Dans l'ensemble, le suivi est au moins hebdomadaire dans les périodes d'étiage ; il est journalier ou même pluri-journalier au moment des crues (Bouchard et Courivaud, 2000).

La méthode retenue pour étudier l'évolution des niveaux d'eau consiste à associer pour chaque station, les hauteurs d'eau mesurées avec leurs débits correspondants. Les courbes annuelles hauteur-débit obtenues permettent d'observer la variabilité temporelle de la relation hauteur-débit, qui est elle-même révélatrice de l'évolution morphologique du lit.

Les débits proviennent de la station de jaugeage de Gien, localisée à 29km en aval de Belleville. Les chroniques de débits disponibles s'étendent de 1936 à 2008, ce qui permet de couvrir les périodes d'avant et d'après construction. Les débits utilisés sont les débits journaliers. Ces données nous ont été fournies par la DTG.

3.1.2. Traitement des données

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe 3.1.1, la première méthode retenue consiste à établir pour chaque station et pour chaque année, la relation hauteur-débit. La comparaison, pour chaque station, des nuages de points entre eux permet de mettre en évidence leurs glissements au cours du temps (Cf. Figure 8).

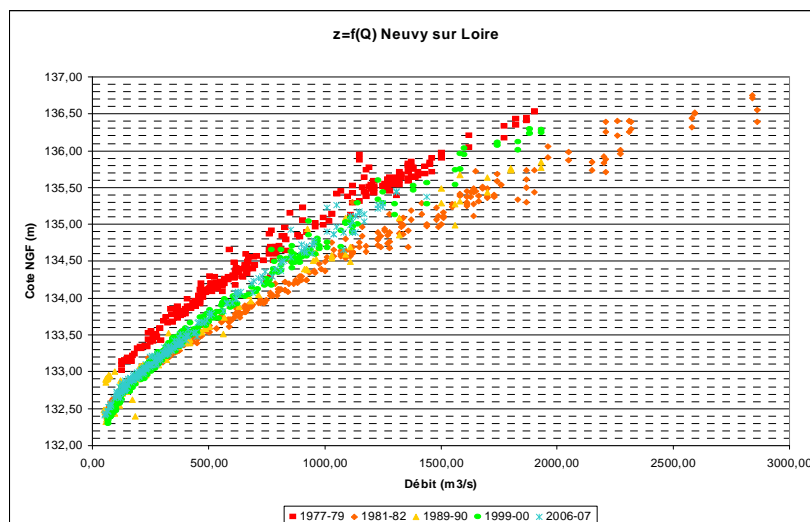


Figure 8 : Evolution des relations hauteurs-débits entre 1977 et 2007

Dans un souci de meilleure représentativité des phénomènes et pour illustrer au mieux les résultats qu'offrent cette méthode, les données présentées dans cet exemple ne sont pas annuelles mais biannuelles.

L'observation de la figure précédente laisse apparaître certaines limites. La première concerne la variabilité des débits. En effet, les événements hydrologiques extrêmes de chaque année sont très variables. Les gammes de débits relevées sont donc très variables. Comparer l'évolution des niveaux pour des valeurs extrêmes de débits est parfois difficile (cette remarque concerne aussi bien les étiages que les crues). La dispersion des hauteurs d'eau constitue également un frein à l'utilisation de ce type de représentation graphique, car pour un même débit il est fréquent d'obtenir plusieurs cotes. Ces écarts peuvent même atteindre plusieurs dizaines de centimètres pour de forts débits. Cette étendue des cotes risque d'occulter les faibles variations de niveau. Il faut cependant souligner que ce type de graphique reste un excellent moyen pour dégager les grandes tendances d'évolution des niveaux d'eau.

Au vu des remarques énoncées dans le paragraphe précédent, il a été décidé d'opter pour un autre type de représentation. Pour lisser la dispersion des mesures, nous avons calé pour chaque nuage de point, une courbe de tendance par la méthode des moindres carrés. La représentativité de ces courbes permet d'associer un débit à une seule cote. Par la suite, nous avons tracé pour chaque station l'évolution des niveaux d'eau au cours du temps à débit constant (Cf. figure ci dessous). Les débits retenus sont : $100\text{m}^3/\text{s}$ pour l'étiage, $350\text{m}^3/\text{s}$ pour le module, $1000\text{m}^3/\text{s}$ qui correspond à débit dépassé 18,6 jours par an et $1800\text{m}^3/\text{s}$ qui correspond à un débit dépassé 1,7 jours par an (Cf. Tableau 1).

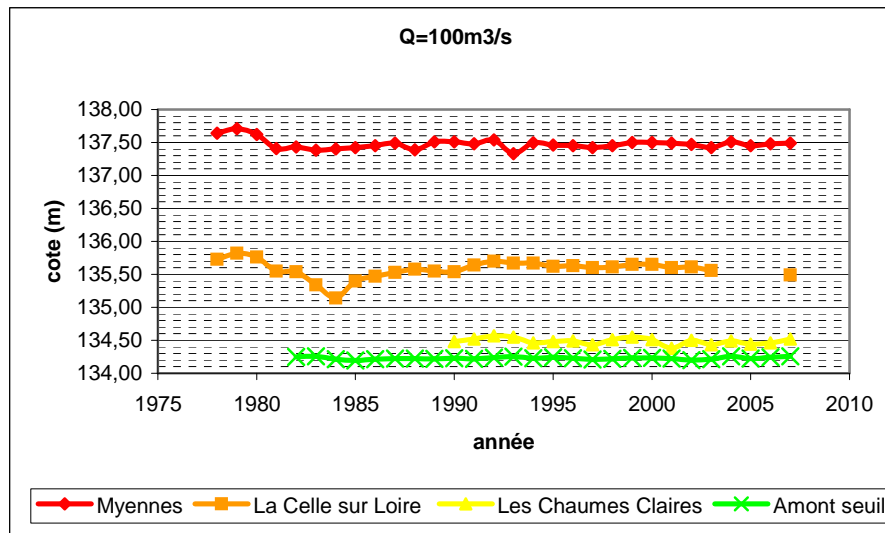


Figure 9 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour $Q=100\text{m}^3/\text{s}$

La Figure 9 montre un exemple des évolutions de niveau dans le temps pour quelques stations. L'ensemble des courbes obtenues sera discuté dans la partie suivante.

Remarque :

Pour ajuster au mieux les courbes de tendance, trois courbes ont été dégagées pour chaque nuage de points, une pour les débits inférieurs à $500\text{m}^3/\text{s}$, une pour les débits compris entre $500\text{m}^3/\text{s}$ et $1200\text{m}^3/\text{s}$ et une autre pour les débits supérieurs à $1200\text{m}^3/\text{s}$.

En raison du faible nombre de mesures à forts débits, les cotes obtenues pour des débits supérieurs à $2000\text{m}^3/\text{s}$ ne peuvent être utilisées que dans le cadre d'une description qualitative et non plus quantitative des phénomènes.

3.2. Etude régionale

Dans cette partie, l'étude des niveaux d'eau concerne uniquement l'évolution des lignes d'eau d'étiages.

Traditionnellement, l'étude des lignes d'étiages est réalisée en comparant à chaque échelle des hauteurs d'eau mesurées à des débits identiques. Toutes les données ne peuvent donc pas être exploitées. Pour résoudre ce problème, deux méthodes ont été mises en place.

3.2.1. Méthode des gradients

La méthode des gradients cherche à compenser les variations de niveau dues aux variations de débit lors de la mesure, de façon à se ramener à un niveau pour un débit de référence unique.

Toutefois, à la vue des données disponibles, cette méthode n'est actuellement pas applicable car elle introduit davantage d'erreur qu'elle n'en supprime.

Pour plus de précision sur le travail effectué sur la méthode des gradients (principe, validité et application), l'intéressé pourra se référer à l'Annexe 2.

3.2.2. Méthode d'analyse de niveaux d'eau sans modification des hauteurs

1) Principes

L'objectif de cette méthode est de pouvoir comparer les hauteurs sans les projeter vers un débit de référence.

Cette méthode est fondée sur le fait que la majorité des relevés de niveau d'eau d'étiage sont réalisés à des débits voisins. Sachant cela et en supposant que la pente des courbes de tarage ne varie pas dans le temps, la comparaison des hauteurs d'eau prises à des débits proches doit pouvoir donner une idée de l'évolution des lignes d'eau.

2) Données utilisées

2)a. Les niveaux d'eau

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont les lignes d'eau d'étiages collectées par les services de la DIREN Centre.

Nous disposons pour chaque année depuis 1986, où un étiage a eu lieu (débit inférieur à $100\text{m}^3/\text{s}$ à Gien), de relevés de la hauteur d'eau, sur plus de deux cent échelles réparties sur la Loire moyenne.

Nous désignerons dans la suite de ce rapport par le terme d'échelle, les stations de mesure de hauteur d'eau afin d'éviter tout amalgame avec les stations de jaugeage.

2)b. Les débits

Plusieurs stations de jaugeage sont implantées en Loire moyenne.

Pour cette étude, nous avons récolté les débits journaliers de 1986 à 2006 calculés aux stations de jaugeage de Cours les Barres, St Satur, Belleville, Gien et Dampierre.

Il y a donc peu de stations de jaugeage par rapport au nombre d'échelles. Comment attribuer un débit à chaque échelle ?

Méthode de reconstitution des débits de la DIREN Centre

Pour calculer les débits aux échelles, la DIREN Centre (Foutoyet, 2001) a mis en place une approche en se basant sur les temps de propagation des débits d'amont en aval. Les temps de propagation sont déterminés en essayant d'identifier la propagation d'évènements entre deux hydrogrammes sur deux stations consécutives (Cf. Figure 10).

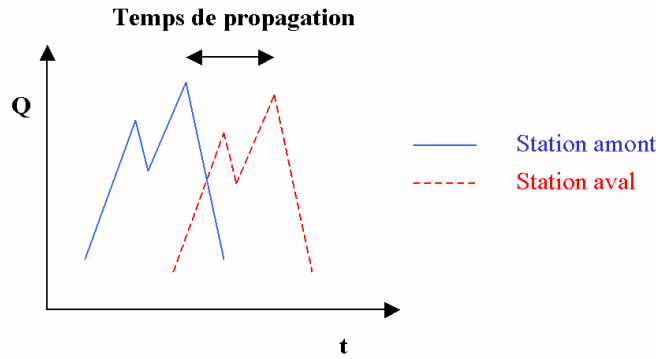


Figure 10 : Méthode de détermination du temps de propagation
(Source : Foutoyet, 2001)

Pour l'application de cette méthode de reconstitution des débits, trois cas ont été envisagés :

- Cas 1 : une station de jaugeage est localisée en amont de l'échelle

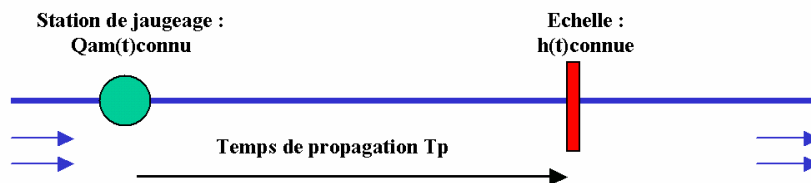


Figure 11 : Méthode de reconstitution des débits de la DIREN Centre dans le cas d'une station de jaugeage en amont de l'échelle
(Source : Foutoyet, 2001)

Le débit de l'échelle à l'instant T est calculé de la manière suivante :

$$Q_{\text{échelle}}(T) = Q_{\text{amnt}}(T - Tp)$$

- Cas 2 : une station de jaugeage est localisée en aval de l'échelle

Le débit de l'échelle à l'instant T est calculé de la manière suivante :

$$Q_{\text{échelle}}(T) = Q_{\text{aval}}(T + Tp)$$

- Cas 3 : l'échelle est localisée entre deux stations de jaugeage

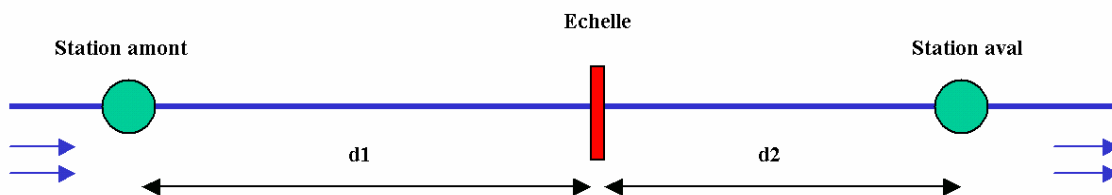


Figure 12 : Méthode de reconstitution des débits de la DIREN Centre dans le cas d'une échelle localisée entre deux stations de jaugeage
(Source : Foutoyet, 2001)

Soit $Q1(T)$ le débit obtenu par la formule du cas 1.

Soit $Q2(T)$ le débit obtenu par la formule du cas 2.

Le débit de l'échelle à l'instant T est calculé de la manière suivante :

$$Q_{\text{échelle}}(T) = \frac{d1}{d1 + d2} \cdot Q2(T) + \frac{d2}{d1 + d2} \cdot Q1(T) \quad \text{Avec } d1 \text{ la distance entre la station amont et l'échelle, et } d2 \text{ la distance entre la station aval et l'échelle.}$$

Les débits utilisés ici pour les lignes d'eau ultérieures à 1994 sont des débits horaires. Les débits reconstitués par cette méthode durant l'étude de Foutoyet, sont fournis avec les relevés des lignes d'eau d'étiage de la DIREN Centre. Toutefois aucun débit n'a été calculé depuis 2000.

L'objectif de notre étude étant de suivre l'évolution des niveaux d'eau sur la plus longue période possible (c'est à dire de 1986 à 2006), il nous faut calculer les débits depuis 2000. Ne disposant pas du programme mis au point par la DIREN et par souci de travailler avec des débits homogènes (c'est à dire issus d'une même méthodologie), nous avons décidé de mettre au point notre propre méthode de reconstitution des débits.

Méthode de reconstitution des débits appliquée durant cette étude

Cette méthode s'inspire de celle de la DIREN Centre. Elle est aussi basée sur le temps de propagation des débits, à la différence qu'ici nous travaillons avec une seule station de jaugeage et avec des débits journaliers.

Les débits journaliers sont utilisés car nous n'avons tout simplement pas pu récolter les débits horaires.

Le choix d'une seule station de jaugeage se justifie par le fait que la mesure des débits est soumise à des incertitudes (environ 10% d'après Foutoyet). Travailler avec les débits d'une seule station ne permet pas en soi d'éliminer les erreurs de mesure et les erreurs dues à leurs interpolations et leurs extrapolations. Par contre, cela permet de gommer leurs effets sur l'évolution des niveaux d'eau en introduisant toujours les mêmes erreurs sur chaque échelle. Le choix de la station de jaugeage s'est porté sur celle de Gien, station réputée pour sa fiabilité (Bouchard, commentaire personnel, Foutoyet, 2001).

- **Vitesse et temps de propagation**

Le temps de propagation des débits lors des étiages de 1986 à 2006 a été mesuré entre Gien et les autres stations (c'est à dire Cours les Barres, St Satur, Belleville et Dampierre). La vitesse moyenne de propagation des débits mesurée est de 1,10m/s. Ce résultat est acceptable car il est du même ordre de grandeur que la vitesse évaluée par Foutoyet (0,89m/s) et que la vitesse du courant en Loire communément estimée autour de 1m/s.

A partir de ce résultat, nous avons calculé le temps de propagation pour chaque échelle à partir de la formule suivante :

$$\text{Temps de propagation (en } j) = \text{distance}_{\text{Échelle-Gien}} \text{ (en km)} \div \text{vitesse de propagation (en km/j)}$$

- **Calcul du débit**

Le temps maximal de propagation étant de 1 jour (entre Cours les barres et Gien), 5 cas ont été définis pour estimer les débits aux différentes échelles :

- Si le temps propagation est supérieur à 0,5j et que l'échelle est en amont de Gien :

$$Q_{\text{échelle}}(j) = Q_{\text{Gien}}(j+1) ;$$

- Si le temps propagation est supérieur à 0,5j et que l'échelle est en aval de Gien :

$$Q_{\text{échelle}}(j) = Q_{\text{Gien}}(j-1) ;$$

- Si le temps de propagation est inférieur à 0,5j :

$$Q_{\text{échelle}}(j) = Q_{\text{Gien}}(j) ;$$

- Si le temps de propagation est égal à 0,5j et que l'échelle est en amont de Gien :

$$Q_{\text{échelle}}(j) = 1/2(Q_{\text{Gien}}(j) + Q_{\text{Gien}}(j+1)) ;$$
- Si le temps de propagation est égal à 0,5j et que l'échelle est en aval de Gien :

$$Q_{\text{échelle}}(j) = 1/2(Q_{\text{Gien}}(j-1) + Q_{\text{Gien}}(j)).$$

Comparaison des méthodes de reconstitution des débits

Pour valider les résultats de notre méthode, nous avons représenté les débits reconstitués par notre méthode (Q_{stage}) et par Foutoyet (Q_{DIREN}) en fonction des débits mesurés sur les stations de jaugeage (Q_{station}) (Cf. figures suivantes).

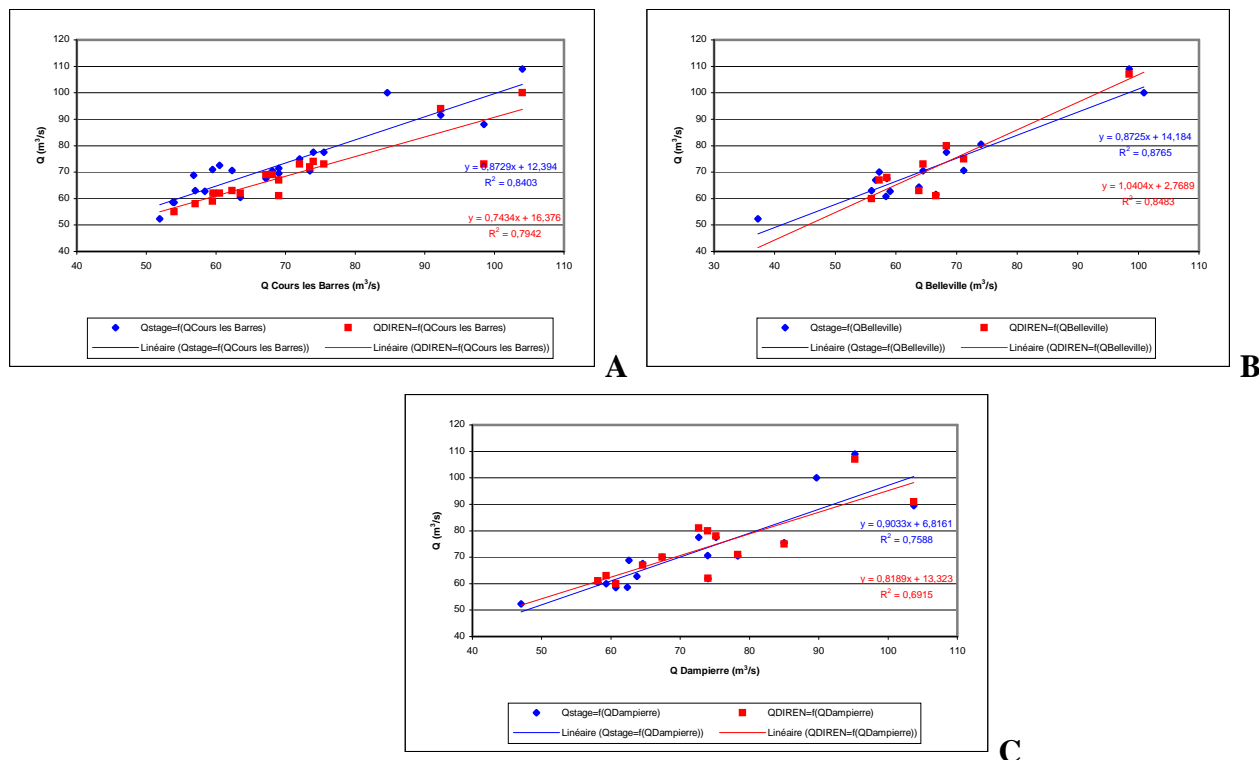


Figure 13 : Comparaison des méthodes d'estimation des débits

La Figure A représente les débits à Cours les Barres, la Figure B à Belleville et la Figure C à Dampierre.

L'analyse des figures précédentes met en évidence des corrélations relativement bonnes entre les débits obtenus par notre méthode et les débits mesurés par jaugeage. Ces constats nous permettent de valider notre méthodologie.

Pour éviter toute ambiguïté sur la provenance des valeurs de débit, nous garderons dans la suite du rapport les notations Q_{stage} , Q_{station} et Q_{DIREN} .

3) Application de la méthode sans modification des hauteurs d'eau

Nous proposons ici de ne garder que les débits inclus dans un intervalle de 10% autour de la médiane des débits mesurés lors des relevés de niveau d'eau. Pour l'étude régionale l'intervalle de débit sera le suivant : $[64 ; 74\text{m}^3/\text{s}]$.

Du fait que les débits retenus fluctuent d'environ 10%, une barre d'incertitude est associée aux niveaux. Cette dernière a été définie à partir de la pente moyenne des courbes de tarage de 1981 à 2006 aux échelles de Belleville (Cf. partie 2, §3.1). La pente moyenne entre toutes ces stations s'élève à $0,0046\text{s.m}^{-2}$. Nous supposons que cette pente moyenne des courbes de tarage est valable pour toutes les échelles étudiées. L'écart maximum entre les débits retenus dans cette méthode étant de $10\text{m}^3/\text{s}$, nous considérerons que l'intervalle d'incertitude autour des cotes relevées sera de + et -5cm.

3.2.3. Validité de la méthode d'analyse des lignes d'eau d'étiages sans modification des hauteurs d'eau

Avant d'appliquer la méthode sans modification des hauteurs, nous avons d'abord cherché à vérifier la validité de ses résultats.

L'application de cette méthode aux échelles du secteur de Belleville (Myennes, Neuvy sur Loire, Kado7, Pont Bonny et Les Loups) donne des résultats tout à fait corrects. Les évolutions des niveaux d'étiages sont relativement bien représentées (Cf. Figure 14).

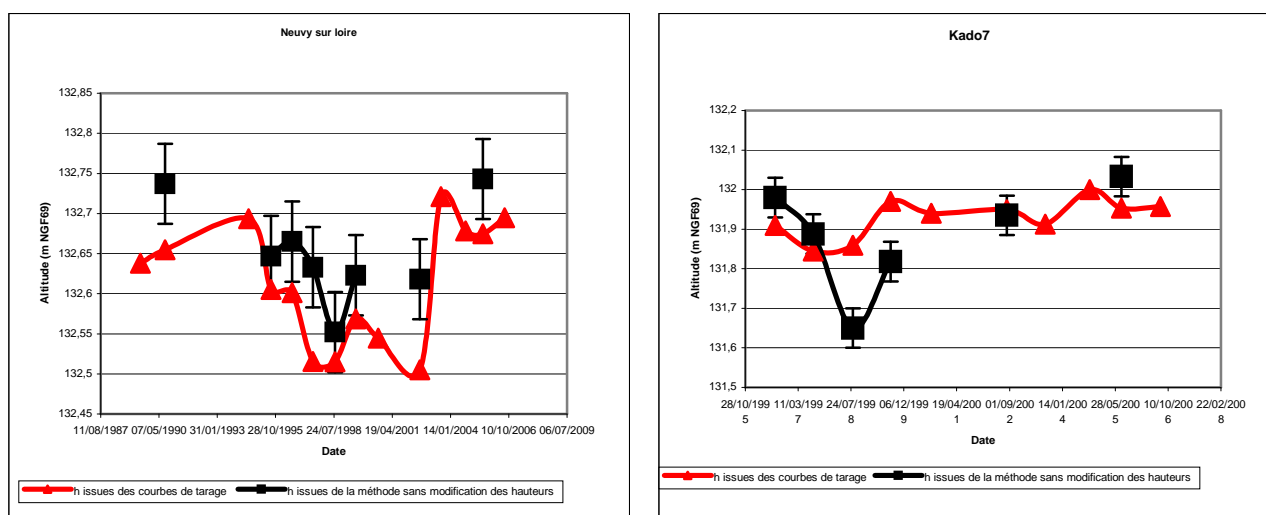


Figure 14: Représentation de l'évolution des niveaux d'eau à Neuvy sur Loire et Kado7 à partir des hauteurs d'eau issues des courbes de tarage à $69\text{m}^3/\text{s}$ et à partir de la méthode sans modification des hauteurs

Les graphiques ci-dessus montrent qu'une partie des relevés ne sont plus exploitables après la sélection des débits. La base de donnée s'en trouve donc appauvrie. Toutefois, cette méthode permet de comparer plus de relevés que si nous regardions seulement les mesures faites à des débits identiques.

Cette méthode ne met pas l'utilisateur à l'abri des erreurs de mesure sur les hauteurs d'eau. Ces erreurs peuvent fausser les résultats en laissant apparaître des évolutions qui n'ont pas eu lieu. Ce cas est représenté au point 2005 de la Figure 15, où avec cette méthode, une diminution des cotes est observable alors qu'elles semblent se stabiliser durant la période.

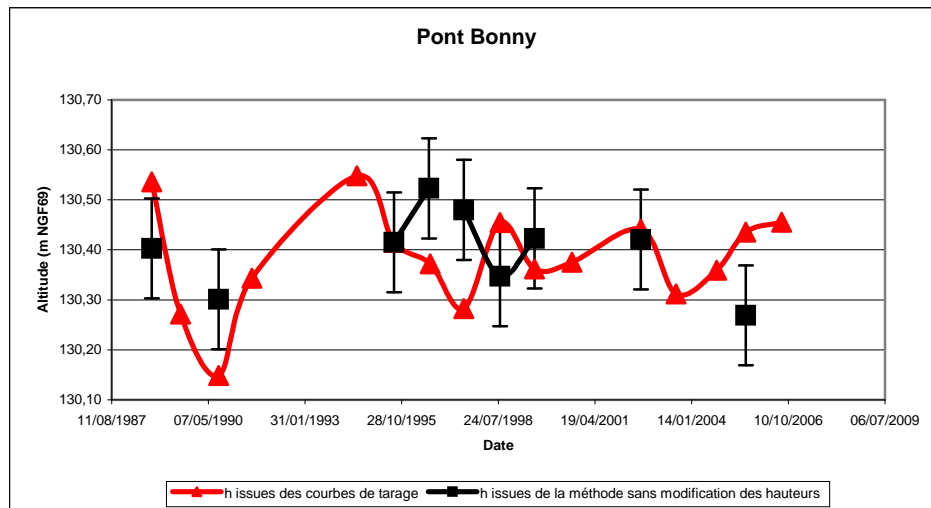


Figure 15 : Représentation de l'évolution des niveaux d'eau au Pont Bonny à partir des hauteurs d'eau issues des courbes de tarage à 69m³/s et à partir de la méthode sans modification des hauteurs

Nous pouvons bien voir sur la Figure 16 que le relevé fourni par la DIREN pour l'étiage de 2005 au Pont Bonny est nettement en dehors de la courbe de tarage de la même année.

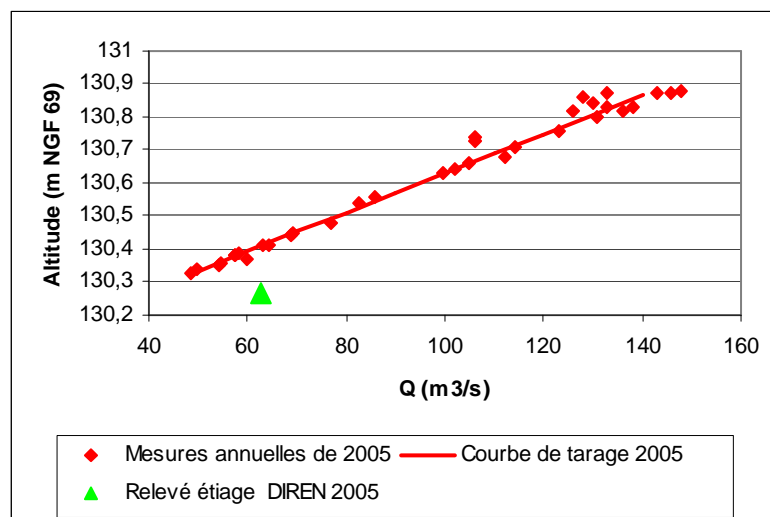


Figure 16 : Localisation du relevé DIREN de 2005 par rapport à la courbe de tarage annuelle au Pont Bonny

En résumé, cette méthode est applicable et opérationnelle. Malheureusement, il semble exister des incertitudes autour de la précision des relevés des lignes d'eau d'étiages.

Partie 3 : Suivi de l'évolution morphologique de la Loire sur le secteur de Belleville

L'objectif de cette partie est de décrire l'évolution morphologique du secteur de Belleville depuis la construction de la centrale.

1. Evolution de la bathymétrie

1.1. Evolution du bilan sédimentaire

Le traitement des profils bathymétriques nous a permis de quantifier les volumes de sédiment érodés et déposés entre chaque section depuis 1977. L'évolution du bilan sédimentaire par secteur est représentée sur la figure ci-dessous.

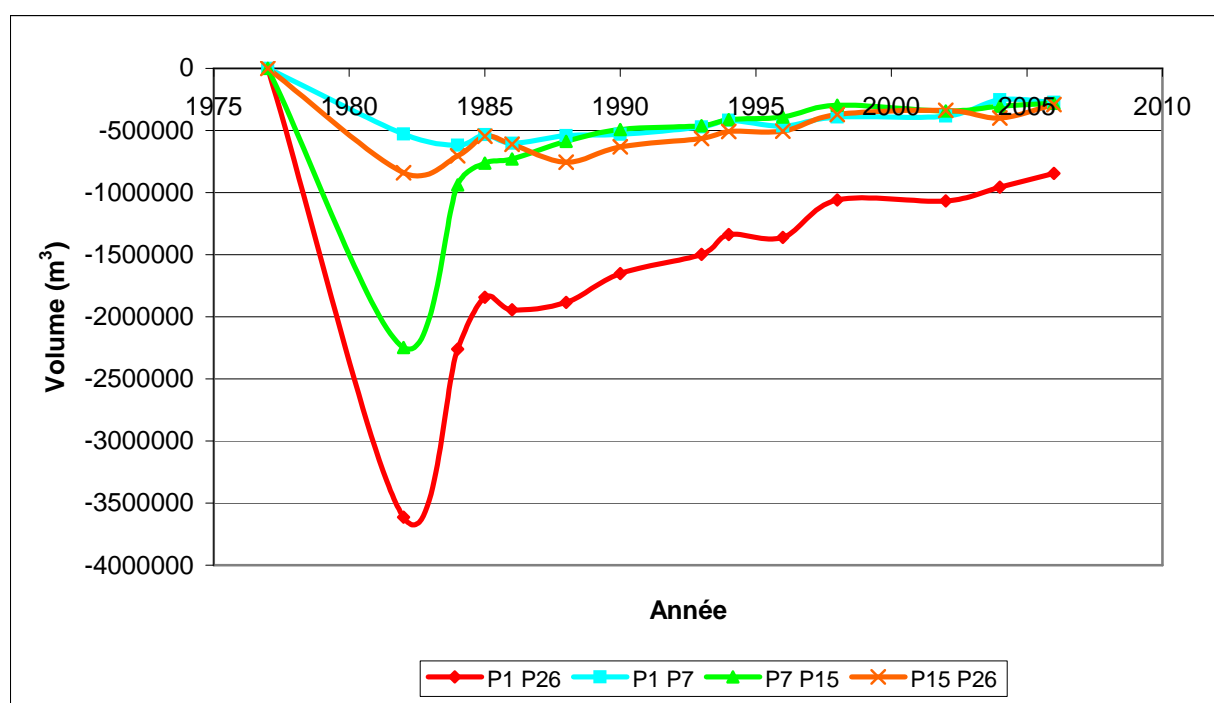


Figure 17 : Evolution du bilan sédimentaire depuis 1977 à Belleville

Il s'agit de variations relatives par rapport à la situation de 1977, où l'état de la Loire dans le secteur étudié était encore décrit comme naturel. Pour la lecture du graphique, une diminution entre deux années consécutives traduit une tendance à l'érosion et inversement une augmentation représente une tendance à la sédimentation.

Le profil 0 n'a pas été pris en compte car un seul profil ne peut pas être représentatif de l'évolution d'un bief de 3km de long.

Les secteurs représentés sur le graphique sont :

- la zone d'étude dans sa totalité (profil 1 à 26). ;
- la zone en aval du seuil, non modifiée par les travaux de construction de la centrale (profil 1 à 7) ;
- la zone au droit de la centrale où le lit de la Loire a été modifié (P7 P15) (Cf. partie 1, §2.5) ;
- la zone en amont de la centrale, non modifiée lors de la construction (profil 15 à 26).

Les taux et intensités de sédimentation calculés sur chacun de ces secteurs sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Taux de sédimentation et intensité de sédimentation sur les tronçons P1 P26, P1 P7, P7 P15, P15 P26 pour les périodes 1985-1996 et 1996-2006

	Evolution sur la période 1985-1996		Evolution sur la période 1996-2006	
	Taux de sédimentation (m ³ /an)	Intensité de sédimentation (m ³ /an/m)	Taux de sédimentation (m ³ /an)	Intensité de sédimentation (m ³ /an/m)
P1 P26	57229	5,9	41843	4,3
P1 P7	12240	4,7	19560	7,6
P7 P15	34400	11,7	7391,3	2,5
P15 P26	10589	2,5	14892	3,5

L'observation de la courbe **P1 P26** sur le graphique ci dessus amène à distinguer trois phases bien distinctes dans l'évolution sédimentaire du secteur de Belleville. Une première période de 1977 à 1982, où l'on assiste à un très fort creusement du lit (- 3 600 000m³), lié bien évidemment à l'extraction des sédiments pour construire la plate-forme. Ce chiffre concorde avec les 3 850 000m³ estimés lors de la construction de la centrale (Cf. partie 1, §2.5). Cette phase est suivie d'un rapide comblement avec le dépôt d'un peu moins de 2 000 000m³ en trois ans. Depuis 1985, le secteur est confronté à un processus de sédimentation continu qui se ralentit sur la dernière décennie. En effet, nous pouvons voir sur le Tableau 3 que le taux de sédimentation et l'intensité de sédimentation diminuent entre 1996 et 2006.

Les courbes P1 P7, P7 P15 et P15 P26 suivent à peu près la même tendance que la courbe P1 P26.

Le tronçon **P15 P26** a connu une érosion régressive synchrone aux extractions, qui a abouti en 1982 au départ de 840 000m³ de sédiments. Depuis 1985, ce secteur se comble de manière continue avec une légère augmentation de la sédimentation sur 1996-2006. Cette intensification s'illustre par le passage de l'intensité de sédimentation de 2,5m³/an/m entre 1985 et 1996 à 3,5m³/an/m sur la décennie suivante (Cf. Tableau 3). Ce secteur reste toujours en déficit sédimentaire par rapport à 1977 (-290 000m³).

Le secteur au droit de la centrale (**P7 P15**) a vu partir 2 300 000m³ entre 1977 et 1982, ce qui correspond aux 2/3 des volumes évacués sur P1 P26. S'en est suivie une période de fort comblement jusqu'au milieu des années 1990 avec un intensité de sédimentation de 11,7m³/an/m. Au cours de cette période le taux de sédimentation de P7 P15 représente 41% du taux de sédimentation de P1 P26. Depuis 1996, les processus de sédimentation se sont nettement ralentis avec une intensité de sédimentation qui a chuté à 2,5m³/an/m. Sur ce secteur le déficit en sédiment par rapport à 1977 s'élève à 280 000m³.

Les extractions de matériaux ont induit une érosion progressive sur **P1 P7** qui a atteint son maximum en 1984 (-620 000m³). Ce phénomène est déphasé par rapport aux creusements maxima des deux autres tronçons. Ce secteur se comble depuis 1985, avec une amplification de la sédimentation ces dernières années, comme le prouve l'évolution de l'intensité de sédimentation qui est passée de 4,7m³/an/m sur 1985-1996 à 7,6m³/an/m sur 1996-2006. Toutefois, en 2006, P1 P7 connaît toujours un déficit sédimentaire par rapport à 1977 qui s'élève à 270 000m³.

Actuellement, il existe deux types d'évolution sur le secteur de Belleville : une zone en aval du seuil qui se comble toujours fortement et une zone en amont du seuil qui s'ensable plus modérément.

1.2. Remarque sur l'évolution du bilan sédimentaire de P15 P26

Il ressort d'une analyse plus fine de l'évolution sédimentaire du tronçon P15 P26 que ce secteur se divise en deux zones aux comportements bien distincts. La première se situe entre P15 et P20 et la seconde comprend tous les profils en amont du P20. La figure suivante illustre bien les évolutions qui s'y déroulent

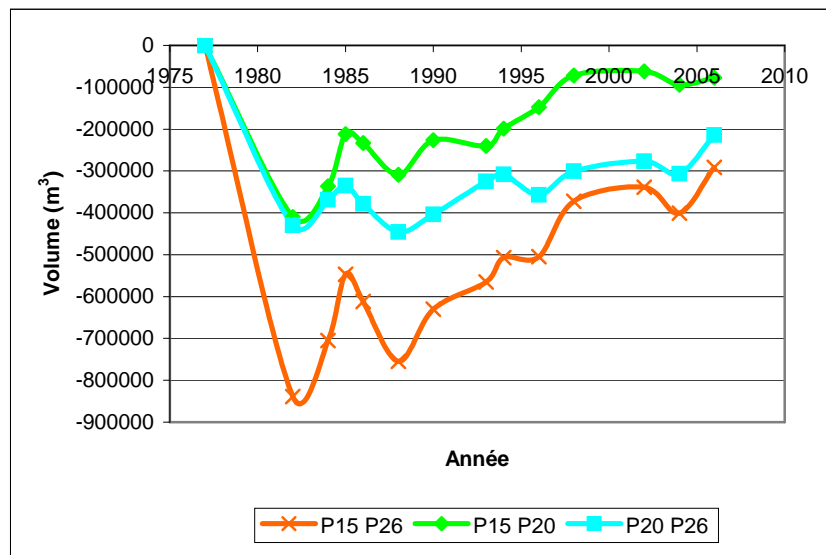


Figure 18 : Evolution du bilan sédimentaire depuis 1977 à P15 P26, P15 P20 et P20 P26

Le tronçon P15 P20 connaît un fort comblement entre 1982 et la fin des années 1990. Depuis les phénomènes de sédimentation s'y sont largement atténués. Sur le bief P20 P26, le comblement est moins important mais constant depuis 1986.

1.3. Evolution des sections mouillées

L'analyse des sections mouillées n'apporte pas d'informations supplémentaires.

Le seul point à souligner concerne les profils 12, 14, 17, 25 et 26 qui ont en 2006 des sections mouillées inférieures à celles de 1977.

1.4. Conclusion de l'analyse des bathymétries

L'analyse des bathymétries nous amène à plusieurs conclusions :

- La première concerne **la zone modifiée lors de la construction de la centrale** (P7 P15), qui après une période de fort comblement suite aux extractions de matériaux, connaît depuis une dizaine d'années une certaine stabilisation du lit ;
- **Les tronçons P1 P7 et P15 P20**, non modifiés lors des travaux, ont été confrontés à d'importants phénomènes d'érosion progressive et régressive, qui correspondent à une réponse quasi instantanée du système face aux importants volumes de sédiment extraits. A la fin de ces processus d'érosion, ces deux zones se sont ensablées progressivement avec des intensités de sédimentation relativement fortes. Ces processus se sont ralentis sur P15 P20 depuis une dizaine d'années tandis qu'ils sont toujours aussi importants sur P1 P7 ;
- **La zone restante, P20 P26**, connaît une sédimentation modérée mais constante depuis la fin des travaux ;.
- Enfin, à l'exception des profils 12, 14, 17, 25 et 26, l'aire des sections actuelles sont encore supérieures à celles d'avant travaux.

L'impact des travaux est donc toujours perceptible sur les bathymétries du secteur.

2. Evolution du tracé en plan

2.1. Evolution de 1955-1957 à 1971

Les jeux de photos disponibles permettent d'observer une zone comprise entre les profils bathymétriques 1 et 24 (Cf. Annexe 3.1). Ce secteur commence en amont du lieu dit la Turlunerie et se termine 500m en amont du pont de Bonny sur Loire.

Pour faciliter la description, le tronçon étudié a été découpé en trois secteurs qui correspondent à ceux présentés dans la partie précédente : un secteur en amont de la plate forme, un au droit de la plate forme et un en aval. Il faut rappeler qu'aux dates où ont été prises ces photos la centrale n'était pas encore en place.

Avant toute description des évolutions du tracé en plan, il semble intéressant de préciser que durant les années 1950, la Loire sur le secteur de Belleville, se présente sous la forme d'un chenal rectiligne parsemé d'îles végétalisées, découpant en ces points, le chenal principal en plusieurs bras.

Secteur en amont de la plate forme

Dans cette zone, l'évolution la plus marquante est liée à un passage d'un style fluvial présentant plusieurs bras au sein du chenal principal vers un chenal principal unique avec un seul bras. En effet, en 1957, il existait au droit des Grands Ormes deux îles végétalisées séparant deux chenaux de largeurs équivalentes et un chenal plus restreint pouvant s'apparenter à un bras secondaire. En 1971, il ne reste plus qu'un seul chenal et un bras secondaire. Ces modifications sont dues à l'agrégation de l'île la plus à l'est à la rive droite ainsi qu'à une forte

extension de l'autre île. Deux bancs de sables se sont également développés en rive gauche au cours de cette période. Ils sont localisés en amont de la zone étudiée et en aval des Grands Ormes. Pour le reste, le chenal principal s'est plutôt rétréci en amont des Grands Ormes et élargi en aval.

Secteur au droit de la plate forme

Un ensablement du secteur est repérable en amont de cette zone. Une grève en rive droite au niveau du lieu dit des Pelus est apparue. Les deux îles situées devant ce même lieu dit se sont également engraisées provoquant une migration latérale du chenal en rive gauche au détriment d'une ancienne grève végétalisée. En aval de ces îles, un bras en rive gauche, autrefois en eau s'est ensablé. Sur le reste de la zone, le tracé en plan s'est peu modifié.

Secteur en aval de la plate forme

Comme pour les secteurs amonts, les principales modifications proviennent principalement des îles. Durant cette période leur superficie s'est fortement accrue. L'exemple le plus marquant concerne l'île Coudreaux qui s'est étendue vers l'amont de 200m. Plus en aval, l'île Bon s'est engraisée vers la rive droite déplaçant le chenal dans le même sens. Une grève s'est développée en rive gauche au droit de Maimbray. Dans l'ensemble, le lit mineur s'est ici plutôt rétréci.

2.2. Evolution de 1971 à 1983

Les figures utilisées pour caractériser cette évolution sont disponibles en Annexe 3.2. Le tronçon étudié débute au profil bathymétrique 10 et finit 1000m en aval du profil 1.

Secteur au droit de la plate forme

Au niveau de la plate forme du CNPE (profils 8 à 10), les principales évolutions résultent des mesures compensatoires effectuées lors de la construction de la centrale. Ces évolutions se traduisent par un élargissement du lit mineur de plus de 150m, faisant apparaître un nouveau chenal rectiligne en rive gauche.

Secteur en aval de la plate forme

D'autres modifications du tracé en plan sont visibles en face du port de Neuvy sur Loire. Plusieurs grèves se sont formées en aval du seuil, dont une au droit du port d'environ 750m de long. Ce comblement est certainement lié au fait que, le seuil et le chenal creusé en rive gauche au droit de la centrale, concentrent les écoulements en aval du seuil vers la rive gauche du lit mineur.

En aval du port de Neuvy sur Loire, au niveau de la commune de Maimbray, l'île des Coudreaux (localisée au niveau des profils bathymétriques 3 et 4) a migré vers l'aval d'environ 50m entre 1971 et 1983 (cette estimation n'est valable que si les débits s'écoulant à ces deux dates sont du même ordre de grandeur), soit d'environ 5m par an. Cette valeur avoisine les vitesses de déplacement observées sur la Loire pour les îles mobiles par Babonaux (1970) (Bouchard et Courivaud, 2000).

En dehors de cette île, l'évolution du tracé en plan est peu significative.

2.3. Evolution de 1983 à 1998

L'analyse des évolutions du tracé en plan entre 1983 et 1998 est effectuée à partir des figures de l'Annexe 3.3. Le secteur étudié ici est le même que pour la période 1971-1983.

Secteur au droit de la plate forme

Au droit de la plate forme de la centrale, le chenal rive gauche n'a pas évolué tandis que l'île en amont du seuil s'est fortement engraisée longitudinalement (vers l'aval) et latéralement (vers la rive droite). Cette extension de l'île semble traduire un comblement du chenal en rive droite.

Secteur en aval de la plate forme

En aval immédiat du seuil, les grèves formées entre 1971 et 1983 se sont légèrement étendues. De nouveaux bancs de sables sont visibles au centre du lit, ce qui laisse présager que les écoulements à l'étiage s'orientent davantage vers le chenal rive gauche.

En ce qui concerne l'île des Coudreaux, son « avalaison » s'est poursuivie à mesure de 4,3m par an (soit 65m en 15ans). L'aval de l'île s'est dans le même temps fortement ensablé.

Sur le reste du secteur aval, le tracé en plan a également évolué. En effet, une légère diminution de la largeur du lit mineur et surtout un fort développement des îles sont observables.

Il faut cependant nuancer toutes les observations liées à l'extension des îles car l'incertitude au niveau du débit de 1983 fait que celui-ci peut varier du simple au triple par rapport au débit de 1998.

2.4. Evolution de 1971 à 1998

Les séries de 1949 et 1983 étant incomplètes, il nous est apparu pertinent de suivre le tracé en plan entre 1971 et 1998, de manière à étudier l'évolution du tracé sur le plus grand linéaire possible et de mesurer l'impact de la centrale sur la morphologie.

Le secteur étudié s'étend du profil bathymétrique 24 (au niveau de La Celle sur Loire) à 500m en amont du pont de Bonny sur Loire.

Les modifications du tracé sont représentées sur les figures de l'Annexe 3.4.

Secteur en amont de la plate forme

En amont de la centrale, la Loire présente une succession de courbes plus ou moins importantes. Au niveau de la Turlunerie (lieu dit en amont des Grands Ormes) un net rétrécissement du chenal principal dû à l'implantation d'une grève est visible. De même, une île a fait son apparition en rive gauche en aval des Grands Ormes. De la Turlunerie jusqu'aux Chaumes Claires, une migration du chenal principal vers la rive droite est observable. Le bras secondaire séparé du chenal principal par l'île située en face des Grands Ormes est toujours présent même s'il n'est plus que partiellement en eau en 1998. Une autre évolution notable

provient de l'augmentation des bancs de sable émergés. Toutefois, il paraît probable que ces observations soient directement liées à la différence des débits lors des deux prises de vue.

Secteur au droit de la plate forme

Les évolutions au niveau de la plate forme de la centrale sont beaucoup plus significatives.

Entre les Chaumes Claires et le CNPE, le chenal a migré latéralement d'environ 100m vers la rive gauche, cette translation a été engendrée par le creusement en aval d'un chenal en rive gauche au niveau de la centrale. Au droit du lieu dit Les Pelus, nous assistons à une spectaculaire modification du style fluvial. Là, où il existait en 1971 un chenal en tresse avec trois bras de largeurs équivalentes, il ne reste plus en 1998 qu'un chenal de 150m de large en rive gauche (créé lors de la construction de la centrale) et trois filets d'eau (reliques des trois anciens bras) assurant la connexion du nouveau chenal à l'ancien chenal en rive droite. Les îles présentes dans ce secteur se sont fortement engraissées, comblant par la même occasion le chenal rive droite. L'essentiel des débits s'écoulent dans le chenal creusé au droit de la centrale en rive gauche.

Secteur en aval de la plate forme

En aval du seuil de la centrale, les évolutions ont déjà été observées aux paragraphes 2.2 et 2.3 de cette partie.

Au niveau de Neuvy sur Loire, le chenal a basculé de la rive droite vers la rive gauche et un comblement du lit est visible (principalement devant le port). Ces modifications sont dues au seuil et au chenal creusé au droit de la centrale qui concentrent les débits en rive gauche en aval immédiat du seuil.

La progression de l'île Coudreaux vers l'aval est nettement visible.

Enfin, une augmentation des surfaces occupées par les îles est notable. Toutefois, les faibles débits mesurés pendant les photographies de 1998 peuvent amplifier l'extension des îles.

2.5. Evolution de 1998 à 2002

L'évolution du tracé entre 1998 et 2002 a été relevée à partir des figures de l'Annexe 3.5.

La zone d'étude retenue débute à Myennes et finit au profil bathymétrique 0 (en aval du pont de Bonny sur Loire).

Il a été choisi de prolonger la portion de Loire étudiée jusqu'à Myennes afin de tenter d'expliquer l'élévation des niveaux d'eau enregistrée à Myennes pour les fortes crues.

Secteur en amont de la plate forme

Le tracé en plan entre Myennes et les Chaumes Claires a sensiblement peu varié. Les berges sont stables à l'exception d'une zone située en amont des Grands Ormes (profils bathymétriques 21 à 23,) où la rive droite s'est érodée d'une dizaine de mètres. Les chenaux secondaires ont également peu évolué. Ces annexes hydrauliques sont localisées : en rive gauche en amont de Myennes, en rive droite au niveau de l'île du Saulois (aval de Myennes) et en rive droite sur l'île située face aux Grands Ormes. Il faut également souligner que l'île au droit des Chaumes Claires s'ensable.

Secteur au droit de la plate forme

La principale évolution constatée entre les Chaumes Claires et le seuil concerne l'île séparant le bras rive droite du bras rive gauche en amont du seuil. Même si la prise de vue de 2002 a été réalisée lors d'un débit plus fort qu'en 1998, nous pouvons remarquer que la partie amont de cette île continue son extension vers la rive droite. A l'opposé, sa partie aval s'est rétrécie. Par ailleurs, une autre île se développe juste à l'amont du seuil à coté de la rive droite. Le chenal rive droite semble donc poursuivre son comblement.

Secteur en aval de la plate forme

En aval du seuil, la situation a aussi peu changé. Les principales différences de 2002 proviennent de la disparition de bancs de sables et l'apparition de chenaux de liaison entre les deux bras du chenal principal. Toutefois, ces différences peuvent résulter d'un écart de débit entre les photos. L'île au droit du port de Neuvy sur Loire s'est rattachée à la berge. La migration de l'île des Coudreaux a été stoppée par l'île Bon. Comme l'atteste l'étendue des grèves les séparant, il semblerait que ces deux îles soient en train de fusionner. A noter que l'île Bon peut être considérée comme une île stable depuis plusieurs décennies.

Enfin, l'excellente définition des photographies de 2002 permet de voir, à travers les nombreuses dunes du chenal principal, l'importance du transport solide par charriage en amont des Chaumes Claires et en aval du pont de Bonny sur Loire. Le transport solide se voit donc modifier aux abords du seuil. Cependant, le transport solide retrouve plus en aval les caractéristiques qu'il avait en amont du CNPE.

2.6. Evolution entre 2002 et 2005

L'analyse du tracé en plan entre 2002 et 2005 a été conduite à partir de l'Annexe 3.6.

Le secteur d'étude s'étend de Myennes jusqu'au profil 0 situé en aval du pont de Bonny sur Loire.

Secteur en amont de la plate forme

Entre Myennes et les Chaumes Claires, le tracé en plan n'a quasiment pas évolué. Le banc de sable au niveau de la Turlunerie s'est engraisé ; sa longueur a doublé pour atteindre au final presque 500m. Une grande partie de l'île au droit des Chaumes Claires s'est fixée à la berge.

Secteur au droit de la plate forme

Au droit de la centrale, il y a également peu de variation. Le chenal de liaison amont reliant le bras rive gauche à celui en rive droite n'est plus en eau, stabilisant par la même occasion l'île amont à la rive. L'île du milieu a migré vers l'aval de 65m en 3 ans (soit plus de 21m par an). L'île aval a peu évolué alors que les grèves émergentes dans le bras droit juste en amont du seuil se sont développées. L'ensablement du lit mineur en rive droite se poursuit toujours.

Secteur en aval de la plate forme

En aval immédiat du seuil, l'augmentation des surfaces occupées par les bancs de sable émergés atteste du comblement de cette zone entre 2002 et 2005. A noter qu'après travaux d'entretien, un chenal a été rétabli au

droit du port de Neuvy sur Loire. Pour la partie plus en aval, l'unique modification du tracé en plan se résume en une incorporation par l'île Coudreaux des bancs situés en son aval. Seul un étroit chenal de liaison sépare en 2005 les îles Coudreaux et Bon.

2.7. Conclusion de l'analyse de l'évolution du tracé en plan

En amont de la centrale, la seule évolution notable a eu lieu avant la construction de la centrale, entre 1957 et 1971. En effet, en plus de l'apparition de quelques bancs de sable, une réduction du nombre de chenaux s'est produite en face des Grands Ormes, conduisant au passage de deux bras de même largeur à un chenal avec un seul bras. Par la suite, des élargissements et des rétrécissements localisés du chenal principal (principalement entre 1971 et 1998) se sont accompagnés d'apparitions d'îles. Depuis 1998, les modifications concernent essentiellement l'engraissement d'îles localisées au droit de la Turlunerie et des Chaumes Claires ainsi qu'en aval des Grands Ormes. Cette zone semble très active d'un point de vue transport solide car il est possible d'observer le déplacement de nombreuses dunes émergées et immergées. L'influence de la centrale sur le tracé en plan de ce tronçon ne semble pas réellement perceptible.

Enfin, ce secteur peut s'avérer intéressant d'un point de vue écologique et en terme de biodiversité si les chenaux secondaires présentés ne sont pas dans une dynamique de colmatage.

Au droit de la centrale, entre les Chaumes Claires et le seuil, nous avons assisté, à un basculement du chenal principal de la rive droite vers la rive gauche, associé à un comblement du lit en rive droite. Ces modifications sont le fruit de la création d'un nouveau chenal rectiligne le long de la plate forme et d'un seuil, qui pour alimenter la centrale en eau, concentre les écoulements vers la rive gauche. Il semble, d'après les photographies de 1957 et 1971, qu'une tendance à l'ensablement et un basculement du chenal vers la rive gauche juste à l'amont de l'emplacement actuel de la centrale étaient déjà amorcés. Cela laisse supposer que l'implantation de la centrale n'a eu pour effet que d'accentuer des tendances déjà initiées.

Au niveau de Neuvy sur Loire, **en aval immédiat du seuil**, l'effet des aménagements se fait également ressentir. Comme à l'amont de l'ouvrage transversal, le chenal principal a basculé de la rive droite (où il baignait le port même lors des forts étiages, Bouchard et Courivaud, 2000) vers l'autre rive. Ce transfert latéral s'est accompagné d'un ensablement au centre et en rive droite du lit mineur. **Plus en aval**, les berges ont peu évolué et des îles sont apparues. La migration vers l'aval de l'île Coudreaux (qui pouvait atteindre près de 5m par an) a été stoppée par une île fixe : l'île Bon. Il semble qu'actuellement ces deux îles soient en train de s'agglomérer. Par ailleurs, la superficie totale occupée par les îles et les grèves a constamment progressé, traduisant un comblement continu du lit.

3. Evolution de la bande active

3.1. Résultats et interprétations des mesures de largeur de bande active

Les largeurs de bande active sont représentées sur la figure suivante :

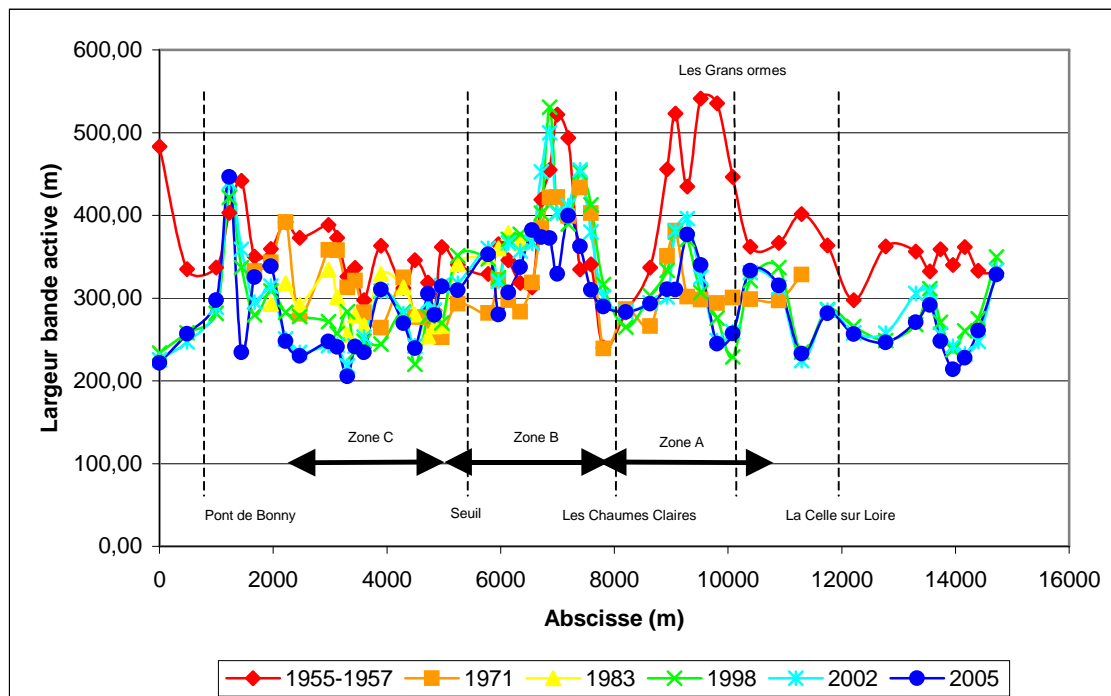


Figure 19 : Evolution longitudinale de la largeur de la bande active entre 1955 et 2005 autour de la centrale de Belleville

Pour faciliter, le suivi de l'évolution de la bande active, trois zones ont été identifiées : la zone A, la zone B et la zone C.

Les largeurs moyennes pour chaque zone et pour chaque année sont répertoriées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Largeur moyenne de la bande active par zone d'étude et par année

	1955-1957	1971	1983	1998	2002	2005
Zone A	426	309		305	305	300
Zone B	373	350		391	389	341
Zone C	345	306	293	273	270	268

La largeur est exprimée en mètre.

Zone A

Ce secteur est localisé en amont de la zone modifiée lors de la construction de la centrale. Les largeurs moyennes de bande active pour les années 1955-1957, 1971, 1998, 2002 et 2005 sont respectivement de 426m, 309m, 305m, 305m et 300m. La bande active a vu sa largeur se réduire de 120m entre 1955-1957 et 1971. Cette diminution est à attribuer à une forte végétalisation des îles localisées en aval des Grands Ormes.

Par la suite, la bande active a peu évoluée. Toutefois, cette apparente stabilité cache quelques disparités d'évolution. En effet, autour des Grands Orme, nous distinguons deux zones d'élargissement de la bande

active et une zone de rétrécissement. Ces évolutions peuvent s'expliquer par la morphologie du site. Le lit de Loire suit ici des courbes. Dans notre cas, la bande active s'accroît dans les extrados des méandres. La zone de réduction de la bande active a lieu au niveau de la tête de l'île localisée en face des Grands Ormes, qui est actuellement en train de se végétaliser.

Zone B

La zone B comprend la partie du lit qui a été creusée pour les besoins de la construction du CNPE. Sur ce tronçon la bande active a nettement moins diminué entre 1955-1957 et 1971 comme en témoigne les largeurs moyennes calculées (373m en 1955-1957 et 350m en 1971). La bande active a ensuite augmenté pour atteindre près de 390m au début des années 2000. Dans les années suivantes, une spectaculaire réduction de 50m en trois ans a été enregistrée pour aboutir à 341m en 2005. La Figure 19 illustre bien ces tendances qui peuvent s'expliquer de la manière suivante : la réduction de la bande active avant la construction de la centrale traduit une végétalisation des îles et des bras secondaires, à l'opposé l'élargissement du lit lors des travaux a permis d'étendre considérablement la bande active. Par la suite, le chenal en rive droite s'est constamment comblé, exondant des bancs de sable à des cotes de plus en plus élevées. Ce phénomène associé à un régime hydrologique faible (comme s'est le cas depuis le début des années 2000) et un arrêt des essartements depuis 1998 ont amplifié la végétalisation du lit mineur, au détriment de la bande active.

Zone C

La zone C, située en aval de la zone de travaux, est le seul secteur où nous avons pu mesurer la largeur de la bande active pour les six campagnes disponibles. Les largeurs moyennes calculées sont de 345m pour 1955-1957, 306m pour 1971, 293m pour 1983, 273m pour 1998, 270m pour 2002 et 268m pour 2005. La bande active a continuellement diminué depuis le milieu du 20^{ème} siècle. Cette évolution est à associer avec l'important taux de sédimentation mis en évidence dans ce secteur (Cf. partie 3, §1.1), qui a permis dans un premier temps aux îles de s'étendre puis dans un deuxième temps de se végétaliser.

Toutefois, le rétrécissement de la bande active n'a pas été constant au cours de la période. Entre 1955-1957 et 1971, la largeur de la bande active s'est réduite d'environ 50m, ce qui représente une régression de 2,5m par an. Entre 1983 et 2005, la perte moyenne de bande active se chiffre à 1,2m par an.

Sur tous les secteurs, nous observons une importante diminution de la bande active avant la construction de la centrale. La réduction de la bande active, souvent liée à une végétalisation du milieu, est une des conséquences de la chenalisation des rivières, phénomène provoqué par les extractions massives de granulat en lit mineur. Ce processus se traduit par une incision du lit, une surélévation des berges et des îles ainsi que par un rétrécissement de la bande active. Cela laisse supposer que le secteur de Belleville se chenalisait avant la construction de la centrale. Le ralentissement de ce phénomène après la construction pourrait être lié à l'interdiction de prélever des matériaux dans le lit mineur. Cette hypothèse nous amène à penser que les modifications enregistrées sur la zone de Belleville, après la mise en place de la centrale, seraient aussi influencées par les évolutions régionales ligériennes.

3.2. Conclusion de l'évolution de la bande active

En amont de la centrale, la bande active a fortement diminué (-120m) entre 1957 et 1971. Depuis, la bande active s'est très légèrement rétrécie (-10m).

Au droit de la centrale, la bande active a peu diminué avant 1971 (-20m). La période suivant les travaux de construction, a vu un agrandissement de la bande active (+40m). Depuis le début des années 2000, la bande active se réduit fortement (-50m). Cette tendance s'explique par un ensablement du lit, initiant par la suite en association avec la faible hydrologie des dernières années et l'arrêt des essartements, un processus de végétalisation.

Le tronçon **en aval de la centrale** a connu une diminution importante de la bande active avant l'installation de la centrale sur le site (-40m en 25ans). Depuis une trentaine d'années cette tendance se poursuit mais avec un net ralentissement (-40m en presque 40ans).

4. Evolution des points bas

L'analyse de l'évolution des points bas permet de vérifier si un approfondissement du chenal principal est en cours.

Le calcul des points bas (Cf. Figure 20) a été réalisé par l'outil Excel VisuProfils. A noter que le classeur fournit des valeurs moyennées sur une distance prédéfinie, ici nous présentons les cotes basses moyennées sur 5m.

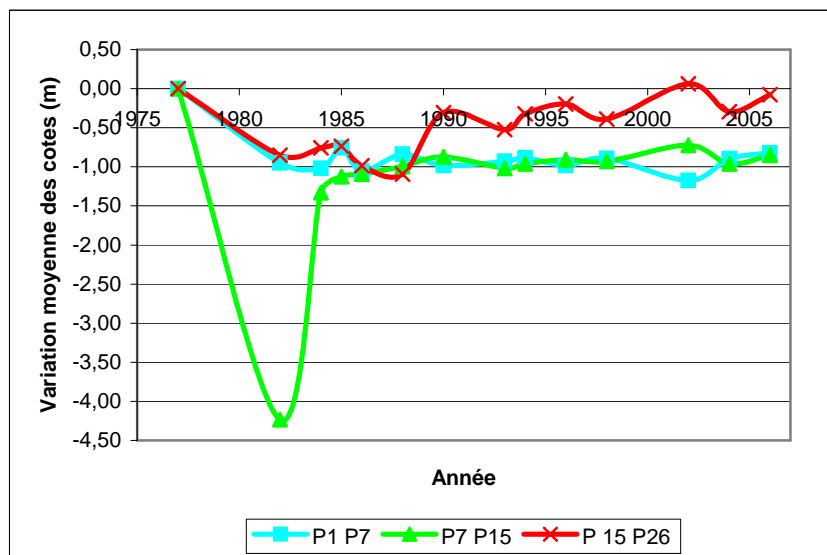


Figure 20 : Evolution des points bas par rapport à 1977 sur P1 P7, P7 P15 et P15 P26

En amont de la centrale (zone en amont de P15), l'approfondissement du lit lié à l'érosion régressive après la construction de la centrale s'est poursuivi jusqu'en 1988. A cette date les fonds s'étaient abaissés en moyenne de 1,10m par rapport à 1977. Par la suite, les niveaux sont remontés de façon constante pour aboutir en 2006 à un écart moyen par rapport à 1977 de -0,08m (avec un minimum de -0,95m à P22 et un maximum de +1,37m au P25).

Au droit de la centrale, les travaux ont mené à un très fort creusement du lit jusqu'en 1982 où la moyenne des points bas du secteur a atteint -4,23m, avec un maximum de -8,24m sur P13. S'en est suivi une forte remontée jusqu'en 1986. Depuis les cotes stagnent autour de -0,90m par rapport à 1977. Il faut souligner qu'il existe de fortes disparités de niveau au sein du tronçon avec comme exemple en 2006 un écart maximum par rapport à 1977 de -1,77m sur P15 et un minimum égal à 0 sur P11.

En aval de la centrale (P1 P7), l'érosion progressive a conduit à un abaissement moyen des points bas de -0,95m en 1982. Depuis les cotes moyennes se sont stabilisées à -1m par rapport aux niveaux de 1977. En 2006, le niveau moyen des points bas a atteint -0,82m par rapport à 1977 avec un creusement enregistré sur P3 où les cotes ont atteint -2,20m et un exhaussement en P4 où le point bas est revenu au niveau initial.

L'évolution des points bas sur P1 P7 est différente de celle des bilans sédimentaires. Il en est de même pour P7 P15 sur la période 1982-1996. Les fortes intensités de sédimentation enregistrées sur ces tronçons ne se traduisent donc pas par un comblement du chenal principal mais plutôt par un exhaussement et une extension des îles sur P1 P7 et un comblement du bras rive droite sur P7 P15.

5. Evolution des niveaux d'eau

Pour plus de lisibilité, l'étude des niveaux d'eau se scinde en deux parties : une première qui traite des stations en amont du seuil et une seconde qui traite de celles en aval du seuil.

5.1. Echelles en amont du seuil

Les évolutions des niveaux d'eau des stations localisées en amont du seuil pour des débits de 100, 350, 1000 et 1800m³/s sont reproduites sur les figures suivantes.

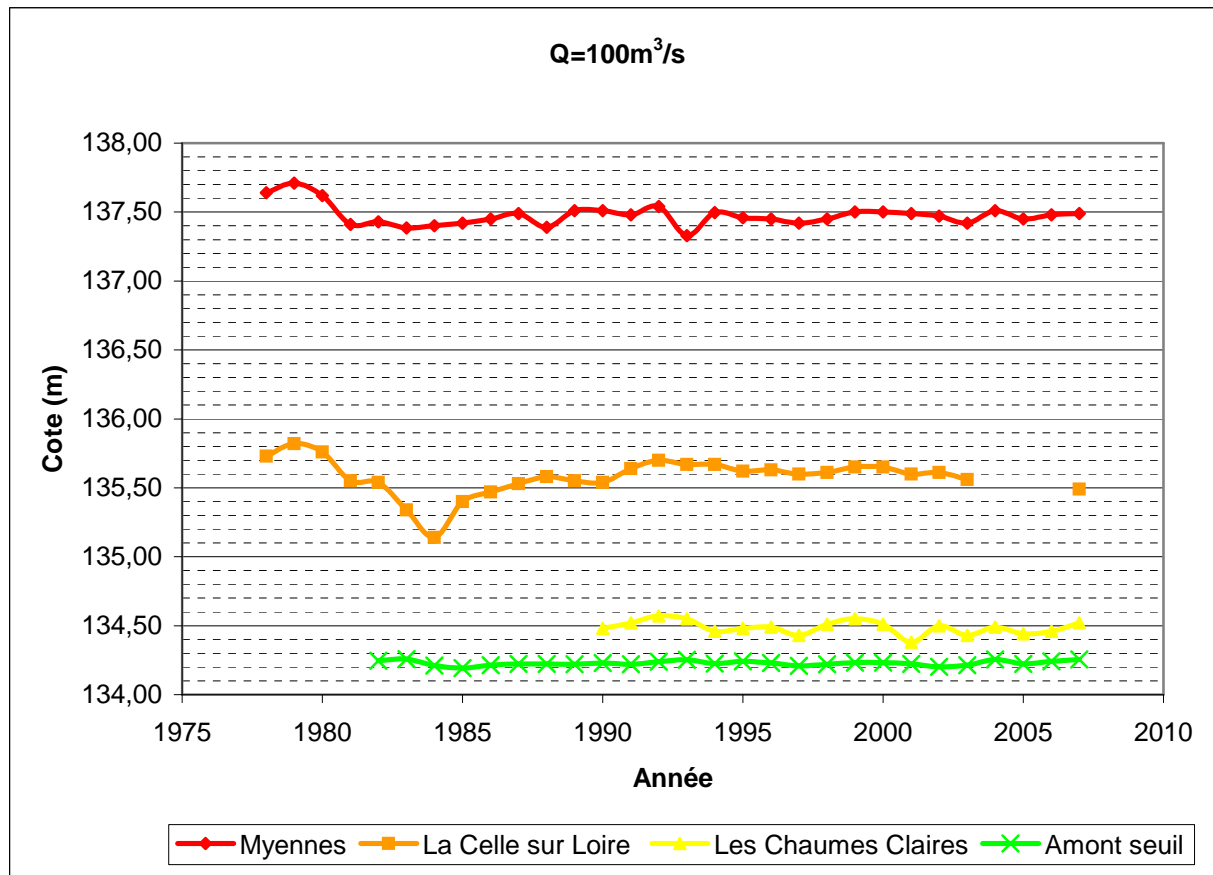


Figure 21 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour Q=100m³/s

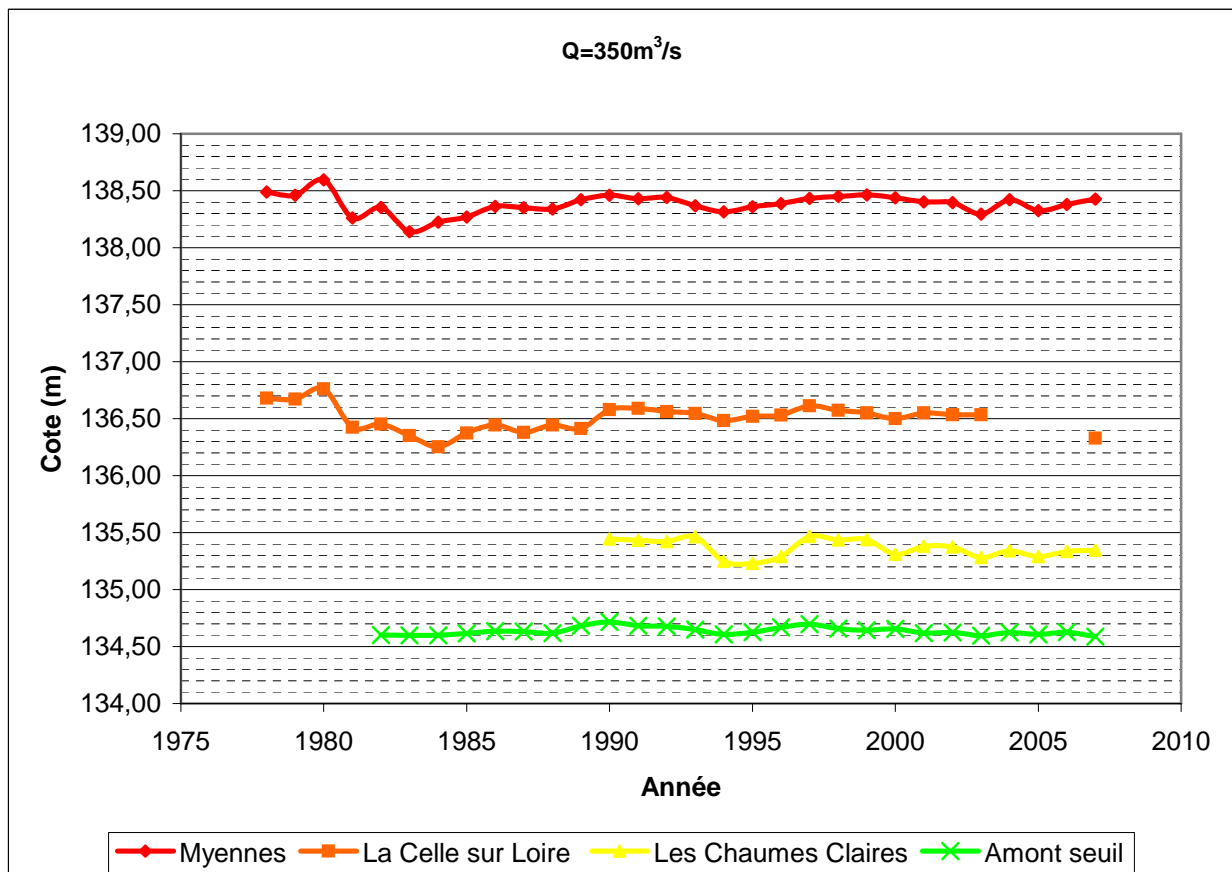


Figure 22 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour Q=350m³/s

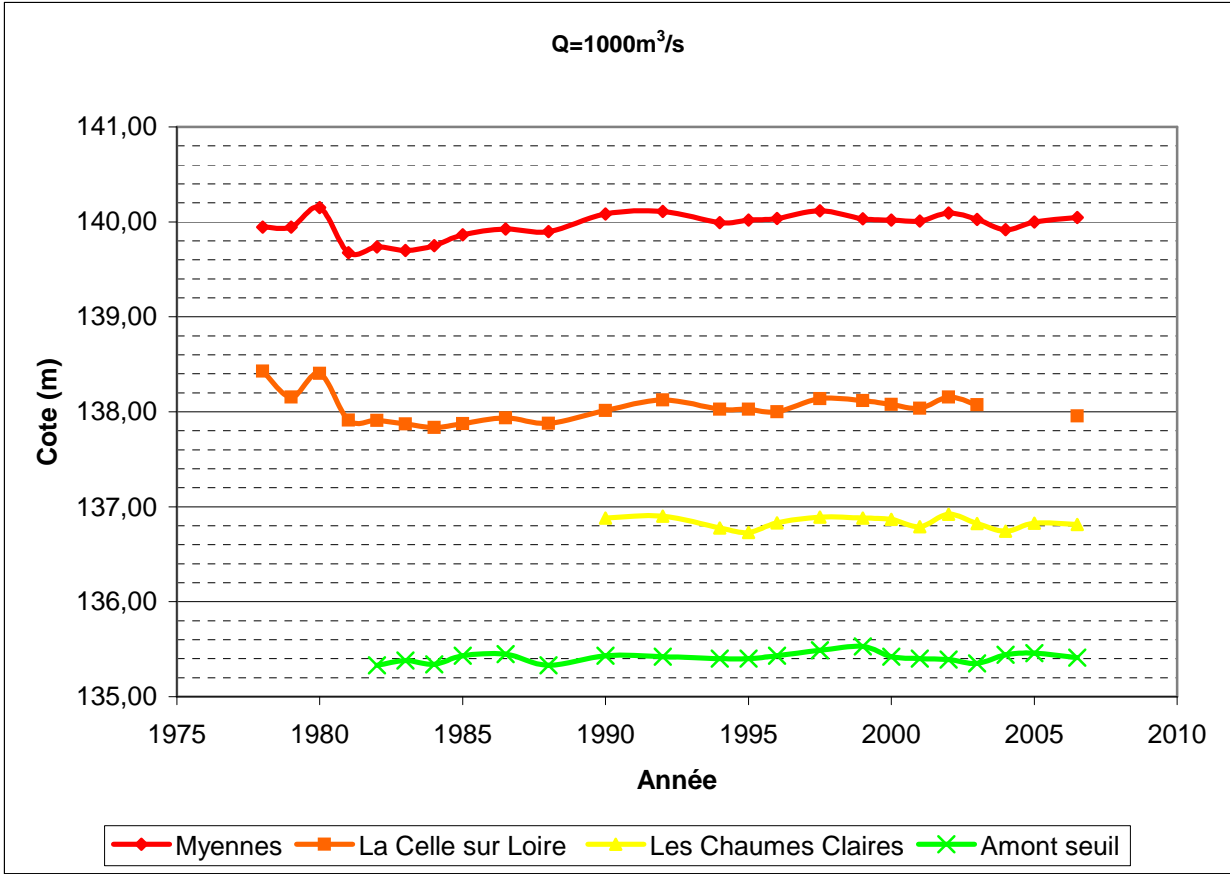


Figure 23 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour Q=1000m³/s

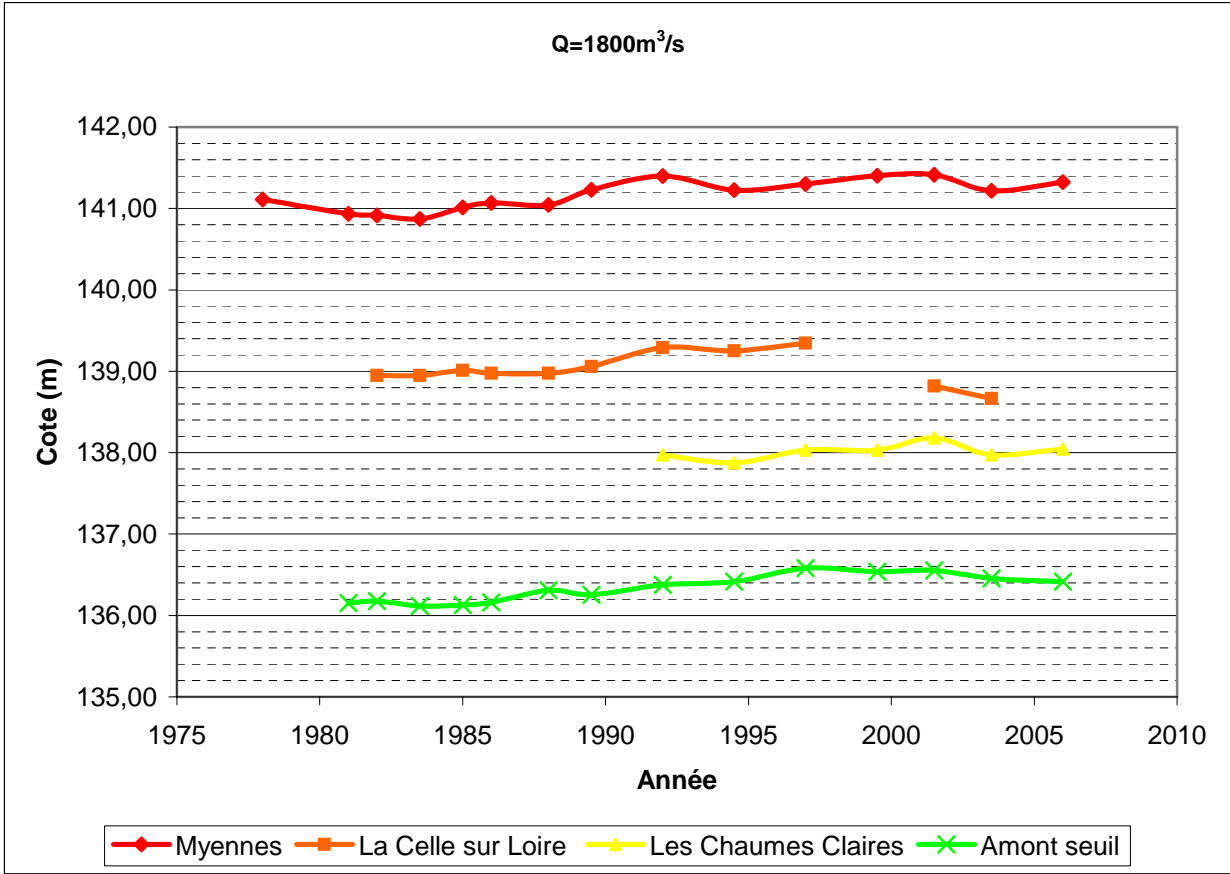


Figure 24 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour Q=1800m³/s

Les évolutions visibles sur les Figures 21 et 22 pour des débits de 100 et 350m³/s montrent que juste après la construction de la centrale, les niveaux ont diminué d'une vingtaine de centimètres. Après une remontée (environ 10cm), les hauteurs d'eau stagnent depuis la deuxième moitié des années 1980. Comme en témoignent les échelles de Myennes et de La Celle sur Loire, les cotes n'ont cependant jamais retrouvé leurs valeurs d'avant travaux.

A 1000m³/s (Cf. Figure 23), les évolutions sont à peu près identiques avec une remontée des niveaux pendant les années 1980 (suite à leurs chutes après les travaux), puis une stabilisation. Toutefois, il faut souligner qu'à Myennes les niveaux sont supérieurs à ceux de 1978 depuis une quinzaine d'année.

Pour 1800m³/s (Cf. Figure 24), les échelles de Myennes et d'Amont seuil ont enregistré une hausse des cotes d'au moins 20cm par rapport à 1977. Cette augmentation se produit pendant les années 1980 et reste stable. L'évolution des hauteurs d'eau à La Celle sur Loire suit la même tendance, toutefois l'absence de donnée pour 2004-2006 et l'impossibilité d'obtenir des mesures pour les forts débits depuis 2000, ne nous permettent pas de conclure sur la période récente. Aux Chaumes Claires les niveaux d'eau restent stables.

La stabilité des niveaux à faible débit pour l'échelle Amont seuil s'explique par le fait que le seuil n'est noyé qu'à partir de 800m³/s. Pour des débits supérieurs à cette valeur, les niveaux d'eau à cette station sont influencés par les conditions en aval de l'ouvrage.

La diminution des niveaux d'eau à l'étiage peut traduire un abaissement de la cote des fonds et/ou un élargissement du lit. L'augmentation des niveaux pour les forts débits s'explique probablement par une végétalisation du lit et une surélévation des berges.

5.2. Echelles en aval du seuil

Les évolutions des niveaux d'eau des stations localisées en aval du seuil pour des débits de 100, 350, 1000 et 1800m³/s sont reproduites sur les figures suivantes.

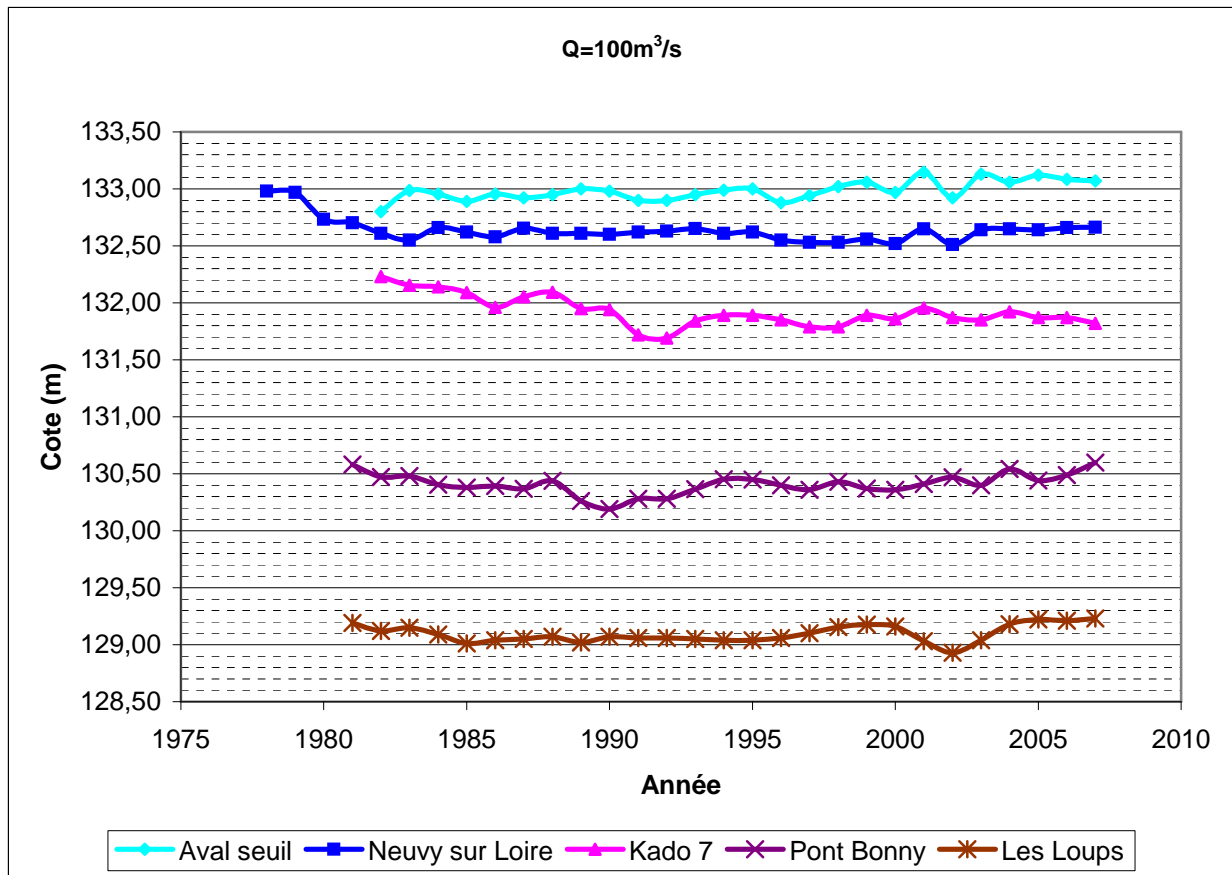


Figure 25 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour Q=100m³/s

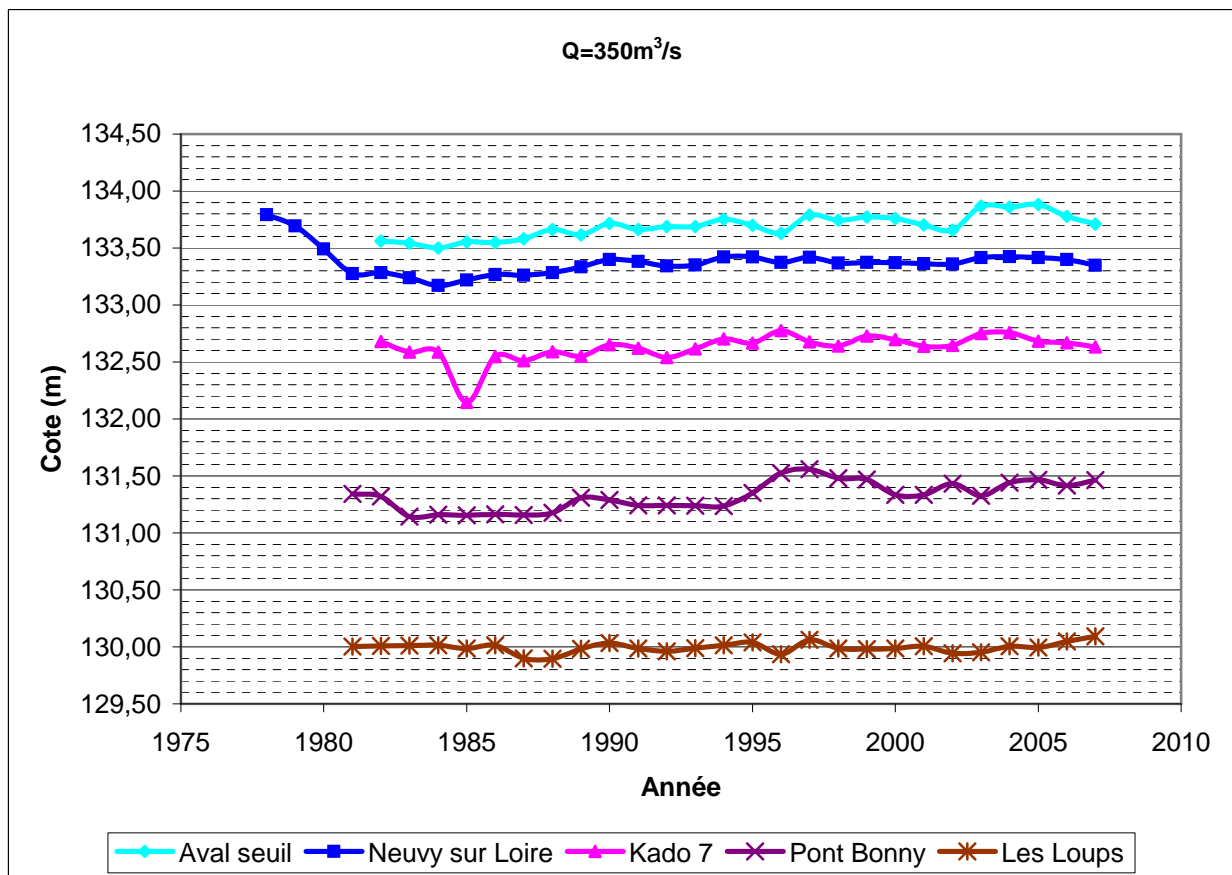


Figure 26 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour Q=350m³/s

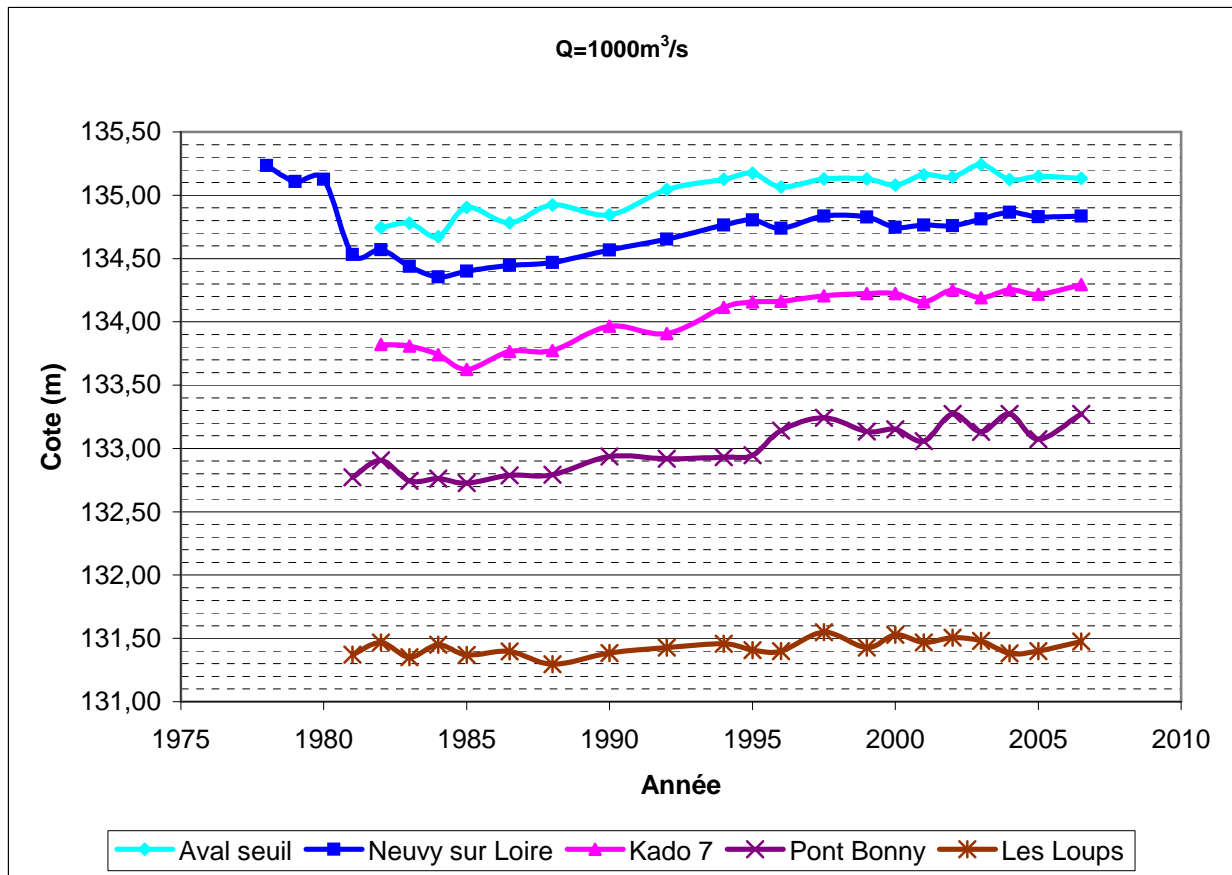


Figure 27 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour Q=1000m³/s

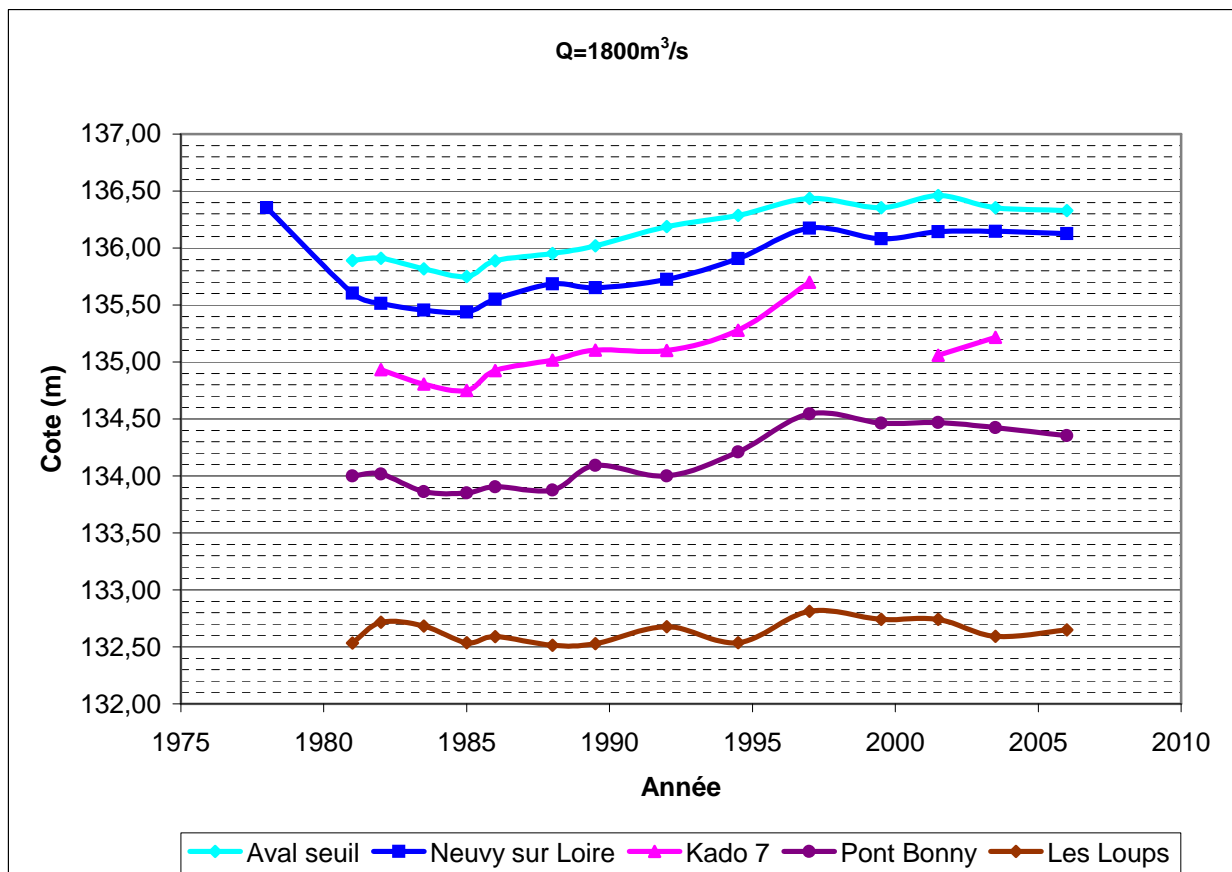


Figure 28 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour Q=1800m³/s

D'après la Figure 25, nous constatons une nette diminution des niveaux d'étiage pour les échelles de Neuvy sur Loire et Kado 7 (jusqu'à 60cm à Kado 7). Cette baisse est décalée dans le temps entre les deux sites ; à Neuvy sur Loire elle a lieu au moment de la construction de la centrale alors qu'à Kado7 elle s'observe plutôt fin des années 1980 – début des années 1990. Ce décalage reflète les processus d'érosion progressive engendrés par l'extraction de sédiment en lit mineur pendant la construction de la centrale. Un creusement est aussi visible sur les courbes de Pont Bonny et Les loups. Toutefois, la simultanéité de cet abaissement entre Kado 7 et Pont Bonny, rend difficile l'attribution de cette évolution aux phénomènes d'érosion liés aux travaux de la centrale. Il est également peu évident de trouver les causes du creusement enregistré aux Loups au début des années 2000.

Dans tous les cas, cette diminution des niveaux d'eau se suit par une stabilisation à une cote inférieure à celle de l'état initial.

A 350m³/s (Cf. Figure 26), l'abaissement est aussi observable, il s'accompagne par la suite d'une remontée des niveaux. Actuellement, les cotes varient peu depuis une dizaine d'années.

Pour les débits de 1000 et 1800m³/s (Cf. Figure 27 et 28), les courbes suivent la même tendance. Après une forte baisse (-1m à Neuvy sur Loire !), les niveaux remontent d'une cinquantaine de centimètres jusqu'au milieu des années 1990, où ils se stabilisent ensuite. Comme l'illustre le cas de Neuvy sur Loire (seule échelle en aval du seuil à avoir des données antérieures à 1981), les cotes actuelles sont encore inférieures à celles d'avant construction.

Les travaux réalisés pendant la construction de la centrale se sont répercutés sur les niveaux d'eau en aval du seuil en provoquant un abaissement. Les niveaux d'étiage ont ensuite peu évolué alors que ceux des hautes eaux ont remonté. Ces observations témoignent probablement d'un abaissement du lit et d'une surélévation des berges.

5.3. Conclusion de l'analyse des niveaux d'eau

En amont du seuil, les niveaux d'étiage se sont abaissés de 20cm après la construction de la centrale. Par la suite, les hauteurs d'eau sont remontées d'une dizaine de centimètres. Les niveaux stagnent à cette cote depuis le milieu des années 80. Pour les débits de crue, les niveaux se sont élevés par rapport à ceux de 1977. A Myennes les niveaux en crue sont supérieurs d'une vingtaine de centimètres à ceux d'avant la construction. Cette élévation est à surveiller car elle peut accroître les risques d'inondation. La Celle sur Loire est peut être dans le même cas mais nous ne pouvons l'affirmer à cause du dysfonctionnement de cette échelle.

En aval du seuil, les niveaux d'étiage se sont abaissés après les travaux d'environ 50cm. Les cotes sont ensuite remontées et stabilisées à une cote inférieure à celle de l'état initial. En crue, les hauteurs d'eau ont fortement diminué (simultanément sur toutes les stations). S'en est suivi une remontée d'une cinquantaine de

centimètres jusqu'au milieu des années 1990. Depuis les niveaux se sont stabilisés mais à des cotes inférieures à celles d'avant construction.

6. Conclusion sur l'évolution morphologique du secteur de Belleville

Pour une meilleure lisibilité des résultats et des évolutions, les conclusions de l'étude locale sont regroupées sous forme de tableau.

Tableau 5 : Synthèse de l'étude locale

	Secteur en amont de la centrale (P15 P26)	Secteur au droit de la centrale (P7 P15)	Secteur en aval de la centrale (P1 P7)
Bathymétrie	<p>Erosion régressive en amont de la centrale après les travaux : -840 000m³ en 1982</p> <p>Comblement continu depuis 1985 avec une légère augmentation de la sédimentation sur 1996-2006. Passage de l'intensité de sédimentation de 2,5m³/an/m sur 1985-1996 à 3,5m³/an/m sur 1996-2006. Ce secteur reste en déficit sédimentaire par rapport à 1977 : -290 000m³ en 2006</p> <p>Les processus de dépôt ne sont pas homogènes sur ce secteur. Il peut se diviser en deux tronçons aux évolutions différentes : P15 P20 qui a vu son intensité de sédimentation ralentir depuis 10 ans et P20 P26 qui connaît une intensité de sédimentation croissante</p> <p>Les sections en amont (P25 et P26) ont des surfaces inférieures à celles de 1977</p>	<p>En 1982, après les extractions, le déficit en sédiment s'élève -2 300 000m³</p> <p>Fort comblement jusqu'au milieu des années 1990, intensité de sédimentation de 11,7m³/an/m sur 1985-1996</p> <p>Depuis net ralentissement de la sédimentation. L'intensité de sédimentation est passée à 2,5m³/an/m sur 1996-2006. Le secteur reste en déficit sédimentaire par rapport à 1977 : -280 000m³ en 2006</p>	<p>Erosion progressive en aval de la centrale après les travaux : -530 000m³ en 1982</p> <p>Comblement continu depuis 1985, se traduisant par une extension des îles, avec une forte augmentation de l'intensité de sédimentation ces dernières années: 4,7m³/an/m sur 1985-1996 et 7,6m³/an/m sur 1996-2006. Le secteur reste en déficit sédimentaire par rapport à 1977 : -270 000m³ en 2006</p>
Tracé en plan	<p>Avant la construction de la centrale, réduction du nombre de chenaux, apparition de bancs de sable</p> <p>Après les travaux, quelques érosions de berges en rive droite sont enregistrées (- de 10m) et apparition d'îles qui ont tendance à s'engraisser le long de la rive gauche au niveau de la Turlunerie, des Chaumes Claires ainsi qu'en aval des Grands Ormes</p>	<p>Avant la construction de la centrale, tendance à l'ensablement et amorce d'un basculement du chenal de la rive droite vers la rive gauche</p> <p>Après les travaux, fortes modifications avec le basculement du chenal principal en rive gauche dans un chenal creusé et le comblement du chenal rive droite (=extension des îles)</p>	<p>Avant la construction de la centrale, le lit s'est plutôt rétréci et les îles se sont agrandies</p> <p>Après travaux, juste en aval du seuil, basculement du chenal principal en rive gauche. Sur l'ensemble du secteur, apparition d'îles et fort engraissement des îles. L'île Bon et de l'île Coudreaux tendent à s'agglomérer</p>
Bande active	<p>Très forte réduction de la largeur de la bande active entre 1957 et 1971 (-120m),</p> <p>Par la suite, diminution beaucoup plus faible : -10m entre 1971 et 2005</p>	<p>Faible diminution entre 1955-1957 et 1971 (-20m de large),</p> <p>Extension conséquente liée à l'élargissement du lit entre 1971 et 1998 (+40m). Depuis les années 2000 rétrécissement important de la bande active (-50m) à cause de l'arrêt des essartements et de la faible hydrologie</p>	<p>Réduction importante de la bande active entre 1955 et 1971 (-40m)</p> <p>Diminution plus modérée mais toujours constante : -40m en presque 40ans</p>
Point bas	<p>Creusement après les travaux jusqu'en 1988 où on atteint -1,10m en moyenne par rapport à 1977</p> <p>Depuis les niveaux sont remontés de façon constante pour atteindre en 2006 un écart moyen par rapport à 1977 de -0,08m avec comme minimum -0,95m et maximum +1,37m au P25</p>	<p>Très fort creusement après les travaux : -4,23m en moyenne avec un maximum à -8,24m</p> <p>Forte remontée des points bas jusqu'en 1986, puis stabilisation des cotes autour de -0,90m par rapport à 1977. A noter des fluctuations importantes au sein du tronçon, en 2006 minimum de -1,71m maximum de 0m</p>	<p>Creusement de 0,95m après les travaux</p> <p>Depuis stabilisation des cotes autour de -1m par rapport à 1977 (-0,82m en moyenne en 2006 par rapport à 1977). A noter un creusement en P3 (-2,20m en 2006) et une atteinte du niveau initial en P4 (+0,07m en 2006)</p>

Niveaux d'eau	A 100m³/s , les niveaux se sont abaissés de 0,20m après la construction de la centrale. Puis les hauteurs d'eau sont remontées d'une dizaine de centimètres . Les niveaux stagnent à cette cote depuis le milieu des années 80		A 100m³/s , les niveaux se sont abaissés d'environ 0,50m après les travaux. Par la suite les niveaux sont remontés et se sont stabilisés à une cote inférieure à celle de l'état initial
	A 1800m³/s , les niveaux se sont élevés de 0,20m depuis 1977		A 1800m³/s , après les travaux, les hauteurs d'eau ont fortement diminué , -1m à Neuvy sur Loire. Les cotes sont ensuite remontées d'une cinquantaine de centimètres jusqu'au milieu des années 90. Depuis les niveaux stagnent mais à des cotes inférieures à celles d'avant construction
Tendances actuelles	Bathymétrie : Comblement moyen	Bathymétrie : Comblement faible	Bathymétrie : Comblement fort
	Tracé en plan : Apparition d'îles qui s'engraissent	Tracé en plan : Engraissement des îles	Tracé en plan : Apparition d'îles et fort engraissement des îles
	Bande active : Diminution faible	Bande active : Diminution forte	Bande active : Diminution modérée
	Point bas : Elévation	Points bas : Stabilisation	Point bas : Stabilisation
	Niveaux d'eau : Stabilisation pour l'étiage et élévation en crue		Niveaux d'eau : Stabilisation pour l'étiage et crue

En résumé, l'implantation du CNPE sur le site de Belleville s'est essentiellement répercutée sur la morphologie de la Loire par une réorganisation du tracé en plan au droit de la plate forme et un abaissement généralisé du profil en long. S'en est suivi une période dite « de récupération » essentiellement caractérisée par des processus de sédimentation importants. Nous parlons ici de récupération car les évolutions du lit enregistrées tendent à s'opposer à l'effet des travaux de manière à retrouver un état proche de l'état initial. A partir du milieu des années 1990, le rythme de cette récupération s'est nettement ralenti, alors que l'état initial n'était toujours pas atteint.

A l'opposé, les évolutions du tracé en plan et de la bande active sur les secteurs en amont et en aval de la centrale semblent avoir été peu influencées par l'installation de la plate forme.

Il est clair que l'évolution morphologique du secteur de Belleville, et plus particulièrement la bathymétrie, a été principalement influencée par les aménagements jusqu'au milieu des années 1990. Toutefois, à l'heure actuelle, nous ne disposons pas d'assez d'éléments pour vérifier si les évolutions récentes sont seulement le fruit des travaux ou plutôt la résultante de processus morphologiques locaux et régionaux. L'étude morphologique régionale doit nous apporter plus d'indications pour répondre à cette interrogation.

Partie 4 : Suivi de l'évolution morphologique de la Loire à une échelle régionale

Cette partie doit nous permettre de vérifier si les évolutions morphologiques enregistrées sur Belleville sont identiques aux évolutions régionales.

Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats d'études antérieures traitant de la même problématique. Ces résultats nous ont permis de définir la portion de Loire à étudier.

Les parties suivantes traitent de l'analyse des photographies aériennes et des lignes d'eau d'étiage.

1. Synthèse bibliographique

1.1. Evolution morphologique : étude de P. Ginestet (1999)

Ce rapport, réalisé en 1999 par P. Ginestet, sectorise la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean sur Loire en plusieurs entités géomorphologiques, dans le but d'étoffer nos connaissances sur l'hydrosystème, et de servir d'appui pour la mise en place de gestions locales et globales du bassin versant.

Une première approche de l'évolution morphologique de la Loire moyenne y a été réalisée.

1.1.1. Principe de la sectorisation

La méthode de sectorisation employée par Ginestet repose sur les principes de J-R Malavoi qui découpent un cours d'eau en différentes entités. Celles-ci sont dans l'ordre décroissant : le cours d'eau, le secteur, l'unité, le tronçon, le sous-tronçon et le segment.

Le découpage est réalisé à partir de paramètres qualitatifs et quantitatifs. Une entité correspond à un ensemble homogène de divers paramètres.

Pour plus de détails sur cette sectorisation, nous invitons le lecteur à consulter directement ce rapport dont les références sont citées dans la partie bibliographie.

1.1.2. Localisation du secteur de Belleville et de la zone d'étude

La zone étudiée autour de Belleville est localisée à cheval sur les deux sous-tronçons « Cosne sur Loire-Neuvy sur Loire » et « Neuvy sur Loire-Bonny sur Loire » (soit respectivement T2S2 et T2S3 de l'unité 1 sur la Figure 29). Ces deux entités sont localisées en aval de l'unité 1, qui constitue l'unité la plus en amont de la sectorisation entre le Bec d'Allier et le Montjean sur Loire. Les limites amont-aval de chaque entité sont présentées en Annexe 4.

L'objectif de la partie 4 est de caractériser les évolutions morphologiques de la Loire sur un secteur plus étendu que celui étudié dans la partie 3. Pour ce faire, nous avons décidé de travailler sur une trentaine de kilomètres en amont et en aval de Belleville. Afin de disposer d'une base de comparaison pour nos résultats, nous délimitons le secteur à étudier à partir des limites des sous-tronçons définis dans la sectorisation de Ginestet.

Ainsi le bief débute à La Charité sur Loire (limite amont de T1S3, de l'unité 1, Cf. Figure 29) et finit à Lions en Sullias (limite aval du tronçon 1 de l'unité 2, Cf. Figure 29).

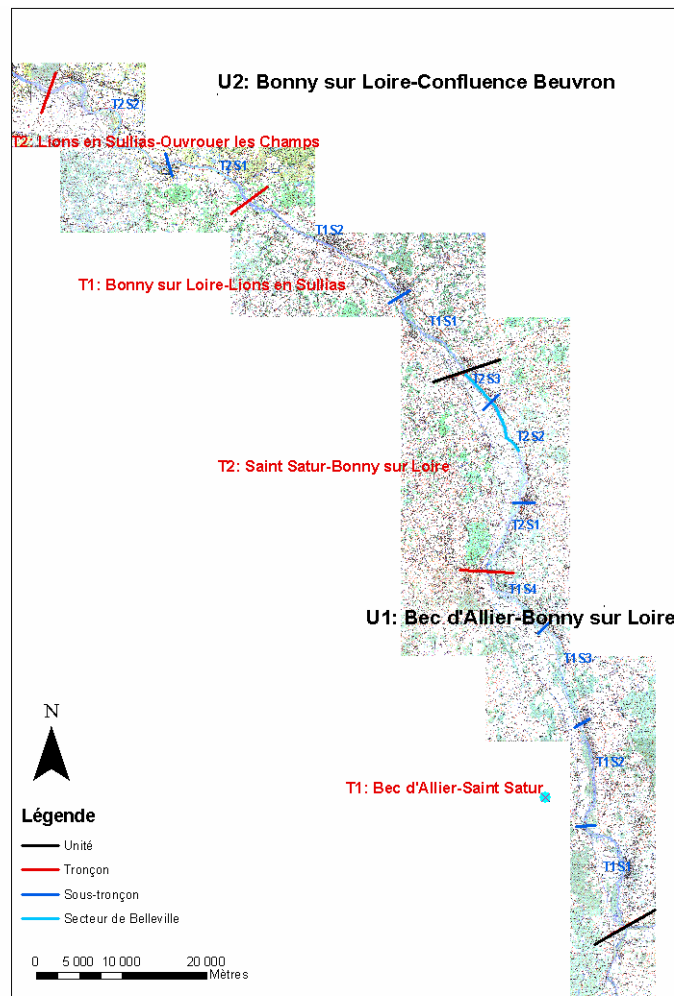


Figure 29 : Présentation de la sectorisation de Ginestet en aval d'Orléans
(Ux signifie unité x, Tx tronçon x et TxSy représente le sous-tronçon y du tronçon x)

La partie suivante présente les résultats de Ginestet pour le secteur que nous allons analyser.

1.1.3. Evolution morphologique entre 1955 et 1993

Entre La charité sur Loire et Bonny sur Loire, une forte baisse de la bande active a été enregistrée (entre -45 et -95m selon les secteurs). La grande majorité des sous-tronçons ont vu les îles diminuer en nombre (donc réduction du nombre de chenaux) et en taille (-25m). A l'opposé certains sous-tronçons (comme celui qui relie Neuvy sur Loire-Bonny sur Loire, U1T2S3), montrent l'apparition d'un chenal supplémentaire qui s'accompagne d'une augmentation de la largeur des îles (+40m).

Le secteur **de Bonny sur Loire à Briare** (U2T1S1) est marqué par une réduction de la bande active moins importante qu'en amont de Bonny (-35m). Cette tendance est encore moins prononcée **de Briare à Lions en Sullias** (U2T1S2) (de 0 à -20m). Il n'y a pas de modification significative du nombre de chenaux et les variations de la largeur des îles sont minimales.

Un tableau de synthèse de ces résultats est disponible en Annexe 5.

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

1.2.1. Etude de S. Chapuis (1997)

Cette étude (dont les résultats ont été repris par Ginestet) s'est attachée à caractériser l'évolution des lignes d'étiage entre 1986 et 1996. Les résultats ont été obtenus en comparant des niveaux d'eau mesurés à des débits identiques. Les conclusions sur les secteurs situés entre le Bec d'Allier et Bouteille (en amont d'Orléans) sont les suivantes :

- **Du Bec d'Allier à Cosne sur Loire**, l'enfoncement est modéré avec $-3,5\text{cm/an}$ maximum. La tendance est à la stabilisation voire à la remontée à partir de 1991. Remontée localisée à St Satur et au bec d'Allier. Enfoncement localisé à la Charité sur Loire en 1991.
- **De Myennes à Bouteille**, l'enfoncement est faible avec $-2,7\text{cm/an}$ maximum. Enfoncement des lignes d'eau jusqu'en 1991, puis stabilisation. Enfoncement localisé à Gien et Ousson en 1995.

1.2.2. Etude de S. Foutoyet (2001)

La méthode de reconstitution des débits développée au cours de ce stage a été présentée dans la partie 2 paragraphe 3.2.2. Les résultats de cette étude sur l'évolution de la ligne d'eau d'étiage entre 1996 et 2000 sont les suivants :

- **Du Bec d'Allier à Cosne sur Loire**, l'enfoncement est important, avec un abaissement supérieur à 15cm sur de nombreux sites.
- Le secteur entre **Cosne sur le Loire à Lion en Sullias** est globalement stable, avec une légère tendance à l'exhaussement.
- **De Lions en Sullias à Chécy**, l'évolution est également relativement stabilisée avec une légère tendance à l'enfoncement.

2. Analyse des photographies aériennes

Cette étude s'appuie sur les photographies de 1955-1957 et celles de 1998.

L'analyse repose sur la comparaison du tracé en plan, ainsi que sur l'évolution du nombre de chenaux, de l'indice de tressage, de la bande active et de l'enveloppe hydraulique.

Un tableau de synthèse de l'ensemble des résultats présentés ci-dessous est disponible en Annexe 6.

2.1. Evolution de la morphologie de la Loire entre 1955 et 1998 par sous-tronçon

2.1.1. U1T1S3 : La Charité sur Loire à Pouilly sur Loire

Le tracé en plan s'est fortement modifié sur ce sous-tronçon. La Loire conserve toujours un aspect plus ou moins sinueux, toutefois la majorité des coudes ont vu leurs berges convexes et concaves s'inverser. Ces modifications se sont accompagnées par une réduction du nombre d'îles. Parallèlement, nous enregistrons une forte diminution de l'indice de tressage (de 3,52 à 3,14) et du nombre moyen de chenaux (de 2,67 à 2,38). Ce constat est surtout lié à une végétalisation des îles qui réduit au sein de ces dernières le nombre de chenaux (Cf.

Figure 30). Les largeurs de la bande active et de l'enveloppe hydraulique ont rétréci de 80m pour atteindre respectivement en 1998 380m et 513m. Le lit mineur s'est donc fortement resserré.

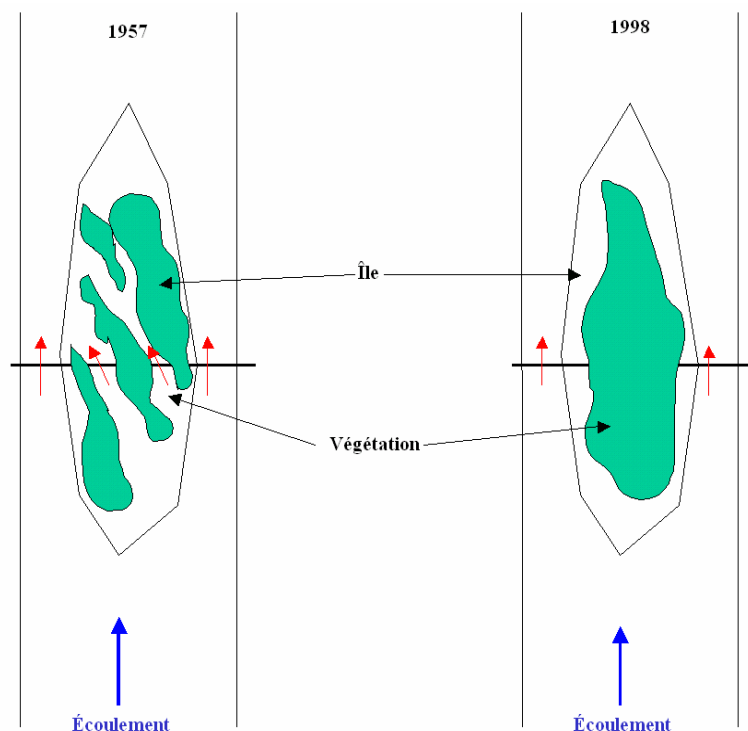


Figure 30 : Influence de la végétalisation des îles sur la diminution de l'indice de tressage et du nombre moyen de chenaux

En rouge, les chenaux au niveau du profil (trait noir). Nous voyons dans ce cas que le développement de la végétation réduit le nombre de chenaux et donc par conséquent l'indice de tressage.

2.1.2. U1T1S4 : Pouilly sur Loire à St Satur

Le tracé en plan s'est moyennement modifié. Les berges ont peu évolué et le fleuve présente toujours un aspect rectiligne, parsemé d'îles de tailles diverses. La principale modification est localisée au niveau du coude en amont de St Satur où le chenal principal s'est déplacé vers la rive droite sur une distance pouvant atteindre plus de 150m. Le nombre d'île a augmenté en 1998 et celles déjà présentes en 1957 se sont toutes engraisées sans que la végétation s'y développe fortement.

Comme sur le sous tronçon précédent, la bande active et le lit mineur se sont fortement rétrécis (plus de 80m) pour parvenir en 1998 à 330 et 504m.

2.1.3. U1T2S1 : St Satur à Cosne sur Loire

La comparaison des deux tracés en plan s'avère difficile sur ce sous tronçon car la photo de 1957 paraît avoir été prise en période de hautes eaux. Toutefois, il semble que le tracé en plan se soit peu modifié. Le lit mineur a peu changé (rétrécissement de l'enveloppe hydraulique de 29m). Aucune île n'est apparue. Celles déjà présentes se sont étendues.

L'indice de tressage est passé de 3,01 à 2,80, ce qui s'explique par la disparition d'un long bras secondaire. Le nombre moyen de chenaux a augmenté légèrement (+0,11) car une forte végétalisation des îles et des bancs a

entraîné la formation de chenaux (Cf. Figure 31). Ce développement de la végétation est aussi à l'origine de la réduction de la largeur de la bande active (-56m).

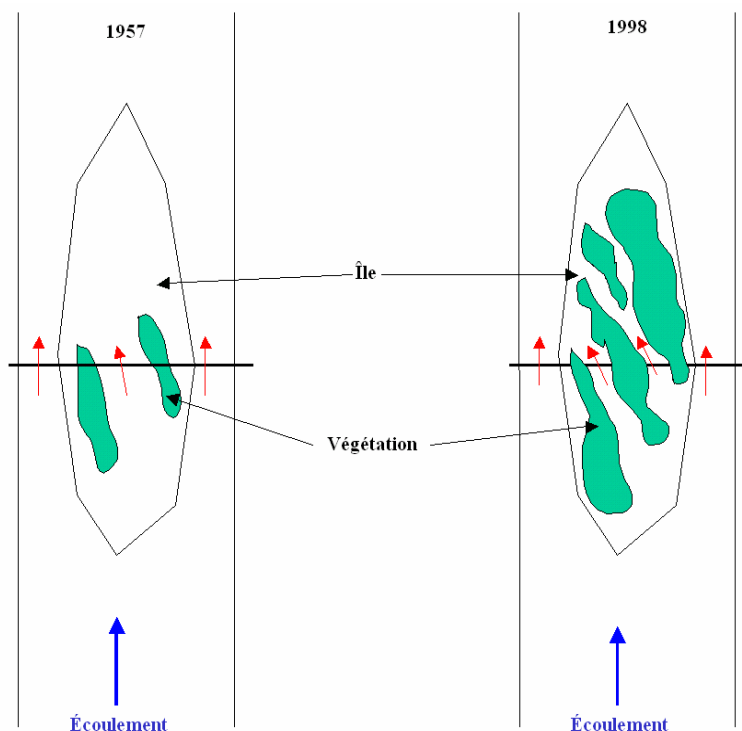


Figure 31: Influence de la végétalisation des îles sur l'augmentation du nombre moyen de chenaux et de l'indice de tressage

En rouge, les chenaux au niveau du profil (trait noir). Nous voyons dans ce cas que le développement de la végétation augmente le nombre de chenaux et l'indice de tressage.

Dans le cas de ce sous tronçon, la disparition d'un long bras secondaire a eu plus d'impact sur l'évolution de l'indice de tressage que le développement de la végétation.

2.1.4. U1T2S2 :Cosne sur Loire à Neuvy sur Loire

Ce secteur a connu de profondes modifications de son tracé en plan. Des chenaux secondaires ont disparu, causant l'aggradation d'îles aux berges. Des anciens bras du chenal principal ont muté en bras secondaires, traduisant une concentration des écoulements vers un chenal unique. Des îles sont apparues et ensablées. Le lit mineur s'est fortement végétalisé. Toutes ces observations sont en accord avec les diminutions de l'indice de tressage (de 2,85 à 2,41 en 1998), du nombre moyen de chenaux (de 2,37 à 1,96 en 1998), de la bande active (de 381m à 284m) et de l'enveloppe hydraulique (de 617 à 514m, soit 103m !).

De plus, c'est dans ce sous tronçon que la centrale de Belleville a été installée. Les modifications de la morphologie autour de la plate forme ne sont pas détaillées ici car elles ont été plus longuement décrites dans la partie 3.

Soulignons que l'île localisée en rive gauche en face de Cosne sur Loire et mesurant près de 5,5km de long est toujours en place.

2.1.5. U1T2S3 : Neuvy sur Loire à Bonny sur Loire

Ce sous tronçon est le plus petit étudié. Il mesure 6km alors que les autres mesurent en moyenne le double. Le tracé en plan s'est moyennement modifié. L'enveloppe hydraulique ne s'est réduite que de 39m, témoignant d'un certain maintien des berges. L'indice de tressage et le nombre moyen de chenaux ont augmenté pour passer respectivement de 2,81 à 3,04 et de 1,78 à 2,44. Dans le même temps, la largeur de la bande active a fortement diminué (-89m). Il ressort de l'analyse de ces indicateurs et de l'observation des photographies que des îles sont apparues et se sont très fortement engraisées, et que la végétation s'est fortement développée au sein du lit mineur créant de nouveaux chenaux (Cf. Figure 31).

2.1.6. U2T1S1 : Bonny sur Loire à Briare

En amont de ce sous tronçon, on assiste à un basculement du chenal de la rive droite vers la rive gauche sur 2km. Par la suite, le tracé en plan s'est peu transformé. Un rétrécissement du lit mineur (-57m) est notable. L'indice de tressage a légèrement diminué (-0,20), ce qui s'explique par une végétalisation des îles (Cf. Figure 30). Les îles se sont engraisées et fortement végétalisées. La largeur de la bande active a donc fortement diminué (passage de 325m à 250m, soit -76m).

2.1.7. U2T1S2 : Briare à Lions en Sullias

Ce secteur se caractérise par un style fluvial rectiligne qui s'illustre par un chenal unique rectiligne et une quasi absence d'île. Ici le tracé en plan n'a quasiment pas évolué. La bande active et l'enveloppe hydraulique se sont faiblement rétrécies (respectivement -25 et -16m).

Certaines évolutions sont à préciser pour la partie au droit de la centrale de Dampierre, en aval de ce sous tronçon. En effet nous pouvons enregistrer sur ces 1,5km : un basculement du chenal de la rive gauche vers la rive droite, une croissance des îles en place et un développement de la végétation. Ces observations ont été décrites à part car elles sont davantage liées aux travaux de construction de la centrale qu'à l'évolution régionale.

2.2. Analyse de l'évolution longitudinale de l'indice de tressage, du nombre moyen de chenaux, de la bande active et de l'enveloppe hydraulique

En 1955, l'indice de tressage décroissait de l'amont vers l'aval. A l'exception du sous-tronçon entre Cosne sur Loire et Neuvy sur Loire, le nombre moyen de chenaux, la largeur de la bande active et de l'enveloppe hydraulique suivaient la même tendance. Cela indique qu'avant la construction de la centrale, le secteur de Belleville constituait une entité morphologique à part.

En regardant l'évolution en 1998 de ces gradients amont –aval, il ressort que les sous tronçons U1T2S2 (Cosne sur Loire à Neuvy sur Loire) et U1T2S3 (Neuvy sur Loire à Bonny sur Loire) ont enregistré, la majeure partie du temps, des variations opposées ou accentuées par rapport à l'évolution globale régionale (Cf. valeurs en rouges dans le tableau suivant).

Tableau 6 : Evolution longitudinale de l'indice de tressage, du nombre moyen de chenaux, de la bande active et de l'enveloppe hydraulique

Tronçon	Limite amont	Indice de tressage 1955-1957	Indice de tressage 1998	Variation indice de tressage	Nombre moyen de chenaux 1955-1957	Nombre moyen de chenaux 1998	Variation nombre moyen de chenaux
U1T1S3	La Charité sur Loire	3,52	3,14	-0,39	2,67	2,38	-0,28
U1T1S4	Pouilly sur Loire	3,21	3,17	-0,04	2,25	2,40	0,15
U1T2S1	St Satur	3,01	2,80	-0,20	2,00	2,11	0,11
U1T2S2	Cosne sur Loire	2,85	2,41	-0,44	2,37	1,96	-0,41
U1T2S3	Neuvy sur Loire	2,81	3,04	0,22	1,78	2,44	0,67
U2T1S1	Bonny sur Loire	2,18	1,98	-0,20	1,68	1,72	0,04
U2T1S2	Briare	1,36	1,40	0,05	1,16	1,34	0,18

Tronçon	Limite amont	Largeur moyenne Bande active 1955-1957	Largeur moyenne Bande active 1998	Variation moyenne bande active	Enveloppe hydraulique moyenne 1955-1957	Enveloppe hydraulique moyenne 1998	Variation moyenne enveloppe hydraulique
U1T1S3	La Charité sur Loire	466	381	-77	601	513	-83
U1T1S4	Pouilly sur Loire	416	333	-83	591	504	-87
U1T2S1	St Satur	339	283	-56	504	475	-29
U1T2S2	Cosne sur Loire	381	284	-97	617	514	-103
U1T2S3	Neuvy sur Loire	369	279	-89	428	389	-39
U2T1S1	Bonny sur Loire	325	250	-76	360	303	-57
U2T1S2	Briare	264	238	-25	266	251	-16

De fortes modifications de la morphologie de la Loire ont donc eu lieu entre Cosne sur Loire et Bonny sur Loire (sous-tronçons U1T2S2 et U1T2S3).

2.3. Conclusion de l'analyse des photographies aériennes

Les résultats de l'étude des photographies aériennes sont cohérents avec ceux de Ginestet. Les évolutions repérées par Ginestet entre 1955 et 1993 se sont poursuivies jusqu'en 1998. De **La Charité sur Loire à Briare**, elles se résument essentiellement à un rétrécissement de la bande active et du lit mineur (lié à une importante végétalisation) ainsi qu'à une extension des îles. Ces évolutions sont accord avec les observations de chenalisation de la Loire faites durant cette période. A l'opposé, le secteur en **aval de Briare** s'est très peu modifié.

Le secteur compris entre **Cosne sur Loire et Bonny sur Loire**, a connu entre 1955 et 1998 des évolutions morphologiques importantes. C'est sur ce bief que la centrale de Belleville a été implantée. A première vue, il paraît logique d'attribuer ces fortes modifications aux aménagements de la centrale. Toutefois, les résultats de la partie 3 sur l'évolution du tracé en plan et de la bande active entre 1955 et 1971, ne permettent pas de conclure si rapidement. En effet, sur le secteur en amont de la centrale, les fortes modifications du tracé en plan repérées entre 1955 et 1998 avaient déjà eu lieu en 1971. Il en est de même pour la largeur de la bande active dont le rétrécissement entre 1955 et 1971 a été évalué à 100m alors qu'elle n'a diminué que de 10m entre 1971 et 1998. Pour la zone en aval de la centrale, l'engraissement des îles avait déjà été noté mais il s'est

accentué après les travaux. Par contre sur ce secteur, la réduction de la bande active s'est faite avec la même intensité entre 1955 et 1971 (-1,5m/an) qu'entre 1971 et 1998 (-1,8m/an).

Dans tous les cas, la centrale de Belleville a été implantée sur un secteur morphologique qui a connu d'importantes modifications avant les travaux. Le choix de cet emplacement comme site de centrale n'était donc pas idéal d'un point de vue de la stabilité morphologique.

3. Analyse des lignes d'eau d'étiage

L'analyse des lignes d'eau d'étiage a été réalisée en employant la méthode où les hauteurs ne sont pas modifiées. La zone étudiée débute au Bec d'Allier pour terminer 30km en aval de Lions en Sullias à Ouvrouer les Champs. Pour information, ce tronçon s'étend sur près de 150km. L'ensemble des résultats de cette partie est disponible en Annexe 7.

Ce travail a permis de distinguer plusieurs secteurs aux évolutions homogènes :

- **Du Bec d'Allier à Cosne sur Loire**, les lignes d'eau s'abaissent d'au moins 30cm entre 1986 et 2002. Une élévation est ensuite enregistrée en 2005 sur l'ensemble du secteur, à l'exception des échelles de Germigny sur Loire, La Marche et La Charité sur Loire où la tendance précédente se poursuit. Une légère remontée des niveaux d'eau est également repérable sur le secteur en 1996, mais nous pouvons attribuer cet effet à une surestimation du débit de 1995 qui nous a fait prendre en compte une faible hauteur d'eau. A noter une évolution différente à St Satur où les lignes d'eau ont d'abord augmenté entre 1986 et 1995 pour ensuite suivre les mêmes tendances que l'ensemble du secteur.
- **De Myennes à Bonny sur Loire**, les niveaux sont stables entre 1986 et 2002, et s'élèvent en 2005.
- **D'Ousson sur Loire à St Martin sur Ocre**, un enfoncement d'une vingtaine de centimètres des lignes d'eau est notable, avec une exception à Briare où les hauteurs d'eau évoluent peu. Un exhaussement est également visible en 2005 aux stations d'Ousson sur Loire et St Martin sur Ocre. A Briare et St Brisson sur Loire les niveaux sont stables entre 2002 et 2005.
- **De Gien à St Gondan**, les lignes d'eau évoluent peu.
- **De Lions en Sullias à Ouvrouer les Champs**, un enfoncement généralisé d'une trentaine de centimètres des lignes d'étiage est repérable entre 1986 et 2002. Les niveaux entre 2002 et 2005 se sont stabilisés. La limite entre le secteur précédent et celui-ci se situe plus précisément au niveau du seuil de la centrale de Dampierre. Ce seuil constitue une limite morphologique bien visible sur photographies aériennes, où nous pouvons distinguer le passage d'un style rectiligne en amont à un style plus sinueux en aval (Bouchard, communication personnelle).

En théorie, l'évolution des lignes d'eau d'étiage n'aurait pas pu être regardée après 2002 car pour les années suivantes les débits associés aux hauteurs d'eau ne sont pas incluses dans l'intervalle $[64 ; 74 \text{ m}^3/\text{s}]$. Toutefois, pour avoir un aperçu de l'évolution récente, nous avons gardé la ligne d'étiage de 2005 associée à un débit de $62,7 \text{ m}^3/\text{s}$. L'élévation ou la stabilisation du lit enregistrées sur quasiment tous les secteurs en 2005 peuvent

probablement être attribuées à la crue vicennale de décembre 2003 (Q_{\max} de 3160m³/s à Gien) qui en remobilisant une partie des sédiments de la bande active aurait permis de lisser les profils transversaux et de combler les chenaux principaux.

Sur certaines stations situées entre Bonny sur Loire et Ouvrouer les Champs, il a été possible d'observer l'évolution des lignes d'eau entre 1978 et 1986. Ces stations sont Ousson sur Loire, St Martin sur Ocre, Gien, St Père sur Loire et Guilly. Il en ressort que sur cette période les niveaux d'étiage ont peu évolué, avec même une légère tendance à l'exhaussement.

Les résultats exposés ici diffèrent de ceux de Chapuis et Foutoyet car nous avons décelé un enfoncement entre Ousson sur Loire et St Martin sur Ocre ainsi qu'en aval de Lions en Sullias.

4. Conclusion de l'étude régionale

Le sous tronçon entre **Cosne sur Loire et Neuvy sur Loire** constituait en 1955 une unité morphologique qui se distinguait des tronçons environnants par des caractéristiques et des évolutions différentes. Ce sous tronçon a ensuite connu de profondes modifications de son tracé en plan, qui se sont ralenties après la construction de la centrale. Il semble possible que l'érosion du lit après l'implantation de la centrale ait stoppé l'évolution du tracé en plan. Le sous tronçon en aval de **Neuwy sur Loire à Bonny sur Loire** a aussi subi de profondes perturbations. Le tracé en plan s'y est fortement modifié après les travaux. Par contre l'influence des aménagements y est moins flagrante sur l'évolution de la bande active. L'étude des niveaux depuis 1986 confirme que le secteur compris entre **Cosne sur Loire et Bonny sur Loire** suit une évolution qui lui est propre. Cependant, il est encore difficile de conclure sur la part des aménagements connexes à la centrale de Belleville et la part des phénomènes régionaux sur l'évolution morphologique récente du secteur de Belleville.

Au niveau de l'évolution régionale, l'étude des photos met bien en avant les indices d'une chenalisation du lit de la rivière que sont la diminution du nombre de chenaux, le rétrécissement de la bande active et la végétalisation du lit. Jusqu'en 2002 l'incision du lit était d'ailleurs toujours marquée entre le Bec d'allier et Cosne sur Loire, entre Ousson sur Loire et St Martin sur Ocre et en aval de Dampierre. Depuis les niveaux d'eau se sont soit élevés, soit stabilisés. Cette évolution récente peut sans doute être attribuée à la crue morphogène de décembre 2003.

Conclusion générale

Cette étude avait pour principal objectif de regarder l'évolution morphologique de la Loire autour de la centrale nucléaire de Belleville, et d'apprécier l'influence sur cette évolution des aménagements locaux par rapport aux processus morphologiques régionaux.

La première partie de l'étude s'est portée sur le suivi de l'évolution morphologique sur le secteur de Belleville. Il a été mis en évidence que les travaux connexes à l'implantation du CNPE ont entraîné une modification du tracé en plan au droit de la centrale et un abaissement du profil en long sur l'ensemble du secteur. Pour faire face à ces perturbations, la rivière a entamé une phase de récupération active destinée à contrebalancer l'érosion du lit. Cette période qui s'étale de la fin des travaux jusqu'au milieu des années 1990 se caractérise par d'importants processus de sédimentation. Sur cette période, l'influence des travaux sur l'évolution morphologique du site est donc prépondérante. Les tendances se sont nettement ralenties depuis. A l'heure actuelle, même si l'état d'avant construction n'a toujours pas été retrouvé, le secteur évolue moins vite.

De plus, sans que l'on puisse l'expliquer, une surélévation des niveaux a été enregistrée à Myennes. Ce constat doit faire l'objet de toutes les considérations, car il implique bien évidemment un accroissement du risque inondation pour les communes localisées en amont de la centrale.

La seconde partie de l'étude s'est attachée à caractériser l'évolution de la Loire sur 80km centrés sur Belleville. Il en ressort que la centrale a été implantée sur une zone où l'évolution morphologique était très active. Néanmoins, il n'est actuellement pas possible de départager pour l'évolution récente autour de la centrale, la contribution régionale de la récupération des travaux effectués dans le lit lors de la construction.

Les évolutions mises en avant sur les tronçons étudiés témoignent d'une chenalisation de la Loire au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle. D'après l'analyse des lignes d'étiage, l'incision du lit s'est poursuivie jusqu'en 2002 entre le Bec d'Allier et Cosne sur Loire, entre Ousson sur Loire et St Martin sur Ocre ainsi qu'entre Dampierre et Ouvrouer les Champs. Les hauteurs d'eau de 2005 laissent apparaître une élévation ou une stabilisation sur l'ensemble du tronçon étudié. Il paraît tout à fait plausible que cette évolution récente soit le fruit de la crue morphogène de 2003.

Une méthode originale été proposée pour pouvoir comparer des lignes d'étiage relevées à des débits différents. Cette dernière basée sur la comparaison de hauteurs d'eau mesurées à des débits compris dans un intervalle déterminé est applicable et opérationnelle. Les tests réalisés pour valider cette méthode ont fait apparaître des incertitudes à propos de la précision sur les cotes des lignes d'eau d'étiage de la DIREN Centre.

Bibliographie

- BABONAUX Y. 1970. *Le lit de la Loire : Etude d'hydrodynamique fluviale*. Bibliothèque nationale, Paris 252p.
- BEN SLAMA E. 1996. *Belleville sur Loire-Lignes d'eau dans la zone d'état aménagé minimum*. Rapport EDF R&D. 12p.
- BERTIER C. 2007. *Présentation des outils de traitement de bathymétries*. Rapport EDF R&D HP-76/05/018/A. 64p.
- BOUCHARD J-P, COURIVAUD J-R. 2000. *Diagnostic morphologique de la Loire à Belleville*. Rapport EDF-R&D HP-73/2000/020/A. 40p.
- BRAVARD J-P, GILVEAR D.J. 1993. « *Dynamique fluviale et Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes* » in AMOROS C, PETTS G.E. *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, Paris. pp 61-106.
- BRAVARD J-P, PETIT F. 1997. *Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial*. Armand Colin/Masson, Paris. 221p.
- CHAPUIS S. 1997. *Evolution de la ligne d'eau d'étiage de la Loire moyenne, période 1986/1996*. DIREN Centre. Rapport de, ENSEEIHT.
- COURIVAUD J-R, DUVIVIER G. 2000. *Fonctionnement hydraulique du lit de la Loire à Belleville*. Rapport EDF R&D HP-73/2000/044/A. 61p.
- COURIVAUD J-R, DUVIVIER G. 2001. *Etude de solutions d'aménagements du lit de la Loire à Belleville*. Rapport EDF R&D HP-76/2001/001/A. 16p.
- COURIVAUD J-R, DUVIVIER G. 2001. *Complément à l'étude de solutions d'aménagements du lit de la Loire à Belleville*. Rapport EDF R&D HP-76/2001/024/A. 12p.
- FOUTOYET S. 2001. *Evolution de la ligne d'eau d'étiage de la Loire moyenne*. DIREN Centre. Rapport de stage ENSHMG. 71p.
- GINESTET P. 1999. *Sectorisation géomorphologique de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean sur Loire*. 39p.
- PAUCHET T. 2007. *Evolution morphologique de la Loire Moyenne*. EDF R&D. Rapport de stage de fin d'étude, ENSEEIHT. 33p.
- PONS A. 2000. *Evolutions morphologiques du lit de la Loire dans le secteur de Belleville sur Loire*. EDF R&D. Rapport de stage de fin d'études, ENSEEIHT. 33p.
- RETHORET H. 2000. *Etat des connaissances des seuils et points durs en Loire-Campagne de localisation 2000 entre le Bec d'Allier et Nantes*. DIREN Centre. 31p.
- RODRIGUES S. 2004. *Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France)*. Thèse pour le grade de docteur à l'Université de Tours. 431p.

Table des figures

Figure 1: Localisation des centrales nucléaires sur la Loire.....	5
Figure 2 : Courbe des débits classés pour la station de Gien entre 1936 et 2008.....	7
Figure 3 : Ecart à la moyenne cumulée des débits de 1936 à 2008.....	8
Figure 4: Localisation des extractions de sédiment au droit de la centrale de Belleville.....	9
Figure 5 : Localisation des profils bathymétriques et des stations de mesure des hauteurs d'eau.....	10
Figure 6 : Présentation de la méthode de comptabilisation des chenaux.....	14
Figure 7 : Calcul de l'indice de tressage.....	14
Figure 8 : Evolution des relations hauteurs-débits entre 1977 et 2007.....	16
Figure 9 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour $Q=100\text{m}^3/\text{s}$	17
Figure 10 : Méthode de détermination du temps de propagation.....	19
Figure 11 : Méthode de reconstitution des débits de la DIREN Centre dans le cas d'une station de jaugeage en amont de l'échelle.....	19
Figure 12 : Méthode de reconstitution des débits de la DIREN Centre dans le cas d'une échelle localisée entre deux stations de jaugeage.....	19
Figure 13 : Comparaison des méthodes d'estimation des débits.....	21
Figure 14: Représentation de l'évolution des niveaux d'eau à Neuvy sur Loire et Kado7 à partir des hauteurs d'eau issues des courbes de tarage à $69\text{m}^3/\text{s}$ et à partir de la méthode sans modification des hauteurs.....	22
Figure 15 : Représentation de l'évolution des niveaux d'eau au Pont Bonny à partir des hauteurs d'eau issues des courbes de tarage à $69\text{m}^3/\text{s}$ et à partir de la méthode sans modification des hauteurs.....	23
Figure 16 : Localisation du relevé DIREN de 2005 par rapport à la courbe de tarage annuelle au Pont Bonny.....	23
Figure 17 : Evolution du bilan sédimentaire depuis 1977 à Belleville.....	24
Figure 18 : Evolution du bilan sédimentaire depuis 1977 à P15 P26, P15 P20 et P20 P26.....	26
Figure 19 : Evolution longitudinale de la largeur de la bande active entre 1955 et 2005 autour de la centrale de Belleville.....	33
Figure 20 : Evolution des points bas par rapport à 1977 sur P1 P7, P7 P15 et P15 P26.....	35
Figure 21 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour $Q=100\text{m}^3/\text{s}$	37
Figure 22 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour $Q=350\text{m}^3/\text{s}$	37
Figure 23 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$	38
Figure 24 : Evolution des niveaux d'eau en amont du seuil de Belleville pour $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$	38
Figure 25 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour $Q=100\text{m}^3/\text{s}$	40
Figure 26 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour $Q=350\text{m}^3/\text{s}$	40
Figure 27 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$	41
Figure 28 : Evolution des niveaux d'eau en aval du seuil de Belleville pour $Q=1800\text{m}^3/\text{s}$	41
Figure 29 : Présentation de la sectorisation de Ginestet en aval d'Orléans.....	46
Figure 30 : Influence de la végétalisation des îles sur la diminution de l'indice de tressage et du nombre moyen de chenaux.....	48
Figure 31: Influence de la végétalisation des îles sur l'augmentation du nombre moyen de chenaux et de l'indice de tressage.....	49

Table des tableaux

Tableau 1 : Durée moyenne annuelle de dépassement de quelques débits caractéristiques.....	7
Tableau 2 : Présentation des données disponibles sur les stations de mesures de hauteur d'eau autour de Belleville.....	15
Tableau 3 : Taux de sédimentation et intensité de sédimentation sur les tronçons P1 P26, P1 P7, P7 P15, P15 P26 pour les périodes 1985-1996 et 1996-2006.....	25
Tableau 4 : Largeur moyenne de la bande active par zone d'étude et par année.....	33
Tableau 8 : Synthèse de l'étude locale.....	43
Tableau 6 : Evolution longitudinale de l'indice de tressage, du nombre moyen de chenaux, de la bande active et de l'enveloppe hydraulique.....	51

Table des matières

Résumé	2
Abstract	2
Introduction	3
Partie1 : Présentation de l'entreprise et cadre général de l'étude	4
1. <i>Présentation de l'entreprise</i>	4
1.1. Présentation du groupe EDF	4
1.2. Présentation du pôle recherche et développement	4
1.3. Présentation du Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.....	4
2. <i>Cadre de l'étude</i>	5
2.1. Contexte général	5
2.2. Présentation de la Loire	6
2.3. Régime hydrologique.....	6
2.3.1. Débits caractéristiques	6
2.3.2. Débits classés	7
2.3.3. Caractéristiques hydrologiques de la période 1979-2008	7
2.4. Localisation du site de l'étude	8
2.5. Aménagements liés à la construction du CNPE	8
2.6. Objectifs du stage	9
Partie 2 : Matériels et méthodes.....	11
1. <i>Bathymétrie</i>	11
1.1. Recueil des données.....	11
1.2. Traitement des données	11
1.2.1. Outils bathymétriques	11
1.2.2. Taux de sédimentation et intensité de sédimentation.....	12
2. <i>Analyse des photographies aériennes</i>	12
2.1. Données utilisées	12
2.2. Traitement des photographies	13
2.2.1. Analyse du tracé en plan	13
2.2.2. Analyse de la largeur de la bande active	13
2.2.3. Analyse de la largeur de l'enveloppe hydraulique	13
2.2.4. Nombre moyen de chenaux.....	13
2.2.5. Indice de tressage	14
2.2.6. Paramètres mesurés sur chaque étude	14
3. <i>Niveaux d'eau</i>	15
3.1. Etude locale	15
3.1.1. Recueil des données	15
3.1.2. Traitement des données.....	15
3.2. Etude régionale	17
3.2.1. Méthode des gradients	17
3.2.2. Méthode d'analyse de niveaux d'eau sans modification des hauteurs	18
1) Principes	18
2) Données utilisées.....	18
2)a. Les niveaux d'eau.....	18
2)b. Les débits.....	18
3) Application de la méthode sans modification des hauteurs d'eau.....	21
3.2.3. Validité de la méthode d'analyse des lignes d'eau d'étiages sans modification des hauteurs d'eau	22

Partie 3 : Suivi de l'évolution morphologique de la Loire sur le secteur de Belleville	24
1. <i>Evolution de la bathymétrie.....</i>	24
1.1. Evolution du bilan sédimentaire	24
1.2. Remarque sur l'évolution du bilan sédimentaire de P15 P26	26
1.3. Evolution des sections mouillées	26
1.4. Conclusion de l'analyse des bathymétries	27
2. <i>Evolution du tracé en plan</i>	27
2.1. Evolution de 1955-1957 à 1971	27
2.2. Evolution de 1971 à 1983	28
2.3. Evolution de 1983 à 1998	29
2.4. Evolution de 1971 à 1998	29
2.5. Evolution de 1998 à 2002	30
2.6. Evolution entre 2002 et 2005	31
2.7. Conclusion de l'analyse de l'évolution du tracé en plan	32
3. <i>Evolution de la bande active</i>	33
3.1. Résultats et interprétations des mesures de largeur de bande active.....	33
3.2. Conclusion de l'évolution de la bande active	35
4. <i>Evolution des points bas.....</i>	35
5. <i>Evolution des niveaux d'eau.....</i>	36
5.1. Echelles en amont du seuil.....	36
5.2. Echelles en aval du seuil	39
5.3. Conclusion de l'analyse des niveaux d'eau	42
6. <i>Conclusion sur l'évolution morphologique du secteur de Belleville.....</i>	43
Partie 4 : Suivi de l'évolution morphologique de la Loire à une échelle régionale.....	45
1. <i>Synthèse bibliographique</i>	45
1.1. Evolution morphologique : étude de P. Ginestet (1999).....	45
1.1.1. Principe de la sectorisation.....	45
1.1.2. Localisation du secteur de Belleville et de la zone d'étude	45
1.1.3. Evolution morphologique entre 1955 et 1993.....	46
1.2. Evolution de la ligne d'eau d'étiage	47
1.2.1. Etude de S. Chapuis (1997).....	47
1.2.2. Etude de S. Foutoyet (2001)	47
2. <i>Analyse des photographies aériennes.....</i>	47
2.1. Evolution de la morphologie de la Loire entre 1955 et 1998 par sous-tronçon.....	47
2.1.1. U1T1S3 : La Charité sur Loire à Pouilly sur Loire.....	47
2.1.2. U1T1S4 : Pouilly sur Loire à St Satur	48
2.1.3. U1T2S1 : St Satur à Cosne sur Loire	48
2.1.4. U1T2S2 :Cosne sur Loire à Neuvy sur Loire.....	49
2.1.5. U1T2S3 : Neuvy sur Loire à Bonny sur Loire.....	50
2.1.6. U2T1S1 : Bonny sur Loire à Briare	50
2.1.7. U2T1S2 : Briare à Lions en Sullias.....	50
2.2. Analyse de l'évolution longitudinale de l'indice de tressage, du nombre moyen de chenaux, de la bande active et de l'enveloppe hydraulique.....	50
2.3. Conclusion de l'analyse des photographies aériennes	51
3. <i>Analyse des lignes d'eau d'étiage</i>	52
Les résultats exposés ici diffèrent de ceux de Chapuis et Foutoyet car nous avons décelé un enfoncement entre Ousson sur Loire et St Martin sur Ocre ainsi qu'en aval de Lions en Sullias.....	53
4. <i>Conclusion de l'étude régionale.....</i>	53
Conclusion générale.....	54

Bibliographie.....55

Table des figures56

Table des tableaux56

Table des matières57

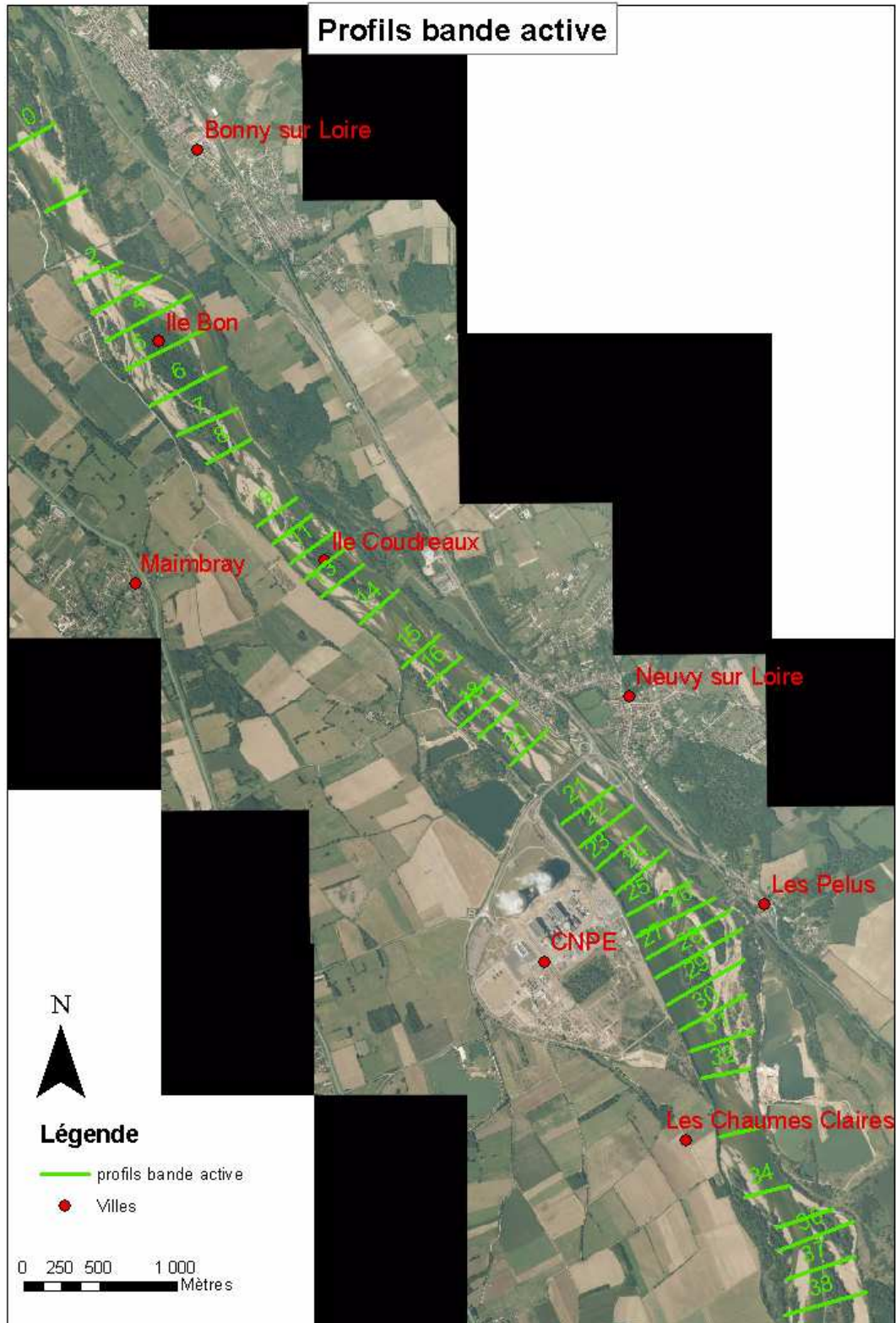
Annexes.....60

Annexes

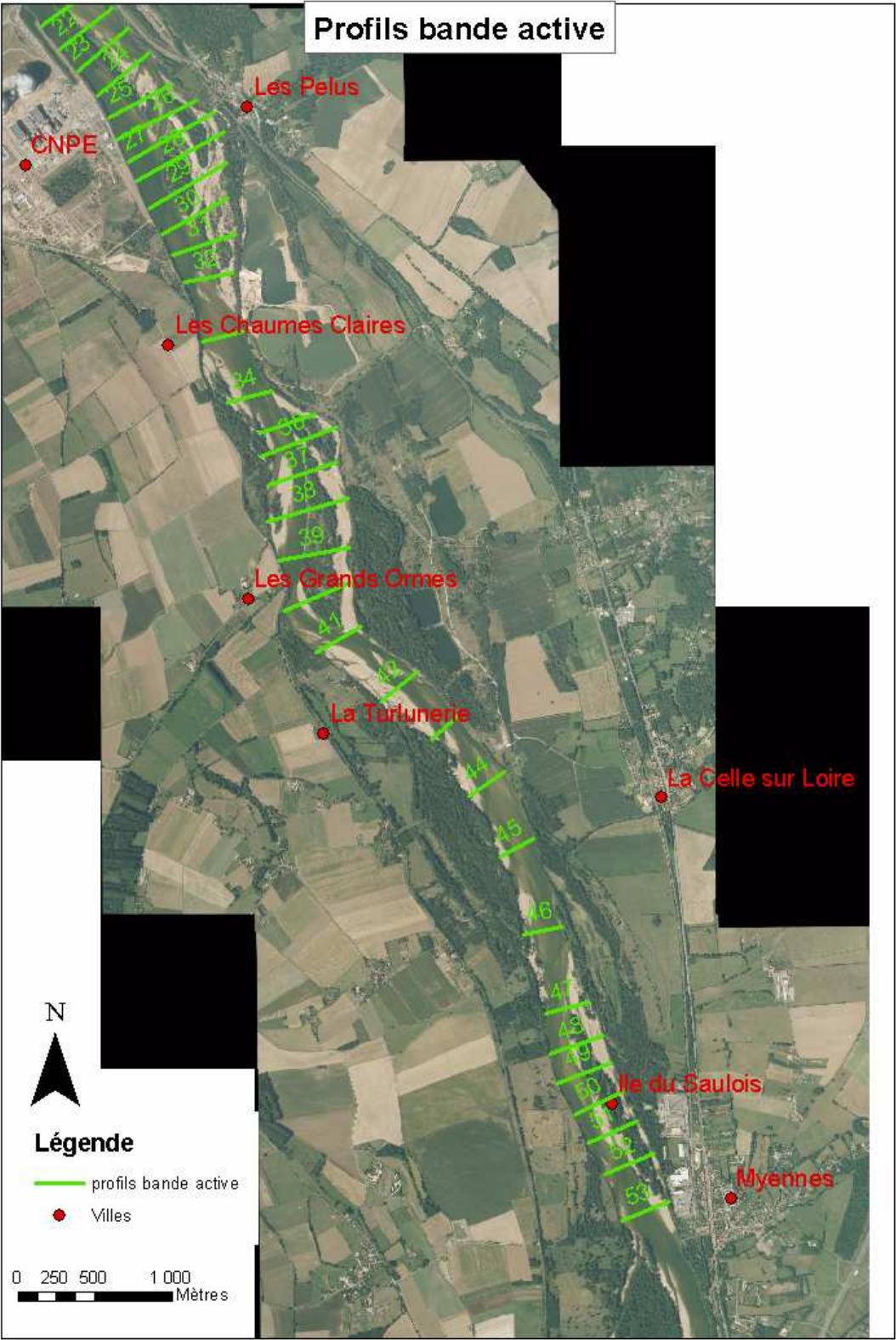
Annexe 1 : Profils ayant servis à l'étude de la bande active sur le secteur de Belleville	61
Annexe 2 : Méthode des gradients.....	63
Annexe 3 : Evolution du tracé en plan	69
Annexe 4 : Limites amont-aval des entités de la sectorisation de GINESTET (1999).....	85
Annexe 5 : Synthèse des résultats de l'étude de Ginestet	86
Annexe 6 : Synthèse de l'analyse des photographies aériennes entre 1955-1957 et 1998 entre la Charité sur Loire et Lions en Sullias.....	87
Annexe 7 : Résultats de l'analyse des lignes d'eau d'étiage entre Cours les Barres et Ouvrouer les Champs par la méthode sans modification des hauteurs.....	88

Annexe 1 : Profils ayant servi à l'étude de la bande active sur le secteur de Belleville

Secteur aval



Secteur amont



Annexe 2 : Méthode des gradients

1. Objectifs

La méthode des gradients cherche à compenser les variations de niveau dues aux variations de débit lors de la mesure, de façon à se ramener à un niveau pour un débit de référence unique.

2. Principe de la méthode

La méthode des gradients repose sur l'hypothèse qu'à bas débit, la pente des courbes de tarage d'une même station ne varie pas dans le temps.

Un gradient (ou pente) défini à une station, doit permettre de projeter une mesure de niveau d'eau (associée à un débit) vers une nouvelle cote à un débit de référence (Cf. Figure 1).

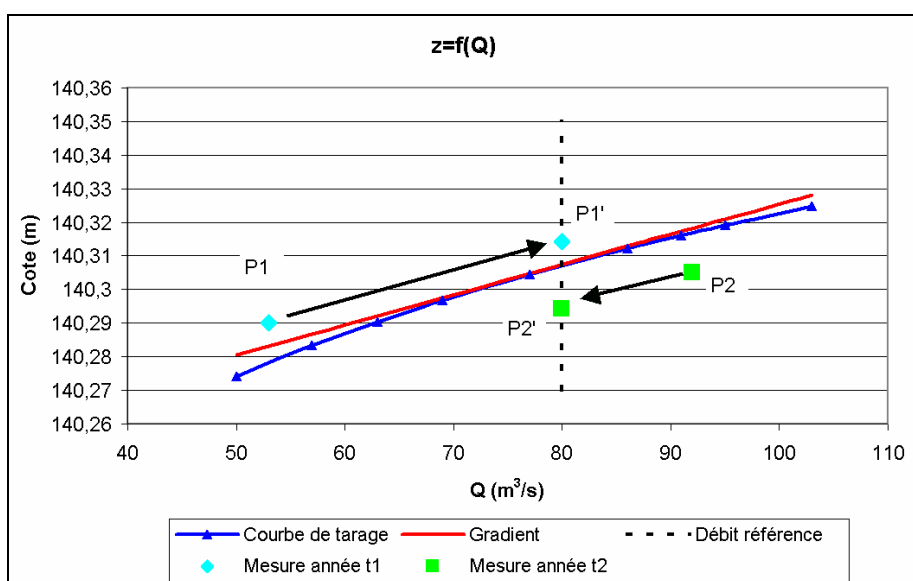


Figure 1 : Application de la méthode des gradients

Les mesures P1 et P2 sont projetées selon la pente du gradient (en rouge), vers un débit de référence, pour lequel nous obtenons les points P1' et P2'. Ces derniers étant sur la même abscisse, il est alors possible de comparer leurs cotes respectives.

3. Application de la méthode des gradients

3.1. Choix du débit de référence

Le débit de référence a été arrêté à 80 m³/s car il correspond au débit d'objectif de soutien d'étiage des barrages réservoir de Naussac et de Villerest.

3.2. Calcul du gradient

Concrètement, le gradient à une échelle correspond à la pente de la courbe de tarage pour les faibles débits.

L'idéal pour calculer un gradient serait d'avoir, pour une année donnée, plusieurs étiages avec différents débits de manière à encadrer le débit référence et calculer le gradient sur une gamme étendue de débits. Or les données récoltées par la DIREN Centre ne nous permettent pas de déterminer un gradient à partir des mesures de hauteur d'eau d'une seule année. Dans le meilleur des cas, nous disposons de plusieurs relevés annuels en 1988, 1989 et 1996. Malheureusement ces années là, les hauteurs d'eau ont été mesurées à des débits proches.

Il faut nécessairement regrouper deux ou trois années pour obtenir une gamme étendue de débits (c'est à dire un intervalle allant de 60 à 100m³/s). Nous avons ainsi associé deux ou trois années qui offraient un intervalle de débit étendu, en essayant d'y inclure les années avec plusieurs relevés annuels. Ce regroupement des données est possible si l'on fait l'hypothèse que la morphologie du lit varie peu d'une année sur l'autre.

Sur la majorité des échelles un gradient a pu être calculé pour 1994-1996. Selon la fréquence des relevés, des gradients ont aussi pu être déterminés pour 1988-1989 et pour 2002-2004.

Une fois le gradient déterminé, la méthode s'applique sur chaque mesure de hauteur d'eau selon la translation suivante :

$$h_{\text{gradient}}(Q_{\text{référence}}) = h_{\text{mesurée}}(Q_t) - \text{gradient} \cdot (Q_t - Q_{\text{référence}})$$

avec $h_{\text{gradient}}(Q_{\text{référence}})$ la hauteur d'eau obtenue par la méthode des gradients au débit de référence, $h_{\text{mesurée}}(Q_t)$ la cote de la ligne d'eau mesurée sur l'échelle à l'instant t, gradient la pente du gradient, Q_t le débit à l'instant t et $Q_{\text{référence}}$ le débit référence.

4. Validité de la méthode d'analyse des lignes d'eau d'étiages sans modification des hauteurs d'eau

Avant d'appliquer la méthode des gradients, nous avons d'abord cherché à vérifier la validité de ses résultats. Cette partie retrace notre démarche.

4.1. Influence des débits sur les résultats

Pour déduire l'influence des débits sur la valeur des hauteurs d'eau calculées, nous avons appliqué la méthode des gradients sur des échelles où nous disposions de débits issus d'une station de jaugeage proche ainsi que de débits reconstitués par notre méthode (Q_{stage}) et celle de la DIREN Centre (Q_{DIREN}) (Cf. partie 2, §3.2.1).

Les échelles concernées sont Cours les Barres, Neuvy sur Loire (juste en aval de la station de Belleville), et lions en Sullias (en aval de Dampierre).

Théoriquement, les débits mesurés aux stations de jaugeage sont les débits réels (aux incertitudes de mesures près). Autrement dit, les hauteurs d'eau obtenues par la méthode des gradients (h_{gradient}) avec ces débits sont les plus proches des niveaux d'eau réels. Ces hauteurs d'eau nous ont servi de référence pour l'évaluation des écarts liés aux débits. Les résultats des calculs sont regroupés dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Comparaison des $h_{\text{gradient}}(Q80)$ moyens calculés à partir de débit issus de sources différentes

	Provenance des débits	Débit moyen mesuré pour les étiages sur la période 1986-2006 (en m ³ /s)	$h_{\text{gradient}}(Q80)$ moyen calculé sur la période 1986-2006 (en m)	$h_{\text{gradient}}(Q_{\text{station}}) - h_{\text{gradient}}()$ (en m)
Cours les Barres	Qstation	68,9	163,54	
	Qstage	72,6	163,50	-0,04
	QDIREN	69,2	163,57	0,03
Neuvy sur Loire	Qstation	66,1	132,77	
	Qstage	71,8	132,74	-0,03
	QDIREN	72,7	132,72	-0,05
Lions en Sullias	Qstation	71,9	114,53	
	Qstage	71,7	114,51	-0,02
	QDIREN	74,3	114,56	0,03

Il ressort du tableau ci-dessus que les écarts entre les débits n'excèdent pas 10% et que ces écarts influencent peu le calcul des niveaux d'eau. La méthode des gradients est donc peu sensible aux débits.

Notre méthode de reconstitution des débits et celle de la DIREN Centre sont applicables avec la méthode des gradients.

4.2. Influence du gradient sur les résultats

4.2.1. Estimation du biais

L'objectif ici est d'estimer le biais lié à l'utilisation de la méthode des gradients. Nous entendons ici par biais, la différence de cote entre la hauteur d'eau calculée au débit de référence par la méthode des gradients et l'altitude à ce même débit estimée à partir des courbes de tarage.

Pour ce faire, nous avons utilisé les courbes de tarage annuelles depuis 1981 (calées pour des bas débits) sur les stations de Myennes, La Celle sur Loire, Les Chaumes Claires, Neuvy sur Loire, Kado7, Pont Bonny et Les Loups. Nous pouvons ainsi comparer les résultats issus de la méthode des gradients avec les valeurs données par les courbes de tarage.

La méthode employée ici est résumée sur la figure suivante :

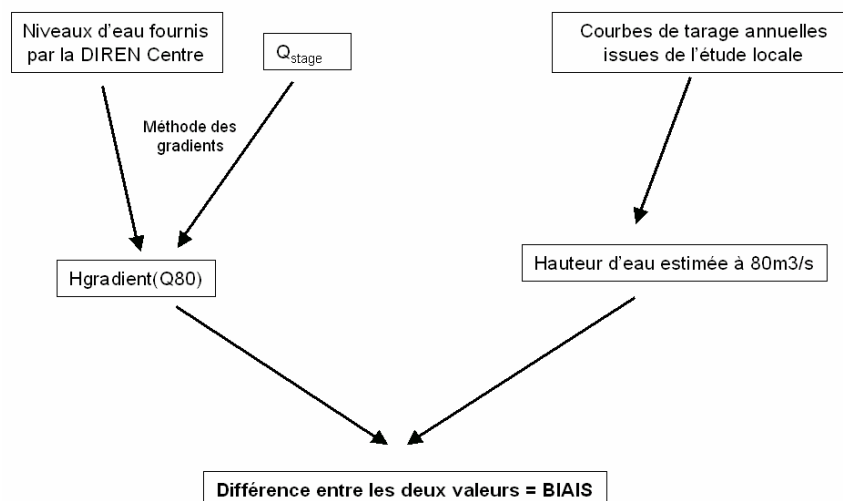


Figure 2 : Caractérisation du biais lié à la méthode des gradients

Remarque : aucun gradient n'a pas pu être défini aux Chaumes Claires en raison d'un manque de relevés. Il n'a également pas été possible de caler correctement un gradient à La Celle sur Loire.

4.2.2. Calcul de Biais pour un débit de référence de $80\text{m}^3/\text{s}$

Les résultats des calculs des biais sur plusieurs années à un débit de référence de $80\text{m}^3/\text{s}$ sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Détermination du biais moyen sur les échelles de Belleville pour un débit de référence de $80\text{m}^3/\text{s}$

Gradient	Myennes	Neuvy sur Loire	Kado7	Pont Bonny	Les Loups
1988-1989					-7cm (6cm)
1994-1996		3cm (5cm)		8cm (15cm)	-5cm (6cm)
2002-2004	-5cm (4cm)	2cm (4cm)	-7cm (10cm)	3cm (11cm)	-4cm (7cm)

Les valeurs entre parenthèse sont les écart types des biais.

Le tableau ci dessus montre que le biais moyen lié à l'utilisation de la méthode des gradients pour un débit de référence de $80\text{m}^3/\text{s}$ oscille autour de 5cm. A Myennes, Neuvy sur Loire et Les Loups les écarts types sont du même ordre de grandeur que le biais moyen ce qui se traduit par des différences d'altitudes pouvant atteindre la dizaine de centimètres.

A Pont Bonny, avec le gradient de 1994-1996, le biais moyen atteint 8cm avec un écart type de 15cm, ce qui représente un écart entre certains niveaux mesurés et calculés de 30cm ! Ce résultat s'explique par une pente du gradient sensiblement différente des pentes des courbes de tarage. Ce cas est représenté sur le graphique suivant, où nous voyons que le gradient (en noir) déterminé à partir des relevés de 1994 à 1996 suit une pente différente des courbes de tarage de 1994 et 1996 (en rouge et orange). Cette différence provient d'une mesure (en vert, relevé de 1994) qui influence très fortement le tracé du gradient. Ce point de 1994 est situé 40cm au dessus de la courbe de tarage (qui nous devons l'avouer est ici peu représentative à cause d'un manque de relevé à bas débit durant cette année). Il semble donc qu'il existe des erreurs de mesure dans les données de la DIREN.

Nous observons également, dans le tableau 2, au Pont Bonny un biais moyen moins important avec le gradient de 2002-2004. Cette réduction du biais s'explique par un gradient (en bleu sur la Figure 3) plus proche de la pente de la courbe de tarage.

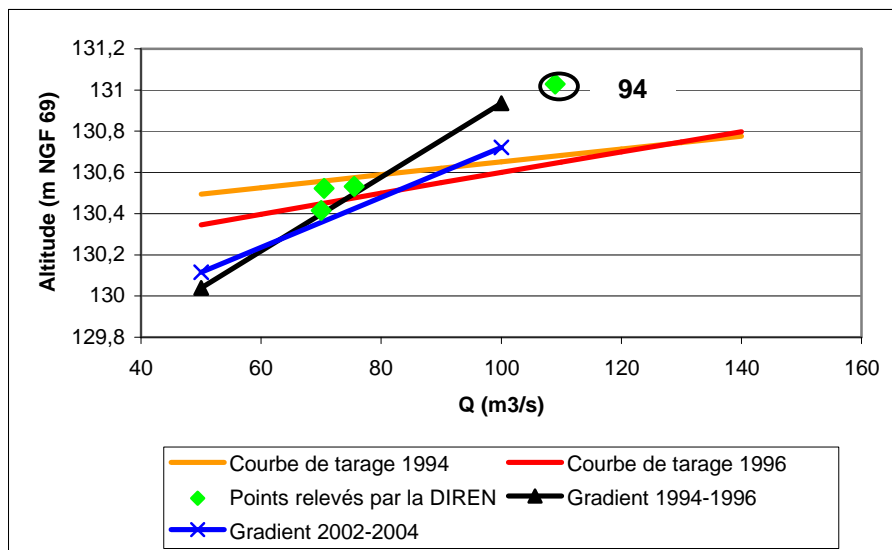


Figure 3 : Illustration d'une forte différence de pente entre le gradient de 1994-1996 et la courbe de tarage de 1996 à Pont Bonny

Les biais résultants de gradients différents sont évidemment bien visibles sur le tracé des courbes d'évolutions temporelles des niveaux d'eau (Cf. Figure 4).

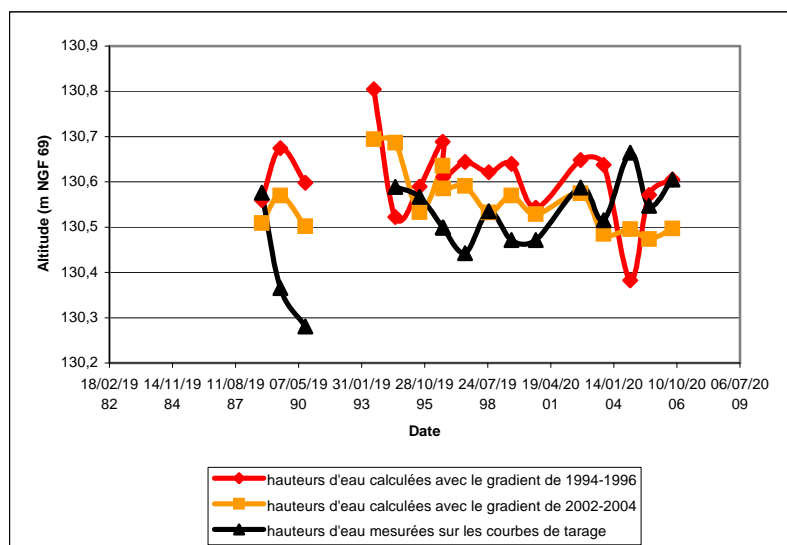


Figure 4 : Comparaison entre 1987 et 2006 des évolutions des niveaux d'eau obtenues à partir de deux gradients différents à Pont Bonny

La figure ci-dessus montre également que plus un gradient est fort (ici 1994-1996) et plus les fluctuations de niveau sont importantes (courbe en rouge). Ce constat sur les oscillations peut avoir toute son importance car de fortes fluctuations des niveaux d'eau peuvent masquer certaines évolutions.

4.2.3. Calcul de Biais pour un débit de référence de 67m³/s

Etant contraint à cause d'un manque de relevé, nous ne pouvons affiner davantage les gradients. La seule solution qui nous reste pour réduire les biais consiste à modifier le débit de référence. De plus, l'observation des valeurs de débit montre qu'ils fluctuent plus entre 65 et 70m³/s qu'autour de 80m³/s. Ce constat est validé par les médianes des débits des échelles de Belleville qui tournent autour de 67m³/s. En théorie, la projection des hauteurs d'eau mesurées vers un débit de référence plus proche des débits réels, doit permettre de réduire les biais.

Les résultats du calcul des biais moyens à 67m³/s sont rassemblés dans le tableau qui suit :

Tableau 3 : Détermination du biais moyen sur les échelles de Belleville pour un débit de référence de 67m³/s

Gradient	Myennes	Neuvy sur Loire	Kado7	Pont Bonny	Les Loups
1988-1989					-8cm (6cm)
1994-1996		-1cm (5cm)		-9cm (15cm)	-9cm (7cm)
2002-2004	-7cm (4cm)	0cm (4cm)	-2cm (10cm)	-6cm (12cm)	-9cm (7cm)

Les biais moyens ne sont améliorés qu'à Neuvy sur Loire et Kado7. Cela démontre que l'influence du gradient est prépondérante sur le choix du débit de référence.

5. Conclusion sur la méthode des gradients

La validité de la méthode est conditionnée par le choix du gradient.

Un gradient ne présentant pas une pente proche des courbes de tarage engendre des erreurs sur les hauteurs d'eau calculées ainsi que sur leurs évolutions.

Or actuellement les données disponibles ne permettent pas de définir correctement un gradient car les lignes d'eau d'étiages disponibles n'offrent pas plusieurs relevés annuels de niveau d'eau sur des gammes étendues de débits. Le besoin d'avoir plusieurs relevés la même année se justifie par le rejet de l'hypothèse sur la fixité de la morphologie entre deux années consécutives.

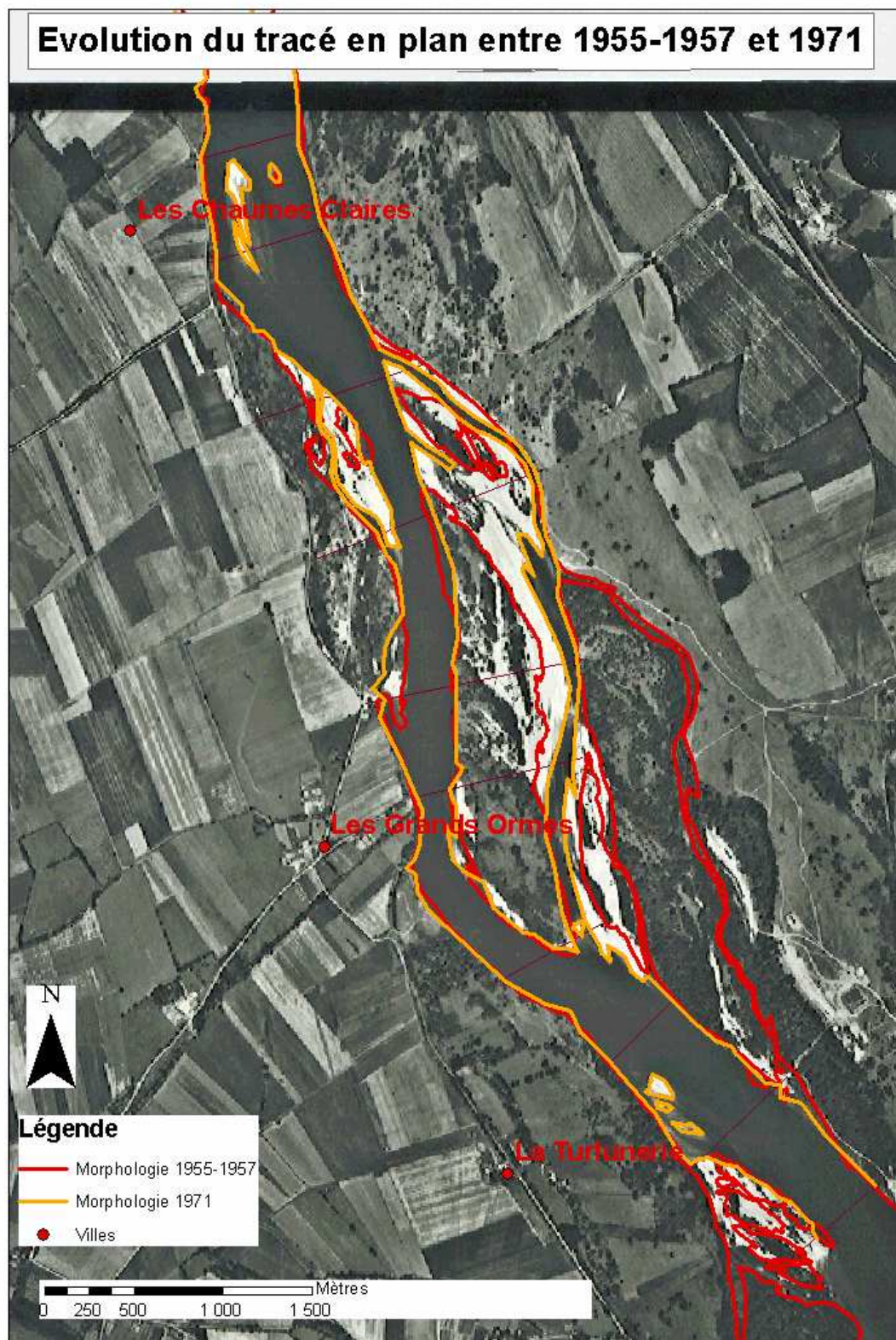
Sans gradients corrects, la méthode des gradients ne peut pas être validée car elle introduit plus d'erreurs qu'elle n'en supprime.

Il semble également que des erreurs sur les mesures de niveaux d'eau existent, car des points ne coïncidant pas avec les tendances des courbes de tarage ont été mis en évidence. Cela soulève le problème de la fiabilité des échelles pour les débits d'étiage. Or si les données à la base sont faussées, l'étude des lignes d'étiage paraît problématique et difficilement réalisable.

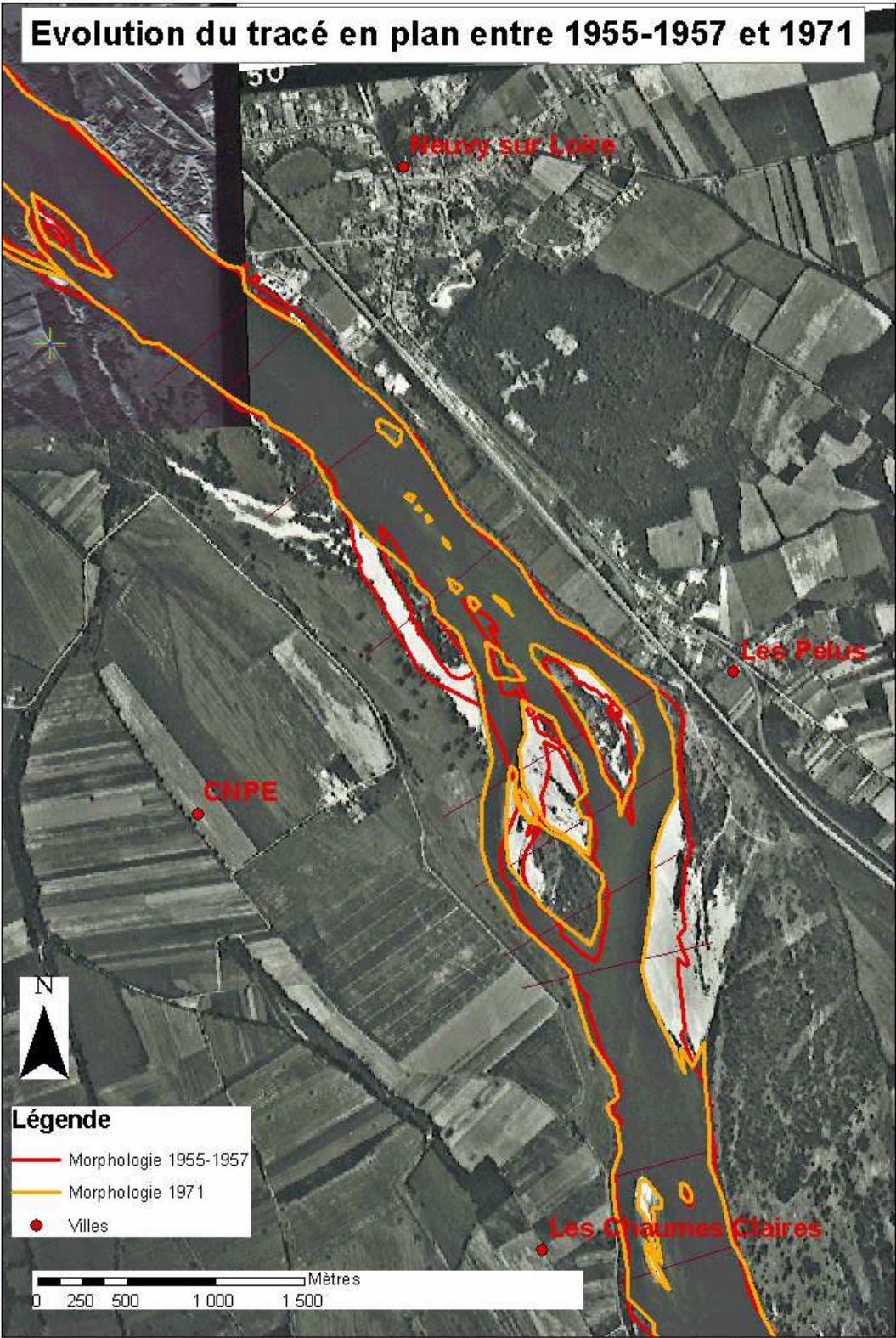
Annexe 3 : Evolution du tracé en plan

Annexe 3.1 : entre 1955-1957 et 1971

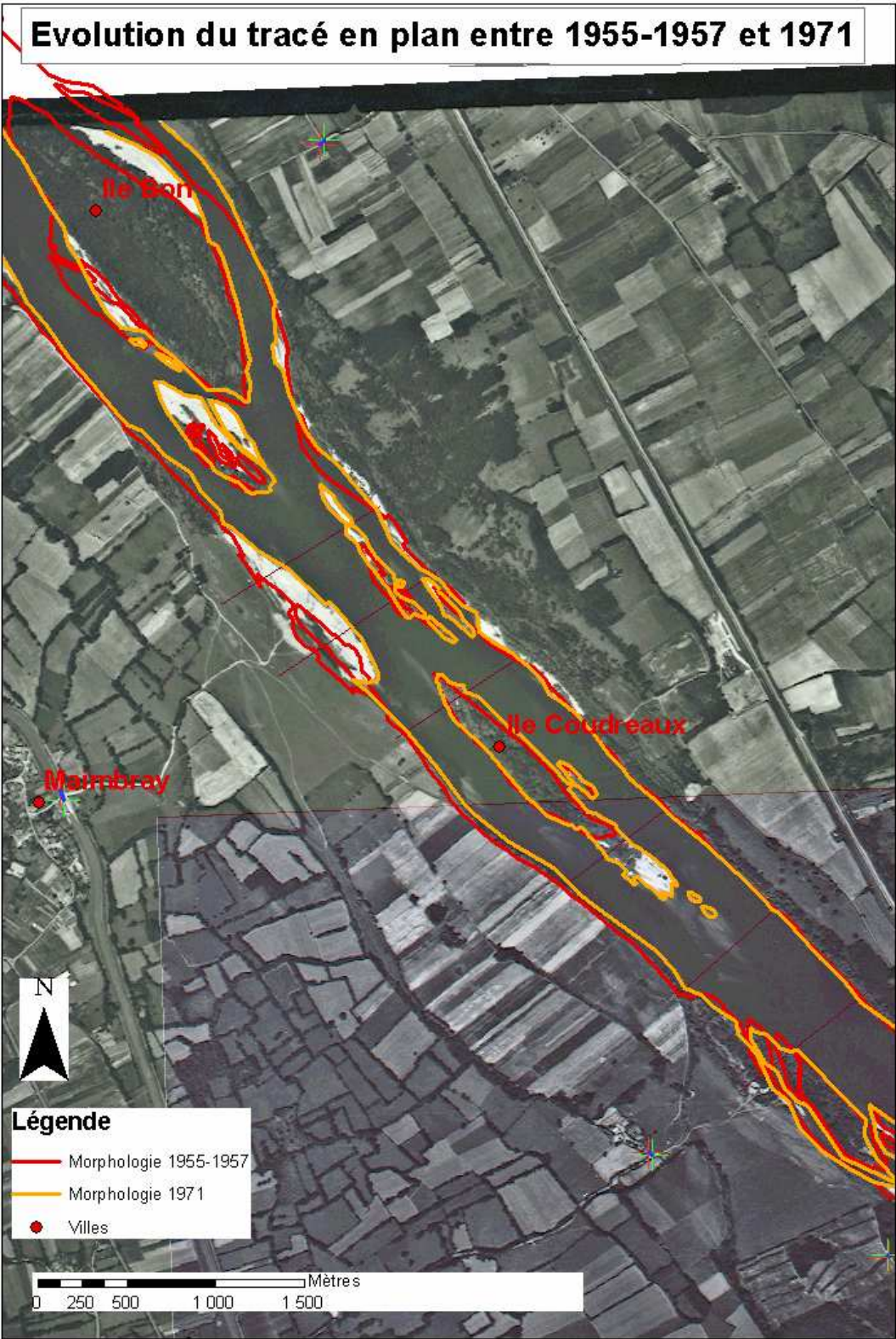
Zone en amont de la centrale



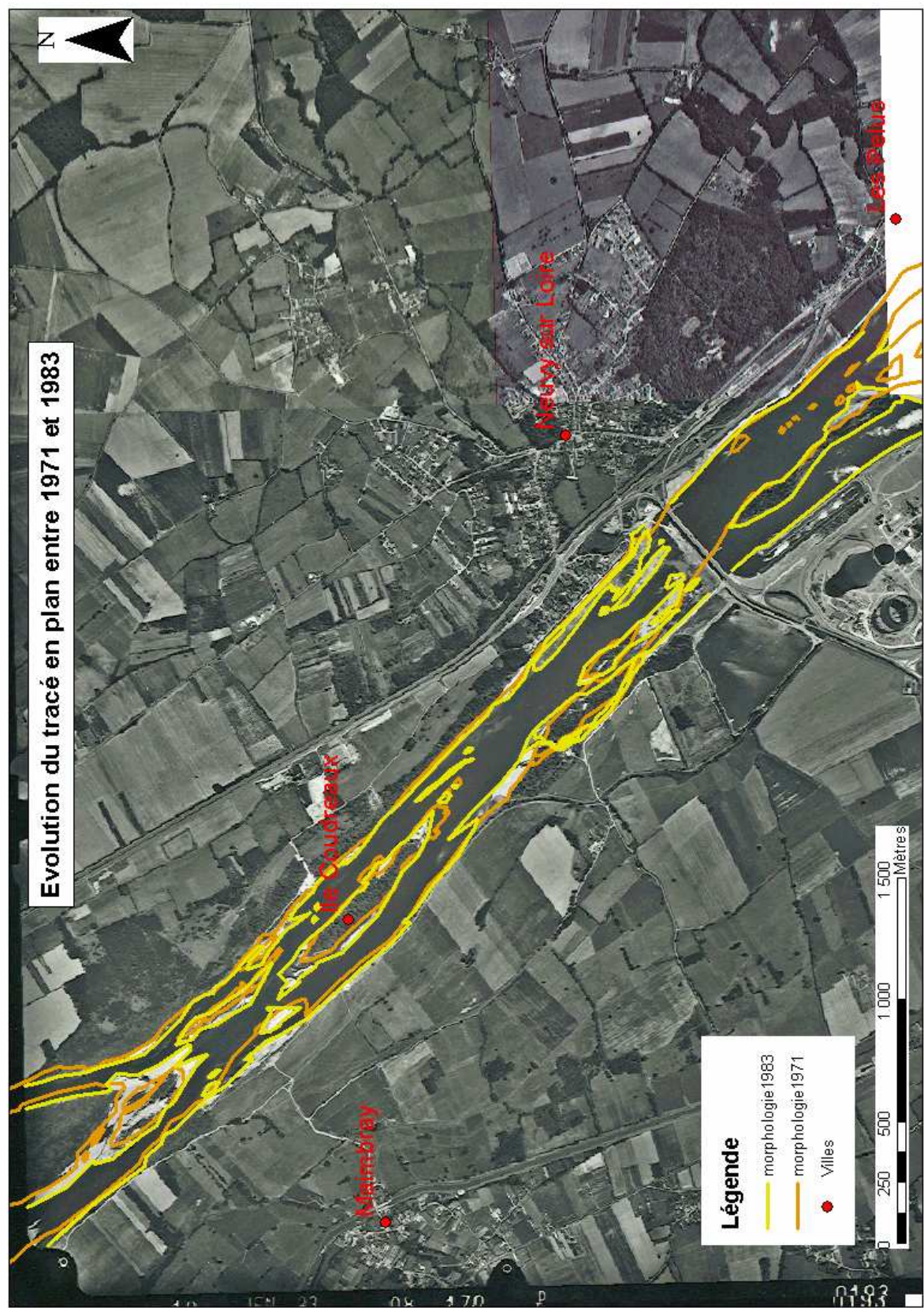
Zone au droit de la centrale



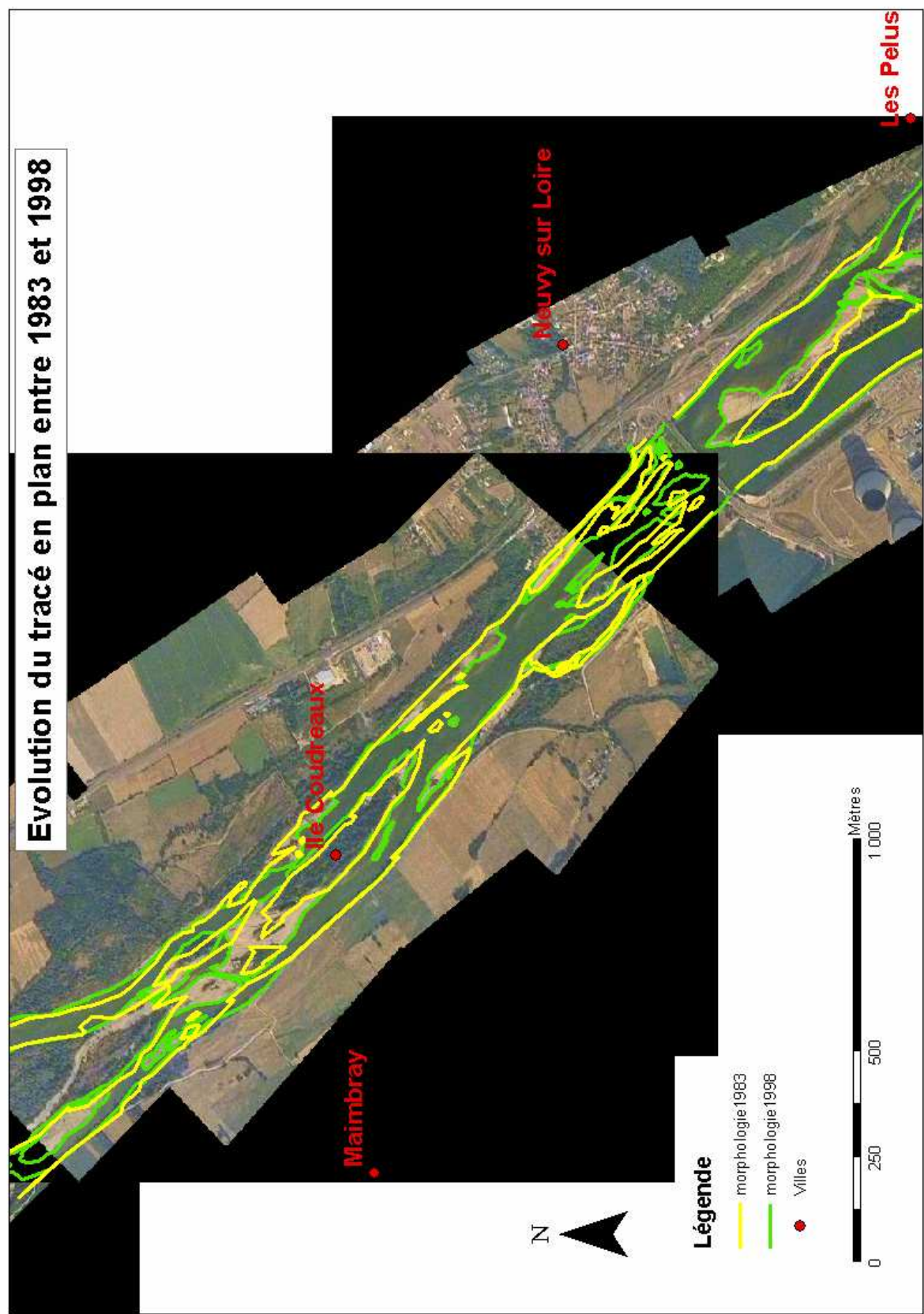
Zone en aval de la centrale



Annexe 3.2 : entre 1971 et 1983

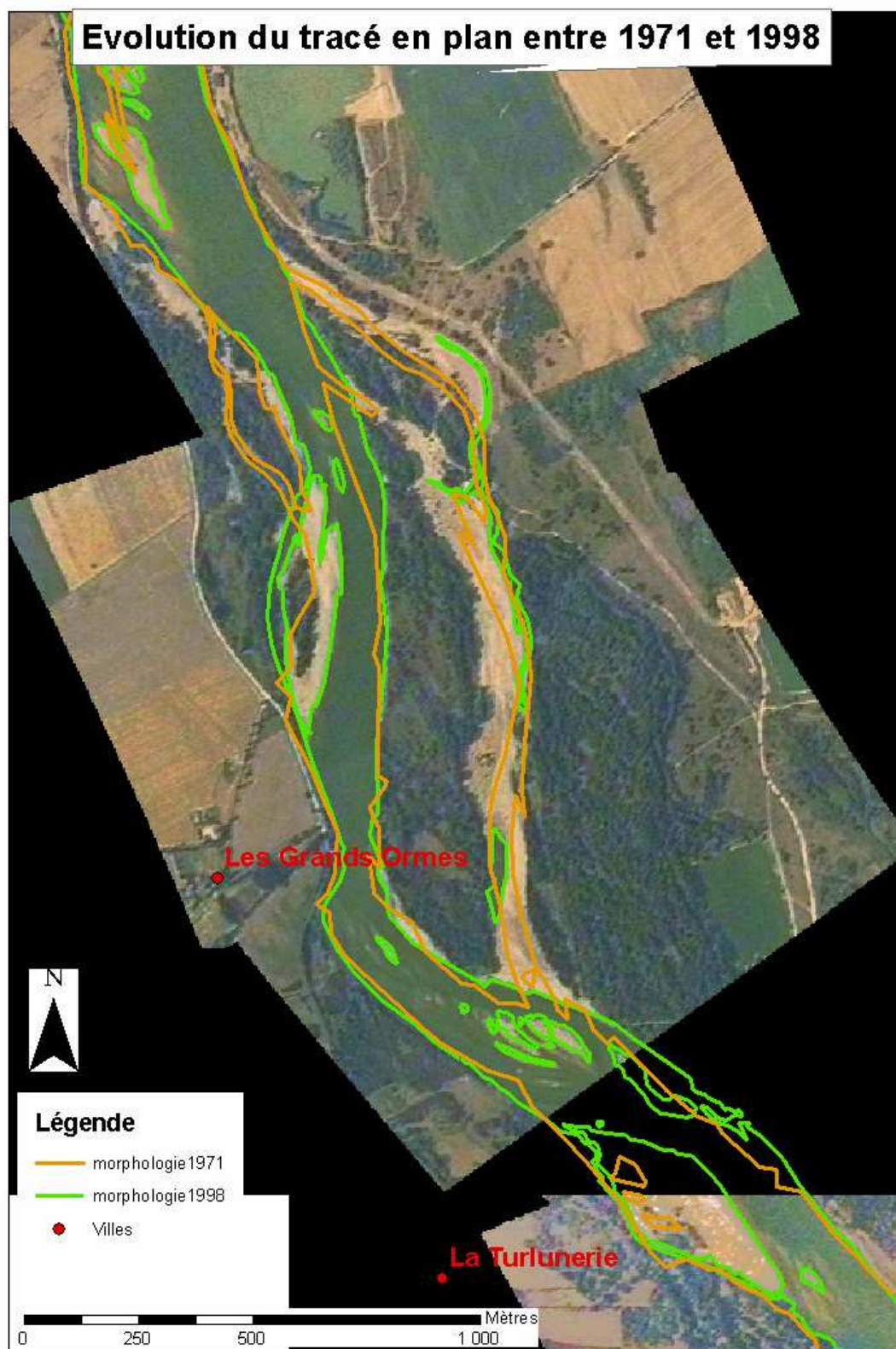


Annexe 3.3 : entre 1983 et 1998

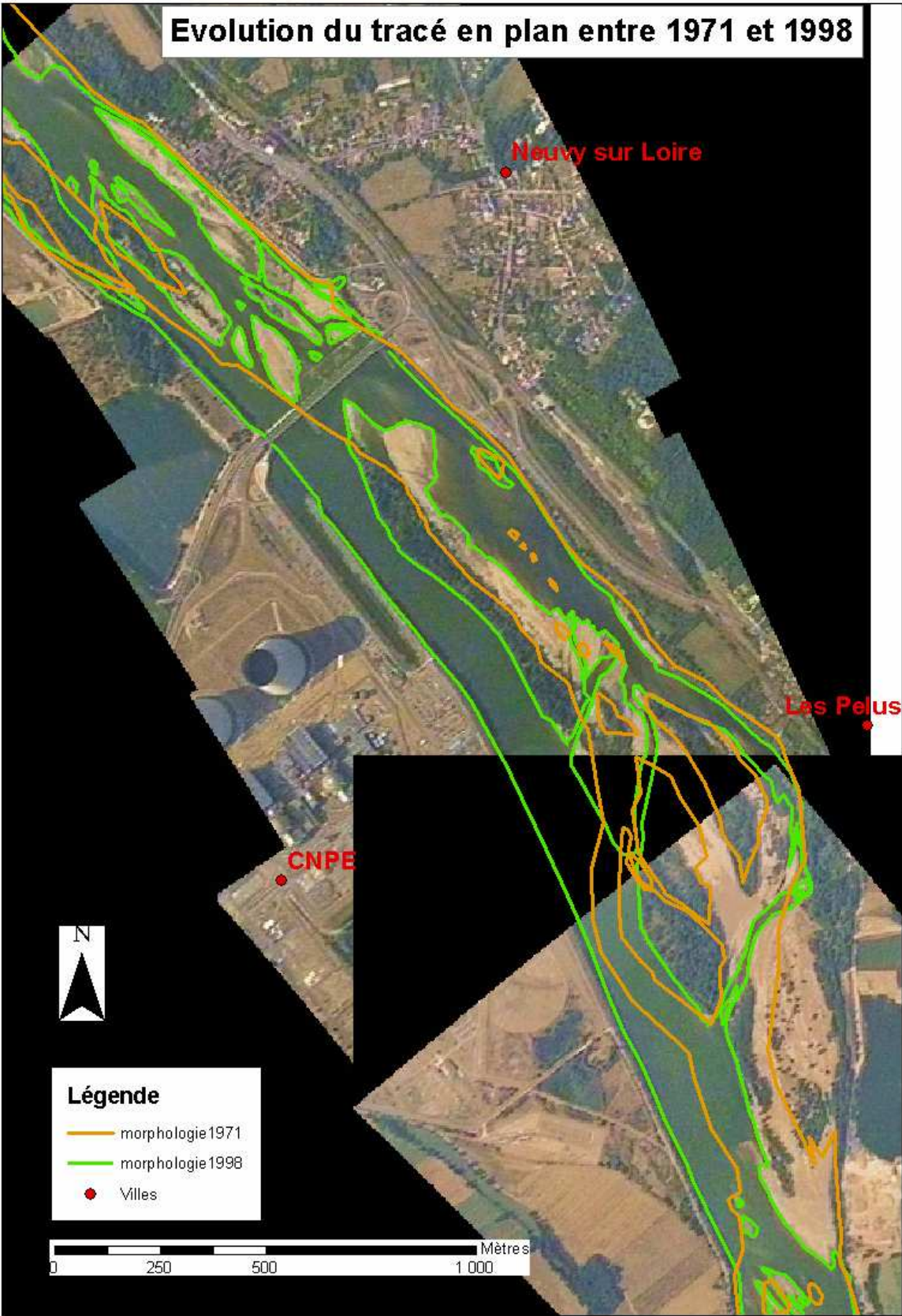


Annexe 3.4 : entre 1971 et 1998

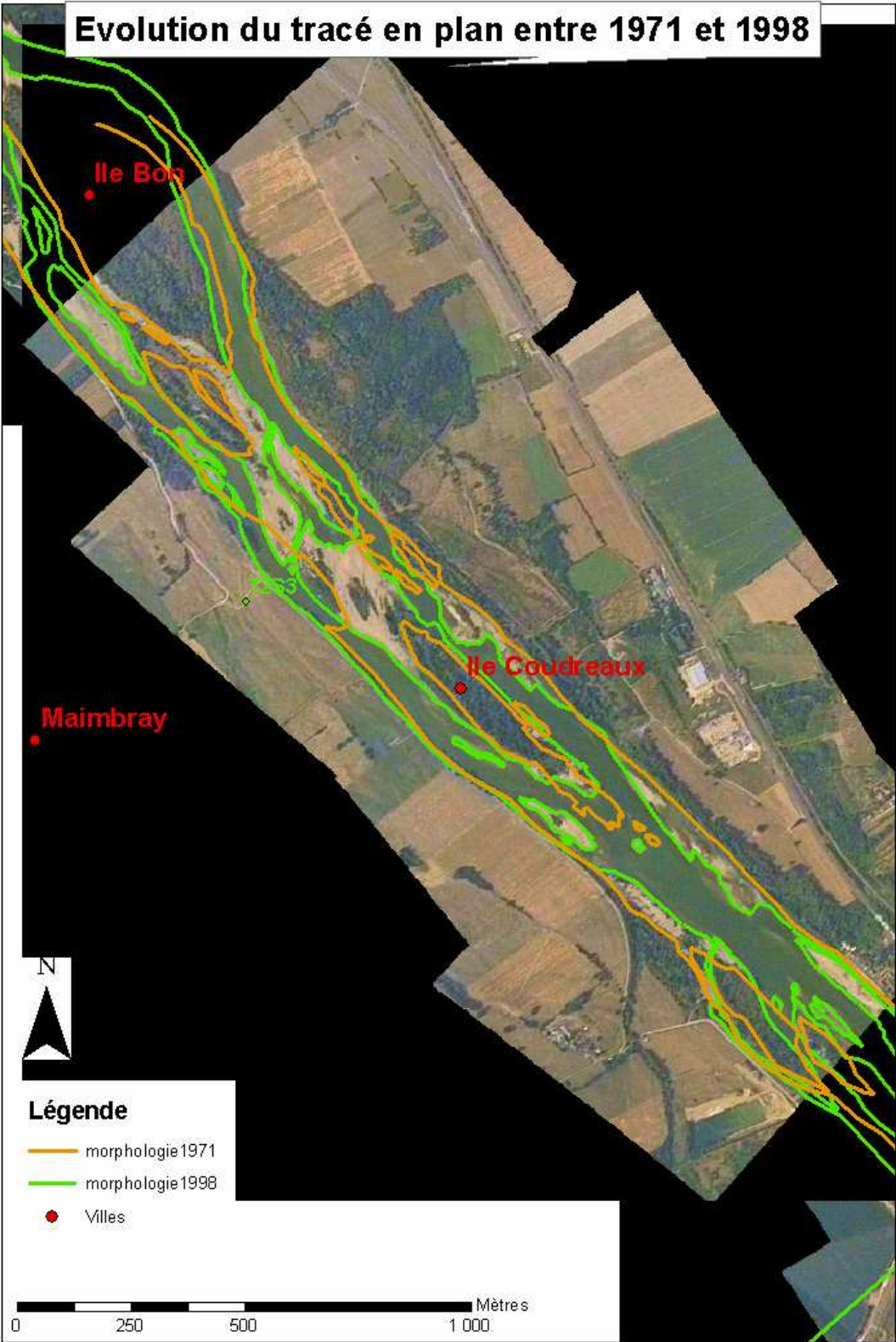
Zone en amont de la centrale



Zone au droit de la centrale

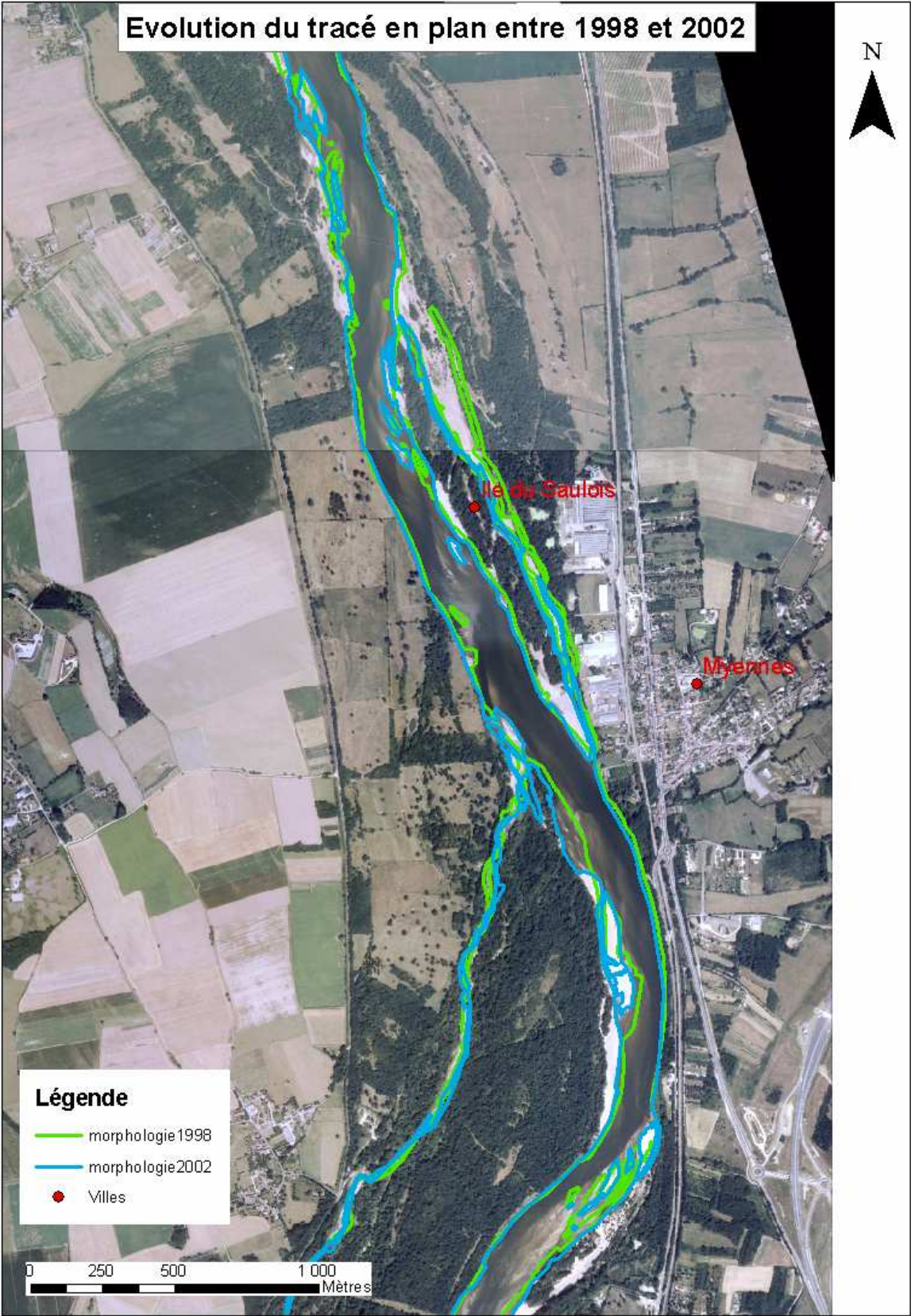


Zone en aval de la centrale

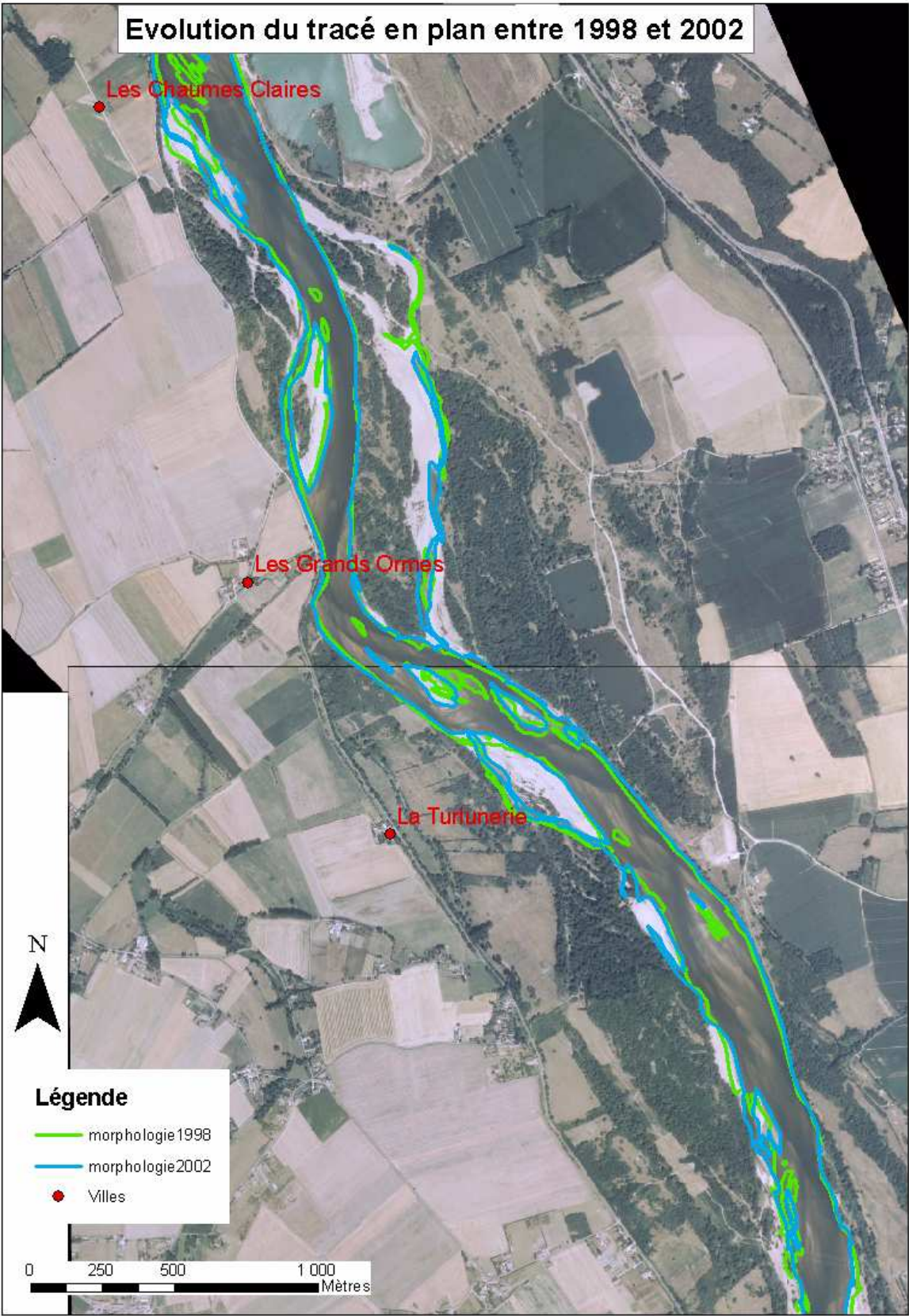


Annexe 3.5 : entre 1998 et 2002

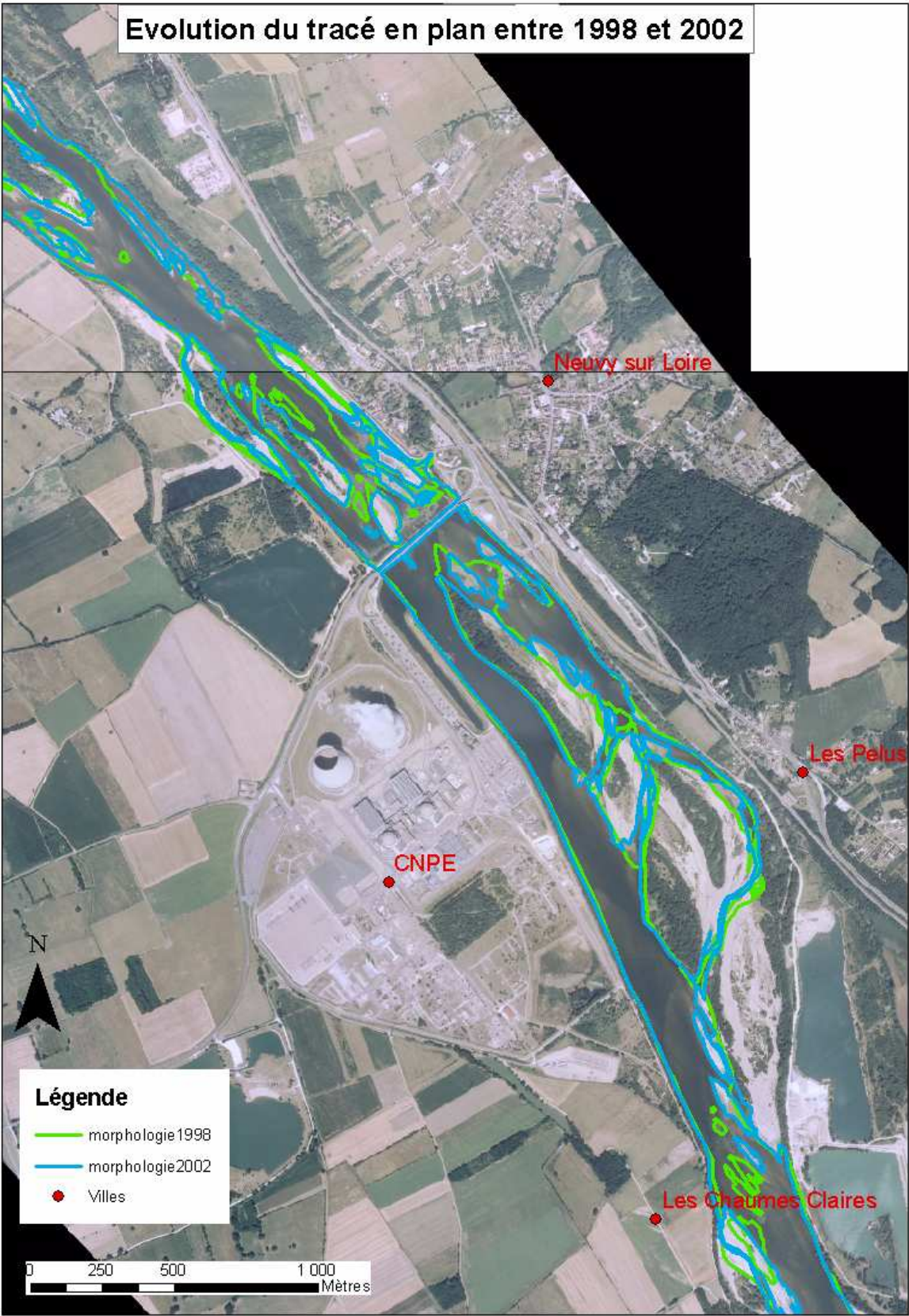
Zone au droit de Myennes



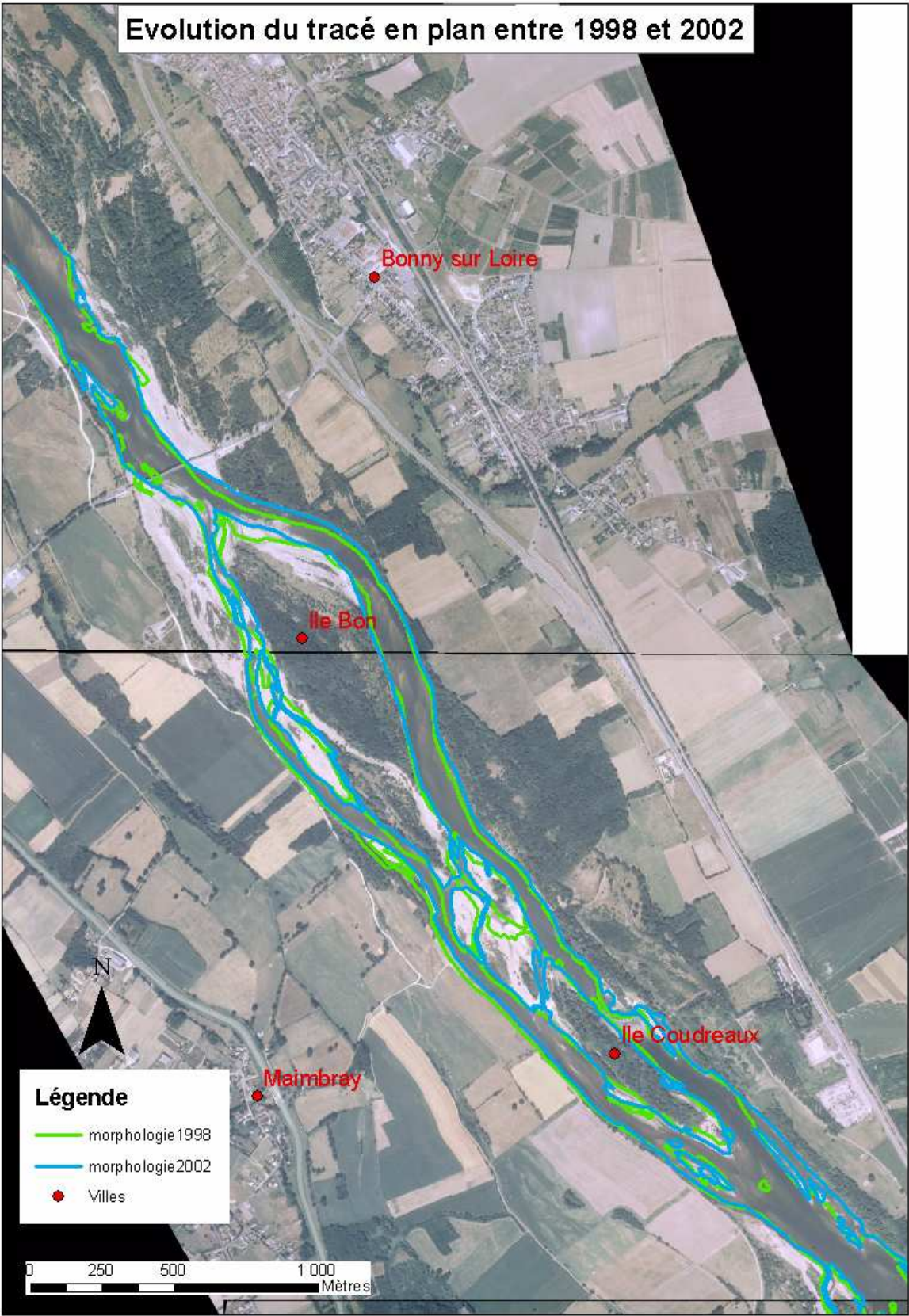
Zone en amont de la centrale



Zone au droit de la centrale

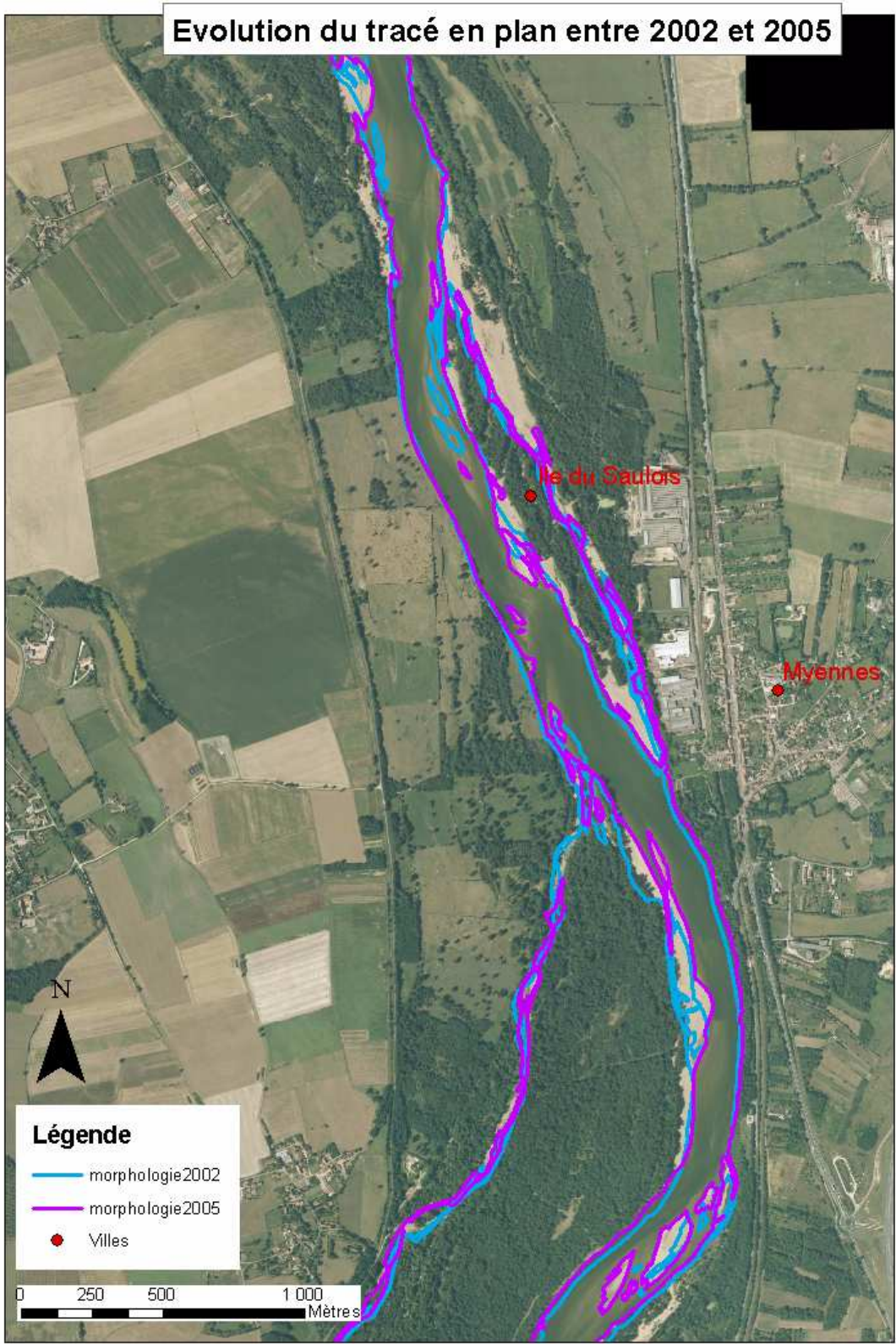


Zone en aval de la centrale

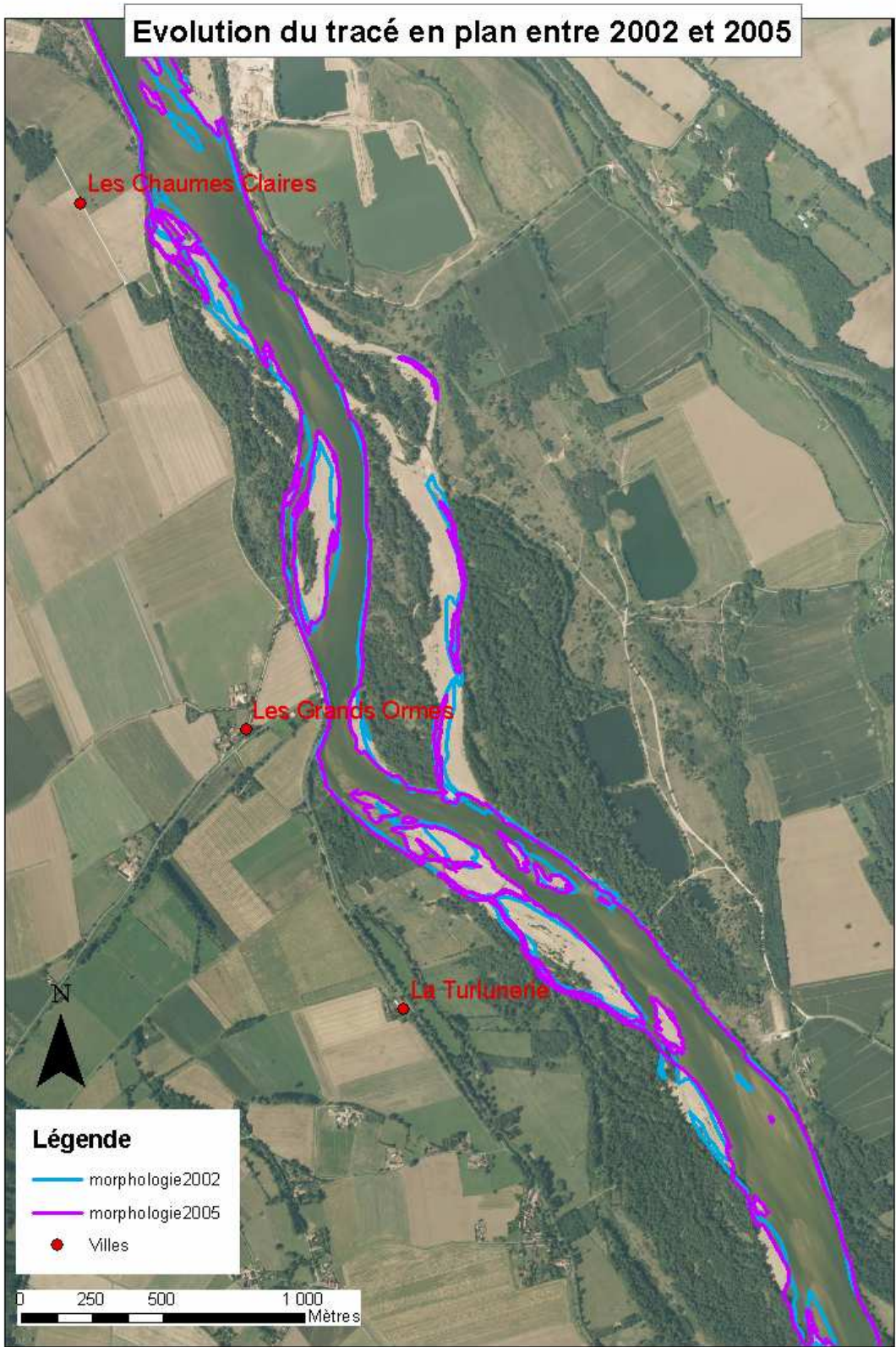


Annexe 3.6 : entre 2002 et 2005

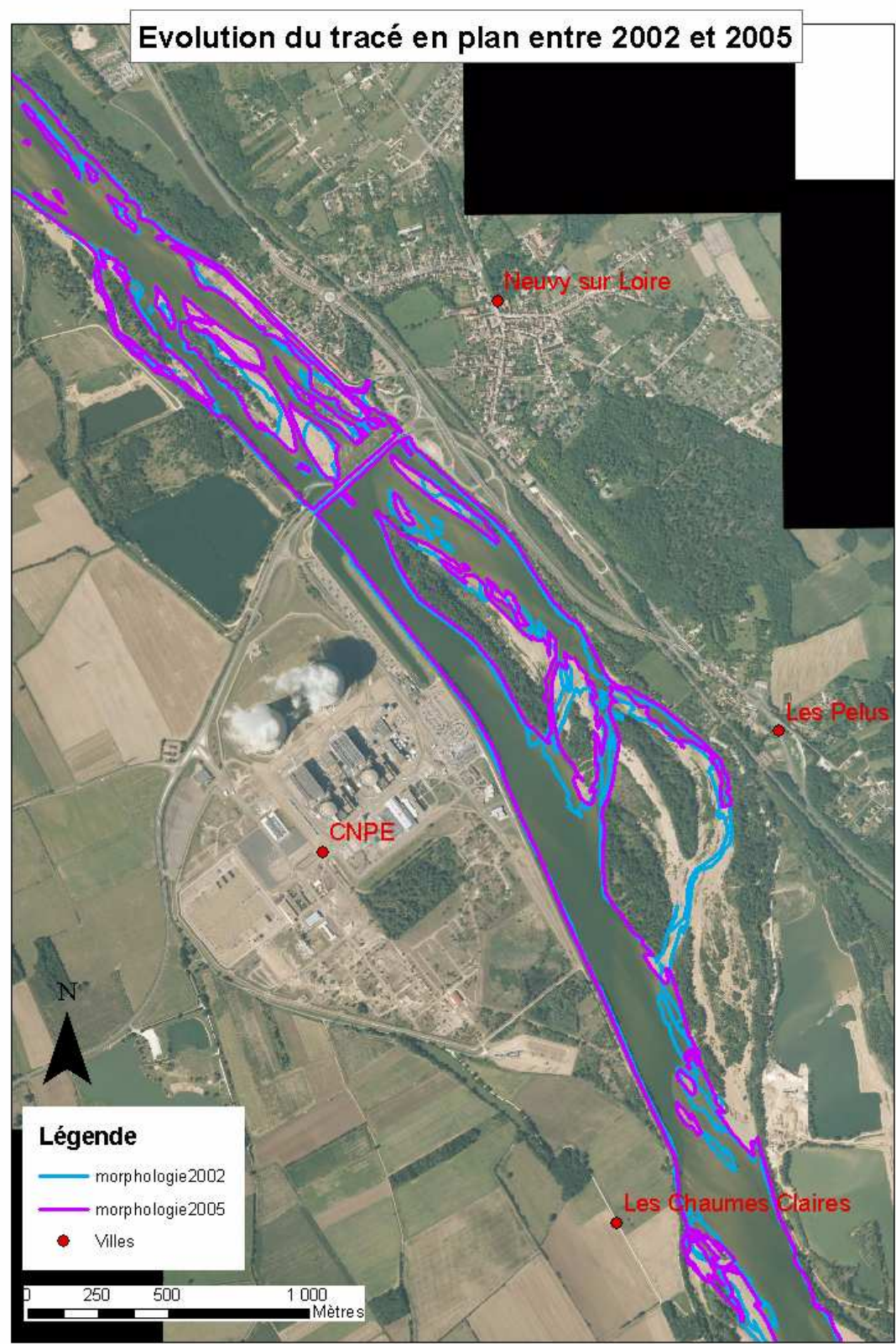
Zone au droit de Myennes



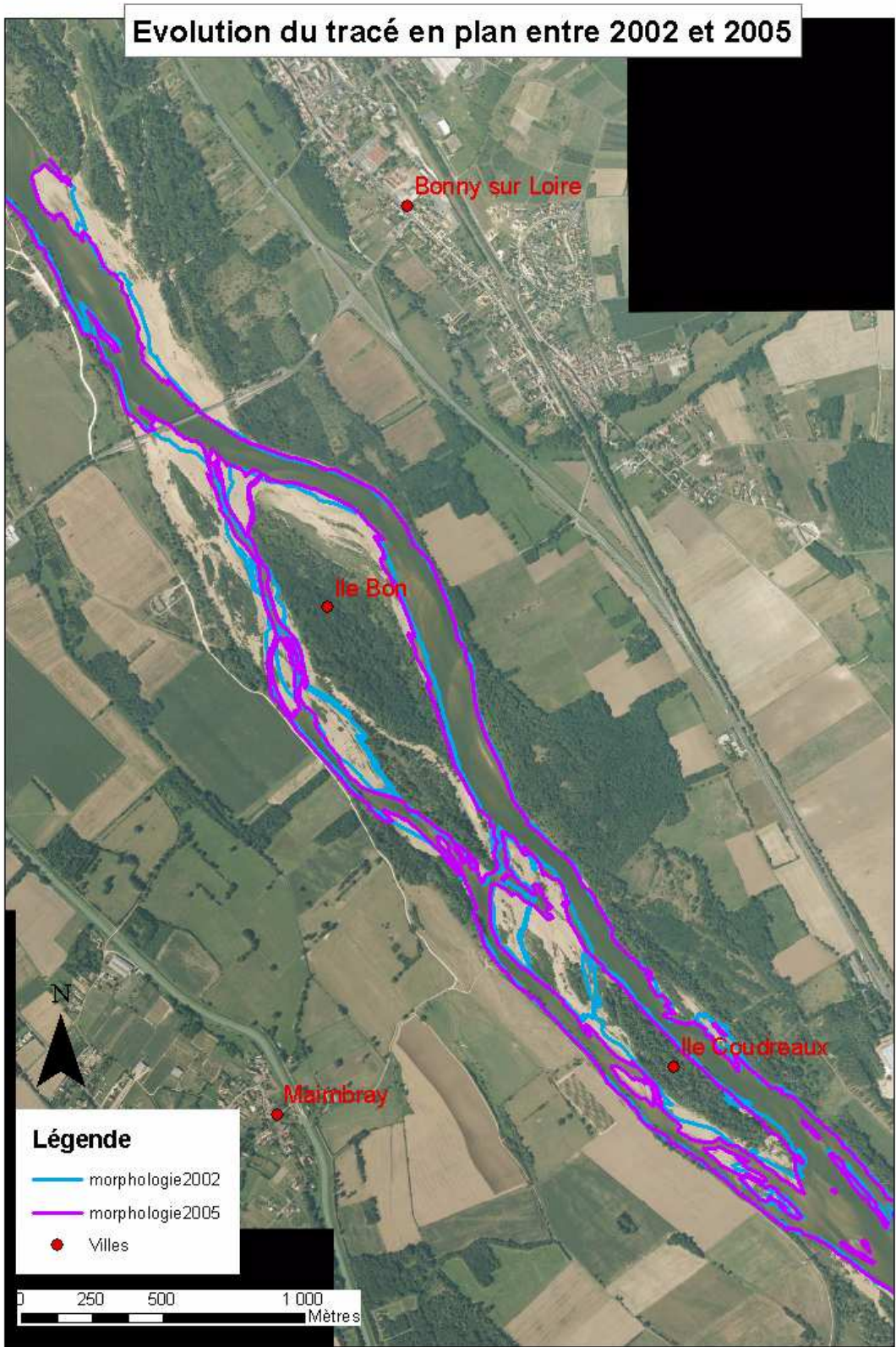
Zone en amont de la centrale



Zone au droit de la centrale



Zone en aval de la centrale



Annexe 4 : Limites amont-aval des entités de la sectorisation de GINESTET (1999)

Unité	Tronçon	Sous-tronçon	Limites amont-aval	Longueur (km)
U1			Bec d'Allier-Bonny sur Loire	80,8
	U1T1		Bec d'Allier-Saint Satur	51,3
		S1	Bec d'Allier-Marseilles les Aubigny Soulangy	12,3
		S2	Marseilles les Aubigny Soulangy-La Charité sur Loire	13,5
		S3	La Charité sur Loire-Pouilly sur Loire Charenton	12,5
		S4	Pouilly sur Loire Charenton-Saint Satur	13
	U1T2		Saint Satur-Bonny sur Loire	29,5
		S1	Saint Satur-Cosne sur Loire	8
		S2	Cosne sur Loire-Neuvy sur Loire	15,5
		S3	Neuvy sur Loire-Bonny sur Loire	6
U2			Bonny sur Loire-Confluence Beuvron	166,3
	U2T1		Bonny sur Loire-Lions en Sullias	30
		S1	Bonny sur Loire-Briare	12,5
		S2	Briare-Lions en Sullias	17,5
	U2T2		Lions en Sullias-Ouvrouer les Champs	36,5
		S1	Lions en Sullias-Sully sur Loire	14,5
		S2	Sully sur Loire-Ouvrouer les Champs	22
	U2T3		Ouvrouer les Champs-Confluence Loiret	37,3
		S1	Ouvrouer les Champs-Combleux	21,5
		S2	Combleux-Confluence Loiret	15,8
	U2T4		Confluence Loiret-Confluence Beuvron	62,5
		S1	Confluence Loiret-Meung sur Loire	7,5
		S2	Meung sur Loire-Muidse	26,5
		S3	Muides-Blois Ménars	9
		S4	Blois Ménars-Confluence Beuvron	19,5
U3			Confluence Beuvron-Les Ponts de Cé	151,8
	U3T1		Confluence Beuvron-Vouvray	38,3
		S1	Confluence Beuvron-Mosnes	15
		S2	Mosnes-Montlouis la Barre	16,5
		S3	Montlouis la barre-Vouvray pont	6,8
	U3T2		Vouvray-Confluence Cher	24,5
		S1	Vouvray-Tours pont Wilson	9
		S2	Tours pont Wilson-Luynes	8
		S3	Luynes-Confluence Cher	7,5
	U3T3		Confluence Cher-Confluence Vienne	37
		S1	Confluence Cher-Rigny Ussé Rupuanne	17
		S2	Rigny Ussé Rupuanne-Confluence Indre	10,5
		S3	Confluence Indre-Confluence Vienne	9,5
	U3T4		Confluence Vienne-Les Ponts de Cé	52
		S1	Confluence Vienne-Confluence Thouet	18
		S2	Confluence Thouet-Gennes Bessé	12,5
		S3	Gennes Bessé-St Mathurin	8,5
		S4	St Mathurin-Les Ponts de Cé	13
U4			Les Ponts de Cé-Montjean sur Loire	29,5
	U4T1		Les Ponts de Cé-Confluence Maine	8
	U4T2		Confluence Maine-Montjean sur Loire	21,5
		S1	Confluence Maine-Chalonnnes sur Loire viaduc de l'Alleud	10,5
		S2	Chalonnnes sur Loire viaduc de l'Alleud-Montjean sur Loire	11

Annexe 5 : Synthèse des résultats de l'étude de Ginestet

Résultats issus des photographies de 1993

Sous-Tronçon	Largeur bande active (m)	Nombre de chenaux	Largeur totale îles (m)	Enveloppe hydraulique (m)
U1T1S3	373	3	189	562
U1T1S4	370	2	118	488
U1T2S1	279	2	101	380
U1T2S2	310	2	229	539
U1T2S3	314	3	84	398
U2T1S1	276	2	34	310
U2T1S2	235	1	0	235

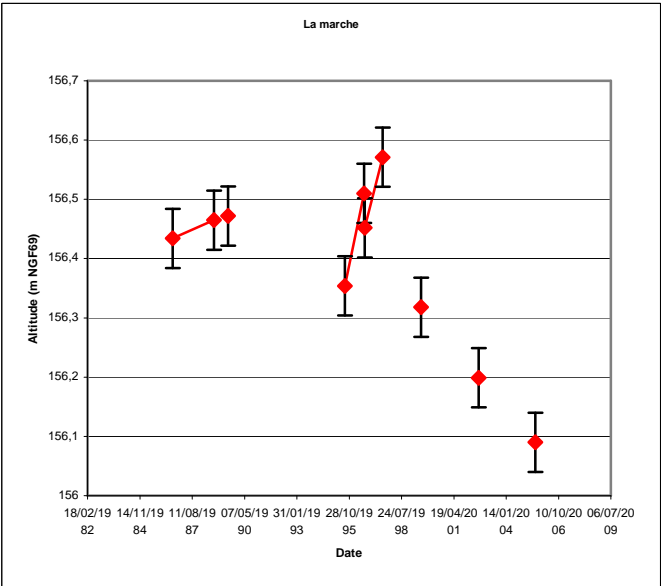
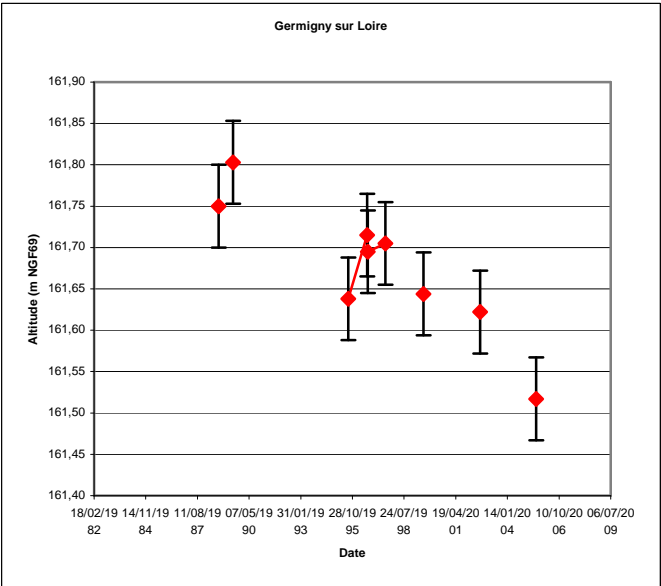
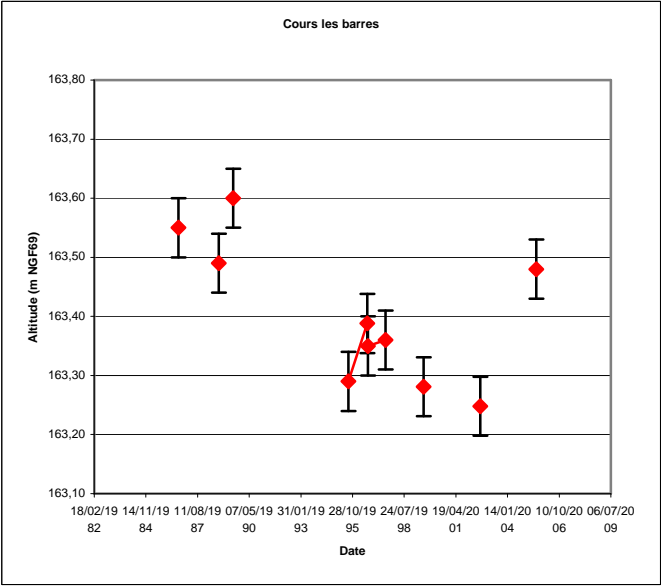
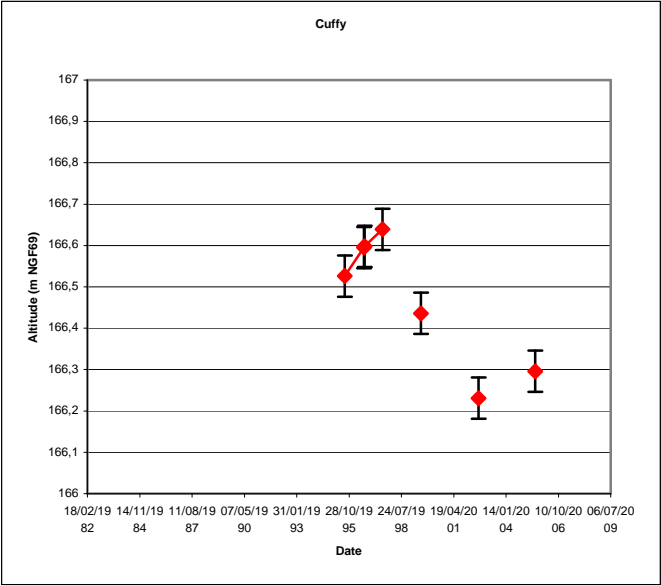
Résultats issus des photographies de 1955

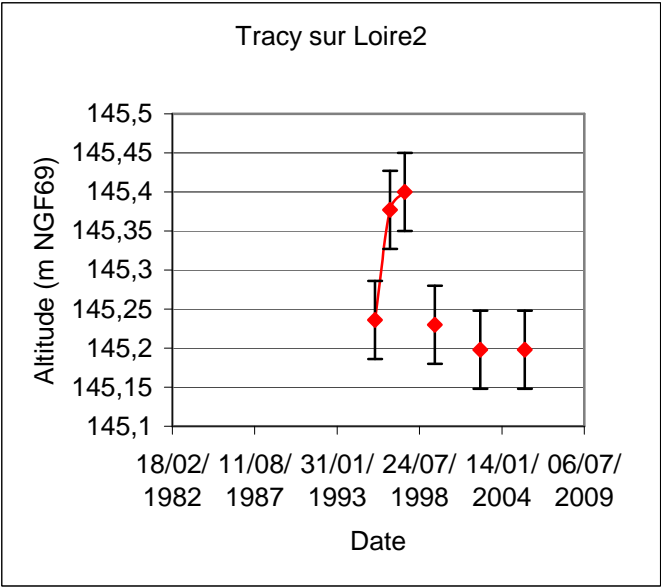
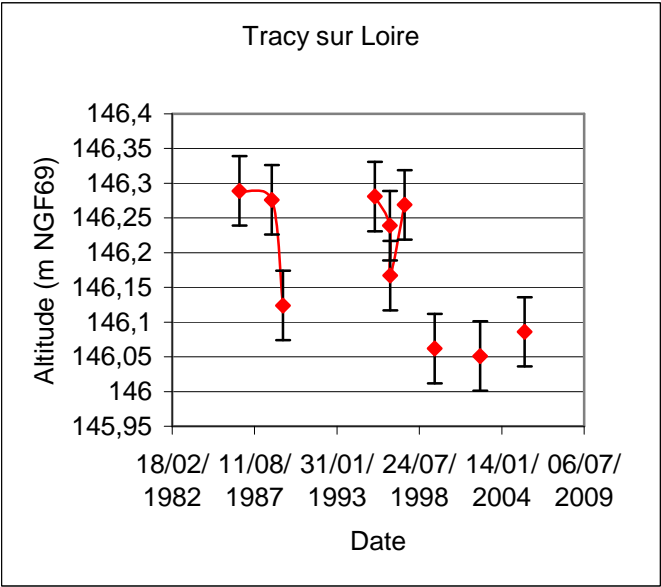
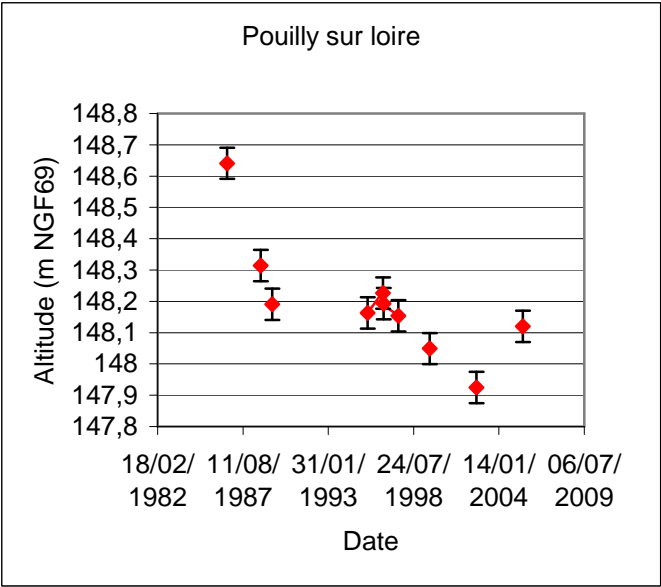
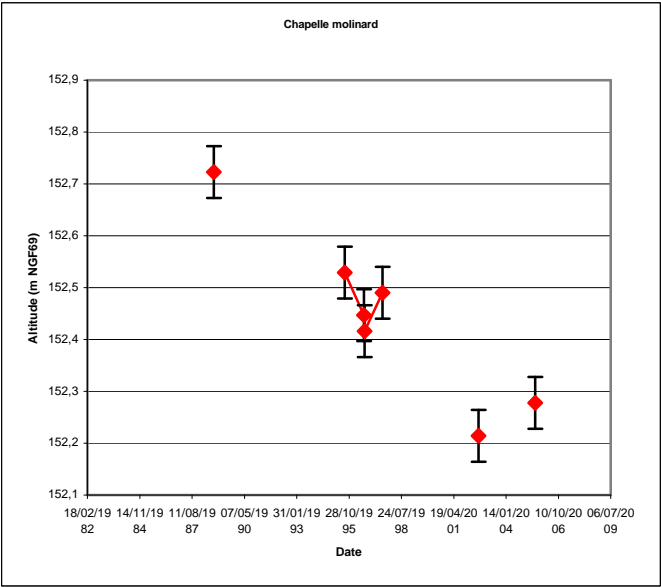
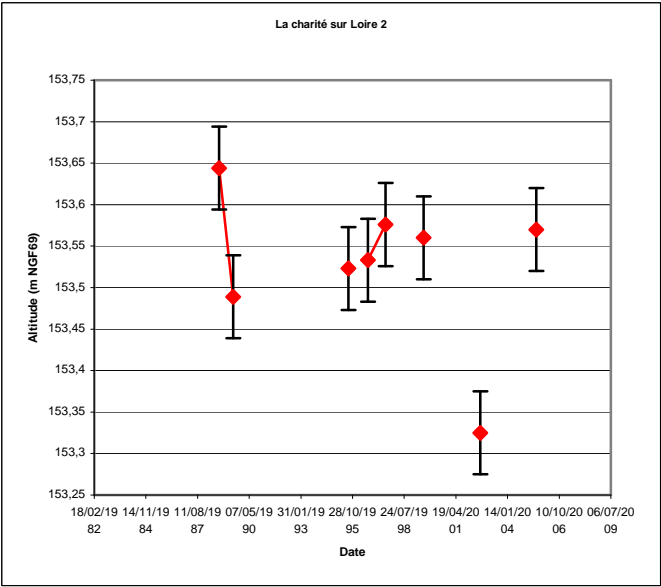
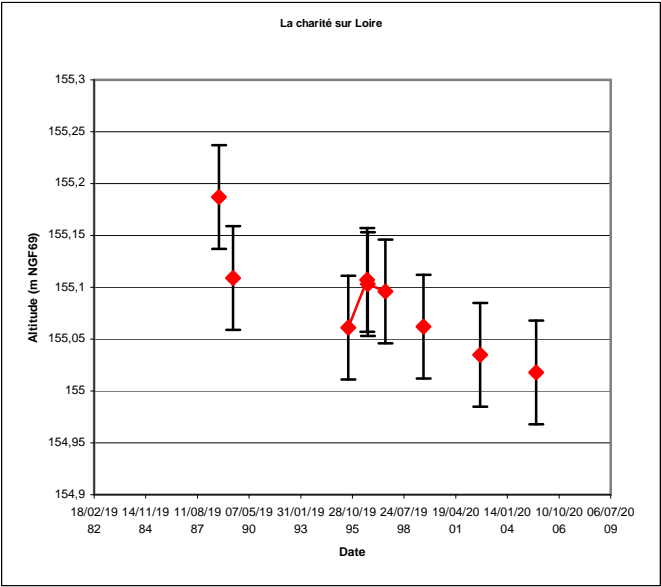
Sous-Tronçon	Largeur bande active (m)	Nombre de chenaux	Largeur totale îles (m)	Enveloppe hydraulique (m)
U1T1S3	419	3	153	571
U1T1S4	424	3	212	636
U1T2S1	342	2	97	440
U1T2S2	386	4	526	948
U1T2S3	404	2	81	485
U2T1S1	313	2	24	337
U2T1S2	255	1	1	256

Annexe 6 : Synthèse des l'analyse des photographies aériennes entre 1955-1957 et 1998 entre la Charité sur Loire et Lions en Sullias

	U1T1S3	U1T1S4	U1T2S1	U1T2S2	U1T2S3	U2T1S1	U2T1S2
Indice de tressage	Forte diminution (-0,38) : surtout liée à la végétalisation des îles qui réduit au sein de ces dernières le nombre de chenaux; passage de 3,52 en 1957 à 3,14 en 1998	Diminution quasi nulle (-0,04) : passage de 3,21 en 1957 à 3,17 en 1998	Diminution moyenne (-0,21) : liée à la disparition d'un long bras secondaire; passage de 3,01 en 1957 à 2,80 en 1998.	Forte diminution (-0,44) : liée à la disparition de nombreux bras secondaires ; passage de 2,85 en 1957 à 2,41 en 1998	Augmentation moyenne (+0,23) : liée à l' apparition et l'extension des îles ainsi que par la création de chenaux par végétalisation du lit mineur; passage de 2,81 en 1957 à 3,04 en 1998	Diminution moyenne (-0,20) : liée à la végétalisation des îles qui réduit au sein de ces dernières le nombre de chenaux; passage de 2,18 en 1957 à 1,98 en 1998	Augmentation quasi nulle (+0,04) : passage de 1,36 en 1957 à 1,40 en 1998
Nombre moyen de chenaux	Diminution moyenne (-0,29) : liée à la végétalisation des îles; passage de 2,67 en 1957 à 2,38 en 1998	Faible augmentation (+0,15) : liée à la création de chenaux par végétalisation des îles et des grèves; passage de 2,25 en 1957 à 2,40 en 1998	Faible augmentation (+0,11) : liée à la création de chenaux par végétalisation des îles et des grèves; passage de 2,00 en 1957 à 2,11 en 1998	Forte diminution (-0,41) : liée à la disparition de nombreux bras secondaires ; passage de 2,37 en 1957 à 1,96 en 1998	Forte augmentation (+0,66) : liée à l' apparition et l'extension des îles ainsi que par la création de chenaux par végétalisation du lit mineur; passage de 1,78 en 1957 à 2,44 en 1998	Augmentation quasi nulle (+0,04) : passage de 1,68 en 1957 à 1,72 en 1998	Faible augmentation (+0,18) : liée à la création de chenaux par végétalisation des îles et des grèves; passage de 1,16 en 1957 à 1,34 en 1998
Bande active	Rétrécissement important (-77m) : passage de 466m en 1957 à 381m en 1998	Rétrécissement important (-83m) : passage de 416m en 1957 à 333m en 1998	Rétrécissement moyen (-56m) : passage de 339m en 1957 à 283m en 1998	Rétrécissement important (-97m) : passage de 381m en 1957 à 284m en 1998	Rétrécissement important (-89m) : passage de 369m en 1957 à 279m en 1998	Rétrécissement important (-76m) : passage de 325m en 1957 à 250m en 1998	Faible rétrécissement (-25m) : passage de 264m en 1957 à 238m en 1998
Enveloppe hydraulique	Rétrécissement important (-83m) : passage de 601m en 1957 à 513m en 1998	Rétrécissement important (-87m) : passage de 591m en 1957 à 504m en 1998	Faible rétrécissement (-29m) : passage de 504m en 1957 à 475m en 1998	Rétrécissement important (-103m) : passage de 617m en 1957 à 514m en 1998	Faible rétrécissement (-39m) : passage de 428m en 1957 à 389m en 1998	Rétrécissement moyen (-57m) : passage de 360m en 1957 à 303m en 1998	Faible rétrécissement (-16m) : passage de 266m en 1957 à 251m en 1998
Tracé en plan	Tracé en plan fortement modifié , avec inversion du point d'inflexion des courbes Diminution du nombre d'îles liée à la transformation (par comblement) de plusieurs anciens bras du chenal principal en bras secondaires Faible végétalisation des îles Rétrécissement important du lit mineur	Tracé en plan moyennement modifié Engraissement des îles Faible végétalisation des îles Retrécissement important du lit mineur	Tracé en plan peu modifié Pas de nouvelle île , les îles présentes se sont étendues Végétalisation importante des îles Lit mineur peu changé	Tracé en plan fortement modifié La disparition des bras secondaires a entraîné le rattachement d'îles aux berges, transformation (par comblement) de plusieurs anciens bras du chenal principal en bras secondaires. Apparition d'îles et engraissement généralisé Forte végétalisation des îles Rétrécissement important du lit mineur	Tracé en plan moyennement modifié Apparition d'îles et un très fort engraissement des îles déjà présentes Végétalisation importante des îles Faible rétrécissement du lit mineur	Tracé en plan moyennement modifié Engraissement modéré des îles Végétalisation importante des îles Rétrécissement du lit mineur relativement important	A l'exception de la zone devant la centrale de Dampierre, le tracé en plan n'a quasiment pas évolué Les îles se sont légèrement étendues Très faible végétalisation des îles Rétrécissement modéré du lit mineur

Annexe 7 : Résultats de l’analyse des lignes d’eau d’été entre Cours les Barres et Ouvrouer les Champs par la méthode sans modification des hauteurs





Evolution morphologique du lit de la Loire au droit du secteur de Belleville et comparaison aux évolutions régionales

