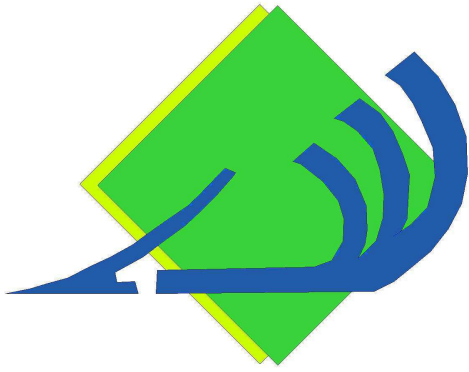




ETUDE DES BARRES ALTERNES EN LOIRE MOYENNE

Formes naturelles ou adaptations de la morphologie du lit en lien
avec les activités humaines ?



Joseph Thiollier

Master II Ingénierie des Milieux Aquatiques et des Corridors Fluviaux (IMACOF)

Rapport de Projet Personnel, Mai 2011



SOMMAIRE

I	Résumé	1
II	Introduction.....	2
III	Analyse bibliographique	3
III.1	Localisation du site d'étude.....	6
IV	Données, matériel et méthodes.....	7
IV.1	Données disponibles.....	7
IV.2	Méthode retenue	8
V	Résultats	12
V.1	Hydrologie des sites	12
V.2	Bilan sur les données.....	14
V.2.1	Les aménagements en Loire moyenne.....	14
V.2.2	Corrélation entre la présence des barres et les chroniques hydrologiques	14
V.3	Caractéristiques morpho-dynamique des barres alternes à l'échelle des sites	17
V.3.1	Digitalisation des corps sédimentaires, configuration, mobilité et vitesses de migration	17
V.3.2	Analyse de la morphométrie des unités libres.....	18
V.4	Contrôle géométrique de la formation des barres à l'échelle du tronçon.....	21
V.4.1	Intégration des données issues des modèles hydrauliques dans domaines actées sur les rivières à graviers. 21	
V.4.2	Analyse de la bande active en 2002	23
V.4.3	Evolution de la bande active entre 1850 et 2002	24
V.4.4	Analyse de l'évolution de l'incision	25
V.4.5	Capacité de transport.....	28
V.4.6	Structure des pentes	29
V.4.7	Ratio d'aspect.....	29
V.4.8	Analyse multi-variée.....	30
VI	Discussion	32
VII	Perspectives	39

I Résumé

Trois secteurs de Loire Moyenne semblent présenter de manière pérenne des bancs sédimentaires alternés. Cette étude s'inscrit en prévision d'un travail de recherche poussé sur les conditions de formation et la dynamique hydro-sédimentaire de ces unités. Etant donné le caractère prospectif et les délais de l'étude ne permettant pas de faire de terrain, nous avons choisis de travailler sur les photographies aériennes et la récupération de données déjà existantes. L'analyse diachronique des orthophotographies nous permet d'affirmer que les barres alternes étaient déjà présentes en Loire Moyenne en 1949. Elle a aussi mis en évidence l'existence systématique de barres forcées ou d'éléments fixes effectuant une constriction des écoulements dans un petit chenal préférentiel d'écoulement, apparemment fixé, et engendrant une sinuosité en amont des trois tronçons. Le tronçon de Saint-Mathurin-sur-Loire se détache très nettement des autres sites en lien avec la forme, la régularité de ses barres et la géométrie de son chenal. Bien que des estimations du ratio d'aspect soient disponibles via un modèle hydraulique 1D (*Latapie en cours*), il n'a pas été possible de distinguer avec certitude une valeur seuil pour la formation des bancs. Même si les modèles prédictifs de formations des barres alternes couramment utilisées (*Jaeggi 1984, Ramez 2005*) sont fonctionnels sur les rivières endiguées à forte pente, charriage grossier et rugosité de fond négligeable, ils ne fonctionnent pas en Loire Moyenne. L'étude des conditions de formations dans les larges systèmes fluviaux à lits sableux et faible pente reste à approfondir et à préciser avec des mesures précises *in situ* notamment à cause de la complexité des formes de propagation des sédiments.

Mots clef : barres alternes, barres forcées, ratio d'aspect, Fleuve Loire, hydromorphologie

Three sectors in Loire Moyenne seem to contain in a sustainable way alternate sedimentary bars. This study is an anticipation of an important work of research about the initiation and the hydro-sedimentary dynamic of these sedimentary units. Because of the prospective aspect and the duration of the study which don't allows us to work with data measured *in situ*, we chose to work with aerial photographs and recovery of existing data. The diachronic analysis allows us to affirm that alternate bars were already present in 1949. It also showed the systematic existence of forced bars or static elements which constrict the channel in a narrow preferential flume, apparently few mobile, generating a sinuosity upstream of the sections. The site of Saint-Mathurin differs of the others in relation to the form, the regularity of its alluvial macroforms and the geometry of its channel. Although estimations of aspect ratio are available through a 1D hydraulic model (*Latapie en cours*), it was not possible to distinguish with certainty a threshold value alternate bars initiation. Even if predictive models of alternate bars formation commonly used (*Jaeggi, 1984 Ramez 2005*) are functional on the channelized river with high slope and important bedload, they don't work in Loire Moyenne. The study of alternate bars initiation in large sand-bed channels and low slope need further investigations *in situ* more precise particularly because of the complexity of sedimentary forms of propagation.

Keywords: alternate bars, forced bars, aspect ratio, Loire River, hydromorphology

II Introduction

Les barres alternes sont des macroformes alluviales souvent considérées comme typiques des rivières endiguées à forte charge sédimentaire et à fond mobile. Trois secteurs de la Loire moyennes ont été identifiés comme présentant ces figures sédimentaires. Certaines publications sur l'initiation des formes (Jaeggi 1984, Ramez 2005, Kisch 1980) ont proposé des plages de formation sur des paramètres morphologiques du lit (pente, largeurs du chenal...). Ces modèles ont été testés *in situ* par leurs auteurs en donnant de bons résultats sur des rivières à graviers rectilignes, à pente relativement élevée ou anciennes rivières en tresses présentant un charriage important. Ils servent notamment de base à Jodeau (2007) dans le cadre de l'analyse des hydrosystèmes alpins (ex-système de tressage). Cependant, aucune publication en notre possession ne concerne directement les systèmes fluviaux de faible pente, majoritairement sableux et partiellement endigués ou la rugosité de forme¹ n'est plus négligeable. Bien qu'ayant subi de nombreux travaux d'entretien et de sécurisation hydraulique en lien avec les anciennes activités de batellerie et la présence de nombreuses zones urbaines, les aménagements subis par la Loire moyenne restent, en apparence, sans commune mesure avec ceux qu'ont subis les hydrosystèmes précités.

La présente étude est donc la première étape d'un travail visant à essayer de **comprendre si les barres alternes en Loire moyenne sont des formes naturelles ou des adaptations de la morphologie du lit en lien avec les activités humaines**. Plusieurs questionnements (ou autant d'objectifs potentiels pour cette étude) s'attachent à cette problématique :

- ➔ Quelles sont les données disponibles relatives à la présence de ces macroformes et à leur organisation ?
- ➔ Peut-on, avec les données disponibles, établir un lien entre la présence des barres et des aménagements anthropiques ?
- ➔ L'organisation des structures sédimentaires est-elle la même sur les 3 sites et peut-on caractériser leur organisation condition de formation grâce à des valeurs adimensionnelles ?
- ➔ La discrimination des secteurs présentant des barres alternes par rapport à ceux n'en présentant pas est-elle possible via l'analyse de la variation d'indicateurs morphologiques et hydrauliques entre la Chapelle et le Pont de Cé ? Ceci amène la question suivante : les modèles de formation déjà établis fonctionnent-ils en Loire Moyenne ?

Objectif connexe :

- ➔ Effectuer un travail sur les données (collecte, analyses, manque, personnes ressource...) en lien avec une exploitation dans le cadre de futures investigations plus poussées.

¹ La rugosité des fonds matérialisée en hydraulique par le coefficient de Strickler est en fait composée de la rugosité due aux grains (rugosité de peau) et de la rugosité due à l'irrégularité des fonds (rugosité de forme, irrégularité des fonds liée aux dunes). Cette dernière est souvent négligeable dans les rivières à graviers et galets, marquant la différence entre les concepts de lits « lisses » et « rugueux ».

III Analyse bibliographique

La migration et la morphologie des macroformes en rivière résultent de processus complexes basés sur l'interaction eau-sédiments. L'équilibre d'un système et sa typicité repose sur la confrontation perpétuelle des contraintes exercées par le substrat sur un écoulement (qui est conditionné par la gravité et le relief) et la capacité du flux liquide à fractionner, transporter puis déposer ce substrat. Comme l'énoncent Malavoi et Bravard (2010), l'étude hydromorphologique se situe à l'interface entre deux disciplines qui sont la dynamique fluviale, étudiant les processus physiques des cours d'eau, et la morphologie fluviale qui s'intéresse aux formes qui en résultent. D'après les auteurs, la forme la plus fréquente de propagation de la charge de fond dans les écoulements fluviaux ($Fr < 1$) est le charriage sous forme de bancs ou de dunes. Selon l'intensité des apports solides, ces macroformes peuvent être plus moins jointives (cas de rivières se rapprochant du tressage) ou totalement isolées.

On peut définir² les barres alternes comme étant des structures mobiles constituées des bancs sédimentaires disposés de manière alternée de part et d'autre du chenal d'écoulement selon des configurations simples (« simple row ») ou multiples (« multiple row ») (Ikeda 1984).



Fig. 1 : Barres alternes simple configuration sur le site de Saint-Mathurin en 2009 (a) et en configuration multiple sur le site de La Chapelle-sur-Loire en 1999 (b)

La bibliographie semble montrer que nous pouvons placer les barres alternes dans deux types de contexte : à l'interface d'un processus de genèse de méandres (Yalin 1972, Jaeggi 1984, Ikeda et coll 1981) et en réponse à des perturbations (Izumi et al 1978, Ramez 2005). La plupart des auteurs soulignent que les conditions indispensables à la formation potentielle de barres alternes pérennes sont la présence d'une abondante charge solide se propageant en interaction avec un fond mobil au sein d'un écoulement de type fluviale entre des berges non ou peu érodables. Dans ces conditions, les structures peuvent grossir jusqu'à une amplitude d'équilibre proportionnelle à la largeur du chenal (Yalin 1972/2001, Jaeggi 1984, Ramez 2005, Richard 1978, Muramoto et al. 1972) et migrer vers l'aval. Si les berges sont érodables, les barres induisent assez de sinuosité pour permettre le mécanisme de formation de méandres (Yalin 1972

² Etant donné que cette étude se joint à un travail en cours d'amorçage, l'analyse bibliographique reprend les éléments synthétisés par S.Rodrigues (2010) et M.Jodeau (2007) et est complétée par une relecture des ouvrages et articles de Ashworth et al. (2000), Bravard et petit (1997), Malavoi et Bravard (2010), Ramez (2005) et Sohei.A (1982)

et Ashmore 1982). A des valeurs de ratio d'aspect supérieures, des barres multiples se forment, ce sont les précurseurs du tressage (Malavoi et Bravard 2010).

La question de l'initiation du phénomène de formation de bancs alternés reste entière. Les expériences de Yalin (1972) sur la genèse des méandres tendraient à montrer que les barres seraient conditionnées par la présence de turbulences horizontales et verticales disposées de manière alternées au sein de tout fluide en mouvement. Le déplacement de ces turbulences provoque le déplacement d'alluvions (fig.2 (a/b/c/d)). Les macroformes ainsi formées induisent par effet déflecteur une érosion sur la berge opposée ce qui entraîne la création de sinuosités. Le façonnage de cette sinuosité, des formes de fond (développement de zones d'érosion et de dépôt) et de la section transversale est dépendant de la cohésion des berges et du substrat.

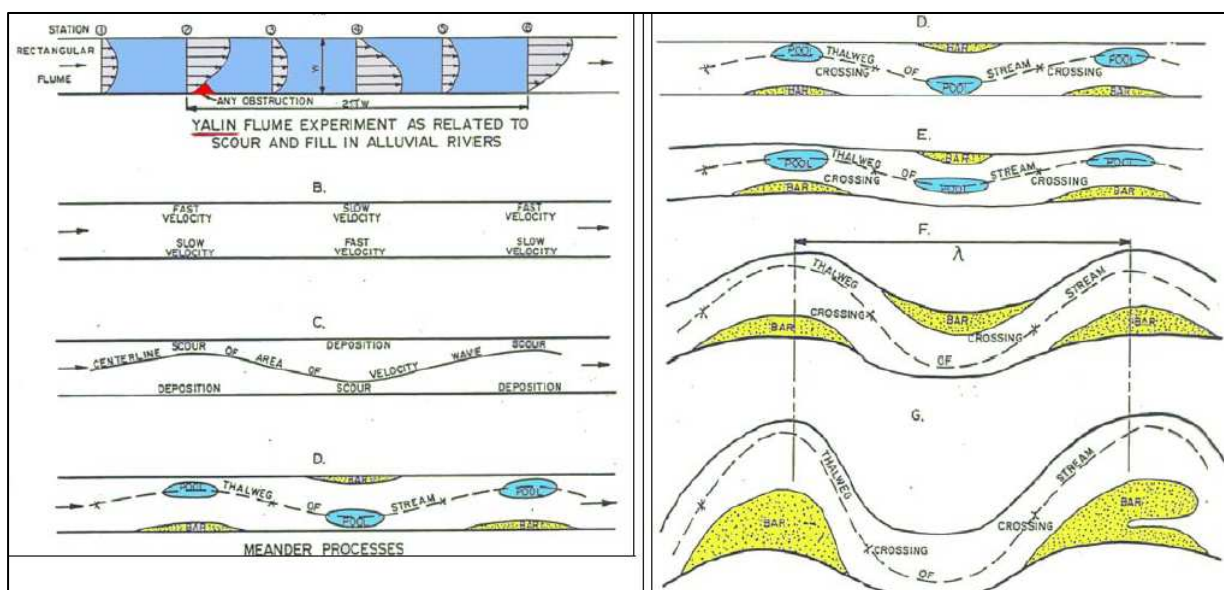


Fig. 2 : Barres alternes et processus de création de méandres (Yalin 1972) dans Malavoi et Bravard 2010

Certains auteurs autres que Yalin (Ashworth et al. 2000, Sohei Abe 1982, Newbury 1995, Richard 1978) ont établi des relations entre les formes de fond (orientation et forme des dunes, profondeurs des fausses d'érosions et alternance des mésohabitats) et les instabilités hydrauliques induites par la formation de bancs. Partant de ce principe et des éléments énoncés plus haut, les contraintes par effet déflecteur provoquées par l'apparition d'une barre forcée pourraient donc théoriquement agir sur la propagation de l'écoulement et les mésoformes du chenal en initiant « artificiellement » une sinuosité locale ou un changement de l'orientation des berges. Seminara (2006) utilise le terme de « free bar » pour désigner le fait que les bancs alternés trouvent leur origine dans l'instabilité du fond de la rivière par opposition aux structures forcées par une courbure de berge (extrados de méandre par exemple). Jaeggi (1984) définit une barre unitaire comme une entité de dépôt initiée par une chute de la capacité de transport ou le développement d'une fosse d'affouillement immédiatement à l'amont. La seconde condition expose bien le rétrocontrôle que peut exercer la forme du chenal sur l'écoulement (forme ici

induite par un corps fixe) et donc le façonnage de nouvelles entités. Cependant, comme l'ont mentionné de nombreux auteurs (Rodrigues 2010, bridge 1993a, Asworth et al. 2000, Villar et Church 2005) d'autres investigations doivent être menées pour comprendre la formation des barres dans des lits sableux larges et le rôle occupées par les mésoformes du fond qui interagissent avec les macroformes.

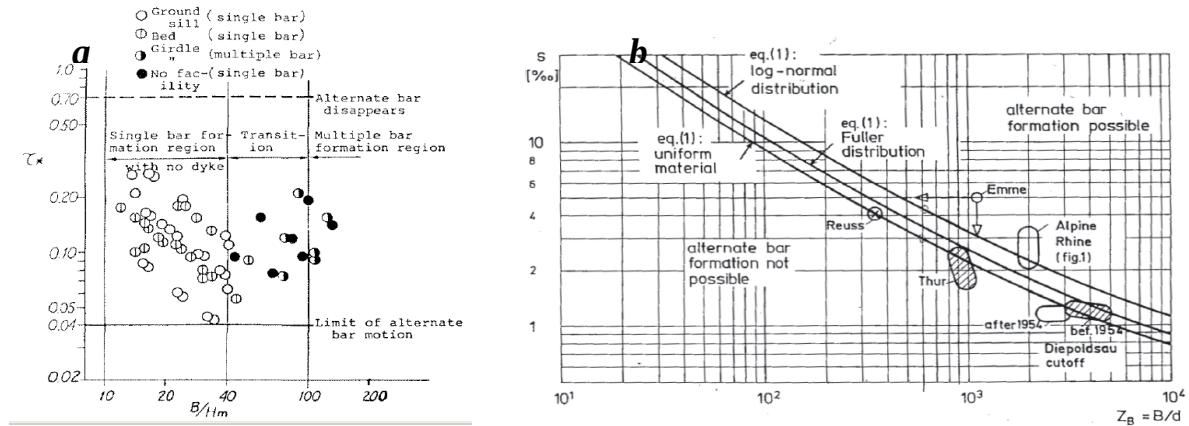


Fig. 3 : Modèles prédictifs présentant des plages de formation théoriques pour les barres alternes d'après Izumi et al en 1978 (a) et Jaeggi en 1984 (b)

Sohei Abe (1982), explique que les importants travaux sur les rivières du Japon ont entraîné l'émergence de barres alternes sur de nombreux secteurs. La mise en péril des infrastructures provoquée par les fosses d'érosion ont rendu nécessaire l'émergence de modèles prédictifs des conditions de formation des barres alternes dans les chenaux artificialisés. Izumi et al (1978) ont démontré que le domaine de formation des barres peut être exprimé en fonction de la contrainte de cisaillement adimensionnelle (paramètre de Shield) et le ratio d'aspect qui tient compte de la profondeur moyenne. Il ressort (fig.3.a) que dans toutes rivières où le ratio d'aspect est inférieur à 40 suite à des travaux d'entretien et/ou de rectification du lit, des barres alternes apparaissent. Nous ne connaissons malheureusement pas les caractéristiques de l'échantillonnage utilisé. La contrainte de cisaillement adimensionnelle induit la prise en compte du diamètre des sédiments et de la pente du cours d'eau. La notion de barres alternes de configuration simple ou multiples (« Single row/Multiple row ») est présente et sera reprise notamment par IKEDA (1984) et Ramez (2005). Suite à des expériences en canal, Jaeggi (1984) a établi une relation entre la pente de la rivière (fig 3.b), et le rapport largeur sur diamètre médian des sédiments. Ramez (2005) a corrélé les travaux de Jaeggi à ceux de Hunziger en 1999 et a mis en évidence l'expression théorique d'un ratio d'aspect critique permettant la mise en place de bancs alternés. Il est supposé que les bancs s'organisent en dépensant une énergie minimale et que β_c , rapport de forme critique minimisant les énergies mises en jeux, caractérise un développement harmonieux des formes. La démonstration théorique semblerait rejoindre Sohei Abe en expliquant la configuration des barres selon l'écart au ratio d'aspect critique. La calibration sur 43 rivières a donné de bons résultats cependant, l'étude porte une fois de plus sur les rivières endiguées à forte pente et gravier. Colombini et al et Jaeggi (1984 et 1987) soulignent aussi l'importance du ratio d'aspect pour la formation de barres alternes.

L'ensemble des auteurs ayant travaillé sur les processus d'initiation ont généralement aussi abordé les problématiques de morphométrie des macroformes. On observe des constantes concernant l'expression des paramètres de formes tridimensionnelles des barres et les caractéristiques du chenal d'écoulement. Ces constantes seront abordées dans la cadre du rapport lors de leur comparaison avec les données collectées sur les sites de Loire Moyenne.

III.1 Localisation du site d'étude

La Loire est le plus long fleuve de France et draine un bassin versant de 117 000 km² pour un peu plus de 1000 km linéaires entre sa source dans le massif central et son estuaire dans l'océan Atlantique à Saint-Nazaire. Les trois sites d'étude sont situés dans les départements du Maine et Loire (049) et de l'Indre et Loire (037) sur la partie médiane du fleuve. Le site le plus amont (t1, La Chapelle sur Loire, PK amont 791) est situé 35 km à l'aval de la ville de Tours. Les sites de Saumur (t2) et de Saint-Mathurin (t3) se trouvent en aval de la confluence avec la Vienne (PK812) respectivement à 59 km (PK813) et 90 km (PK845) de la Tours. Les sites t1 et t2 présentent des longueurs d'environ 10 km linéaires contre 16 km pour le site t3. Le substratum est constitué des tables calcaires du bassin parisien sous un paysage caractérisé par des reliefs aplanis et de très faibles gradients de pentes. Le style fluvial à chenaux multiples de la Loire moyenne à tendance à se transformer en style à chenal unique sous l'effet de l'incision du lit engendrée par les activités anthropiques du 20^{em} siècle et l'endiguement du chenal.

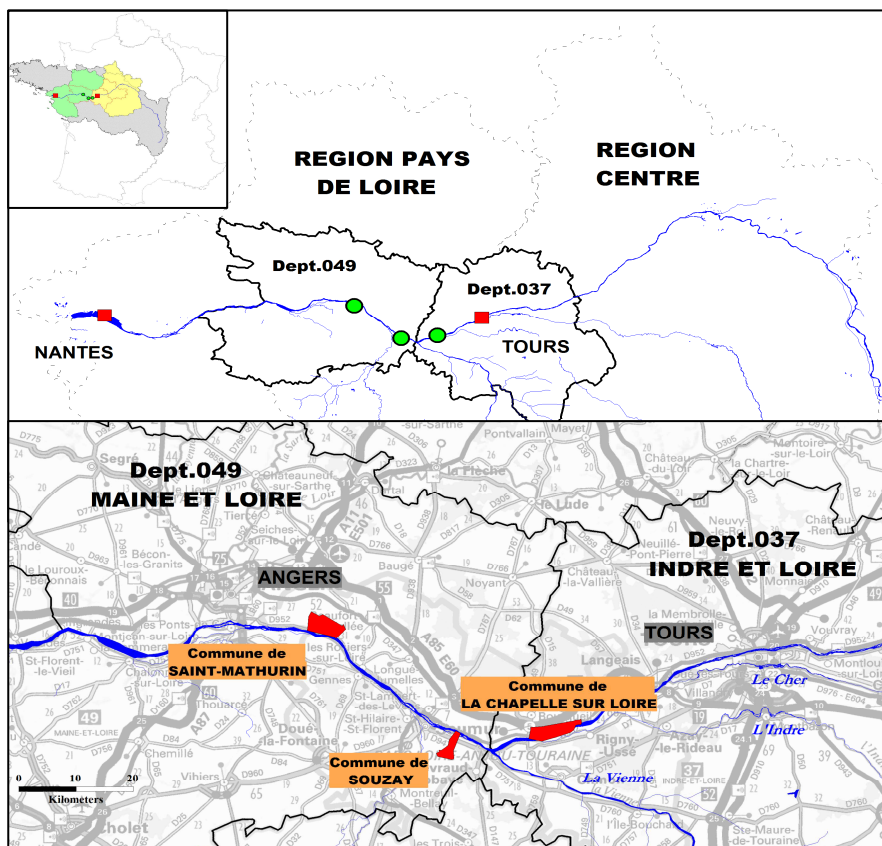


Fig. 4 : Localisation du site d'étude

IV Données, matériel et méthodes

IV.1 Données disponibles

Les données investies dans cette étude sont principalement issues d'un travail de prospection préalable auprès d'universitaires ayant déjà travaillé sur le secteur et des gestionnaires d'Etat effectuant le suivie de la morphologie de la Loire. Les données peuvent être divisées en trois groupes :

- **Les données hydrologiques et hydrauliques** : A.Latapie (*en cours*) a développé un modèle hydraulique 1D sur l'ensemble de la Loire Moyenne. Les résultats des modélisations sont donnés en fonction des PK amont de tronçons morphologiquement homogènes. Ce sont les données de géométrie hydraulique qui seront investies. L'hypothèse préalable (d'après *Malavoi et Bravard 2010, Malavoi/Biotec 2006, Wasson 1995 et Bravard 1997*) était que le débit biennal (Q2) représentait les caractéristiques morphologiques du lit en pleins bords étant donné que sur de nombreux secteurs, les levées ne sont pas directement contre la berge. Cependant, la figure 5b montre qu'il y a une faible corrélation entre les largeurs au miroir mesurées en Q2 et celles mesurées pour des Pk identiques sur la campagne de photographies aériennes de 2002. Le second jeu de données hydrauliques concernant un débit plus faible (dépassé environ 76 jours par an) sera donc aussi investi. Ce débit intermédiaire (que nous appellerons Q0.8) présente une corrélation plus proche que le Q2 (figure 5 a).

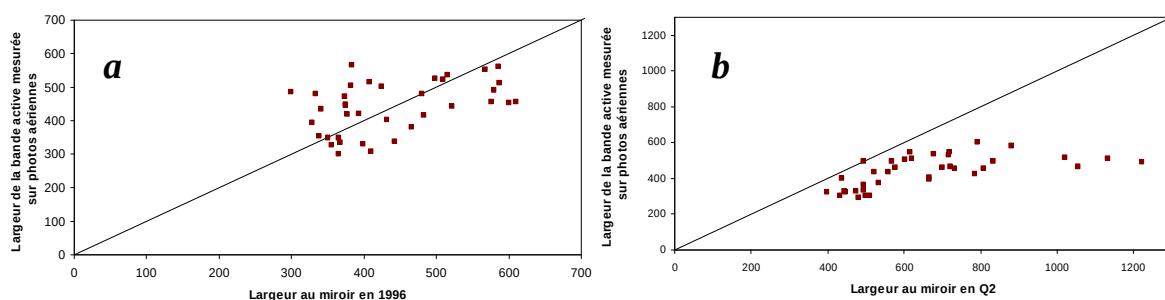


Fig. 5 : Corrélation entre la largeur de la bande active mesurée sur ortho-photo en 2002 et la largeur au miroir en débit biennal (b) et la crue de 1996 (a) (dépassée 76 jours par an) → modèle 1D Latapie (*en cours*)

- **Les données de géomorphologie** : les données relatives à la morphologie de la Loire ont été récoltées auprès de la DREAL Centre, DDT 49 et du Système d'Information d'Evolution du Lit de la Loire (SIEL), base de données centralisant l'ensemble des documents ou données brutes relatives à la Loire possédées par les services de la DREAL Centre. On distinguera des données topographiques les données ortho-photographiques collectées ou effectuées par le SIEL (1955,

1956, 1958, 1960, 1969, 1984, 1995, 1998, 1999, 2000, 2002, 2005, 2009), téléchargées sur le site de l'IGN (1949) et fournies par F. Di Pietro (UMR 6173 CITERES/VST) pour les années 2007 et 2008. Les informations sur la morphologie regroupent des profils en longs de la Loire dans le Maine et Loire (un profil par an entre 2000 et 2003, très faible pas de mesure), les mesures du réseau de suivi des cotes d'étiage de la Loire et de la BD Granulo (prétraitées par Audrey Latapie et fournies sous forme de valeurs moyennes ou représentatives de chaque tronçon homogène entre l'amont de la Chapelle et le Pont de Cé).

- **Les données sur les aménagements** : les données sur les aménagements ont été récupérées auprès des services de l'Etat (DREAL Centre et DDT 49) sous forme de couche SIG ou digitalisées directement sur les orto-photos suite aux entretiens passés avec les personnes précitées. Un déplacement aux archives de la DDT du Maine et Loire à Saint-Clément des Levés a été réalisé spécialement pour l'occasion³. Les informations concernent les ouvrages dans le lit mineur (chevrettes, épis, duits), dans le lit moyen (digue en Loire moyenne), BD points durs (ponts et ouvrages pré-cités) et travaux d'entretiens (curage, dévégétalisation, enrochement) effectués par la DDT 49. Parallèlement à cela, différents organismes ont été consultés en vue d'obtenir des données, sans que cela n'ait forcément pu aboutir : la Direction Départementale des Territoires 37, Sogreah 37, EDF, le LRPC Blois et Voie Navigable de France.

IV.2 Méthode retenue

Hydrologie

La présence de confluences entre les sites d'étude témoigne de débits caractéristiques et fonctionnements hydrologiques potentiellement différents. Les données investies sont celles issues des stations limnigraphiques de la Banque Hydro présentées ci-dessous (données brutes, QJm, source A.Latapie).

Nom station	Code station	PK approx	Date de mise en service	Etat
La Loire à Tours au Pont Mirabeau	K4900030	757	01/01/1996	en service
La Loire à Langeais	K6830020	782	01/09/1985	en service
La Loire à Montsoreau	L8000010	812	01/01/1916	arrêtée en 1988
La Loire à Saumur	L8000020	825	01/12/1987	en service
La Loire au pont de Cé	L8700010	867	01/01/2000	en service
La Loire à Montjean-sur-Loire	M5300010	897	1/01/1863	en service

Tableau 1 : localisation des stations limnigraphiques d'intérêts

Les besoins analytiques de l'étude nous oblige à posséder sur chaque site les chroniques de débits journaliers au moins depuis 1949 (date de la photo aérienne la plus ancienne). Les chroniques manquantes sur les stations de Langeais et du Pont de Cé (stations respectivement

³ Nous en profitons pour signaler ici que les archives possèdent des versions papiers de l'ensemble des plans de sonde et études effectués en Loire Moyenne et que selon M.Pouvreau, gestionnaire de ces données, il serait possible d'accéder aux versions numériques auprès de la DDT de Nantes.

représentatives des tronçons de la Chapelle sur Loire (t1) et de Saint-Mathurin (t3)) seront reconstituées par la recherche de corrélation avec des stations proches, notamment les stations de Saumur, Monsoreau, Tours et Montjean-sur-Loire.

Digitalisation et traitement des orthophotos : la plate-forme SIG

Etant donné l'aspect prospectif du travail demandé et l'impossibilité d'établir des protocoles de terrain dans le temps imparti, l'essentiel de l'étude se fera par analyse diachronique des photographies aériennes.

La première étape sera un constat présence/absence corrélé à la date et au débit du jour de l'observation. Toutes les dates exactes des orthophotos n'ont pas été transmises par la SIEL. En vue de préciser au maximum l'incertitude qui en résulte sur les débits, nous distinguerons quatre cas de figures :

- Lorsque la date précise est connue, le débit observé sur la photographie est celui mesuré ou reconstitué au droit de la station la plus proche.
- Lorsque l'année est connue et que la campagne a été transmise par l'IGN (ancienne campagne antérieure à la création du SIEL) la date exacte est recherchée sur le site de l'IGN en considérant qu'il n'y a pas eu d'autre campagne sur le même site cette année là.
- Lorsque seulement le mois et l'année sont connus, le débit est estimé par la valeur du débit mensuel moyen du mois considéré (incertitude bornée sur le graphe par l'écart type de la distribution des valeurs)
- Lorsque deux dates sont possibles, les barres d'incertitudes du graphique sont délimitées par les deux débits correspondants.

Dans un second temps, le contour des barres alternées sur toutes les photos sera digitalisé sous Mapinfo. L'utilisation des couches digitalisées est détaillée dans la partie suivante. Enfin, le bilan initial sera complété par une analyse et une mise sous SIG des données relatives aux aménagements qu'ont subit les tronçons.

Caractéristiques des barres à l'échelle des sites

Chaque site fera l'objet d'une analyse détaillée basée sur les digitalisations des macroformes et les configurations observées. Une des difficultés de l'analyse diachronique vient des fortes différences de définition des photographies aériennes. Ainsi, si les contours des barres sur les photos noir et blanc de 1949 sont parfaitement visibles, les photographies récentes permettent de voir leurs parties immergées et les mésoformes en cours de migration qui y sont rattachées. Pour palier à ce problème, la digitalisation se fera essentiellement sur l'interface eau/sédiments. Les critères pour la caractérisation des bancs sont les critères morphométriques et dynamiques :

Critères morphométriques : les configurations (« single Row » et « multiple row », Ikeda et al 1984) sont renseignées. La morphologie des barres sera caractérisée avec quatre critères qui sont largeur max (l_{max}), longueur max (L_{max}), rapport de forme (L_{max}/l_{max}) et sinuosité (Si). Afin d'avoir une meilleure répétabilité des mesures, les paramètres précités seront mesurés en traçant des rectangles orientés dans le sens du chenal (fig.6). Nous essaierons de voir si cette morphologie peut être mise en relation avec la largeur du chenal (W) mesurée au droit de chaque l_{max} et si des critères adimensionnels peuvent la caractériser. La largeur du chenal n'est prise ici que sur le bras concernée. Si une île segmente le chenal en deux bras, la largeur prise en compte ne sera que celle du bras présentant des barres alternes.

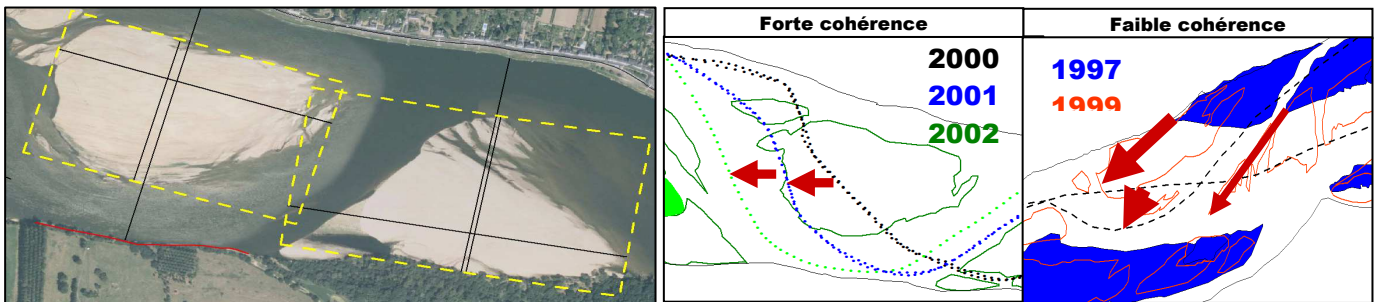


Fig. 6 : Analyse morphométrique des barres alternes en a et étude des mesures des vitesses annuelles de migration

Critères dynamiques : la digitalisation des contours nous permettra de distinguer les corps sédimentaires mobiles des corps fixes. L'origine de ces derniers sera précisée grâce aux données relatives aux points durs et aux aménagements. Les vitesses de migration des barres seront approximées par la différence entre le tracé chenal principal entre deux années consécutives (tracé central équidistant au limites des macroformes observées ou suivant le parcours des bathymétries de la DREAL Centre). Le tracé sera comparé avec la superposition des bancs digitalisés de manière à voir si celui-ci est cohérent avec les formes en place.

Contrôle géométrique de la formation des bancs à l'échelle du tronçon

Sur la base des résultats des modélisations hydrauliques effectuées par Audrey Latapie dans sa thèse (modèle 1D, *Latapie en cours*) donnés pour Q2 et Q0.8, et des digitalisations effectuées sur les campagnes de photos aériennes, les caractéristiques morphologiques des tronçons homogènes (*Latapie en cours*) vont être comparées. Nous étendons l'étude des comparaisons sur l'ensemble des tronçons de la Loire entre le pont de Cé et Montsoreau afin de voir si les secteurs présentant des barres alternes (t_1 , t_2 et t_3 , respectivement La Chapelle, Souzay et Saint-Mathurin) peuvent se discriminer des tronçons n'en présentant pas (t^*1 et t^*2). Les comparaisons se feront sur la base de différents indicateurs :

- **les indicateurs renseignant directement de la morphologie de la Loire :** on utilisera ici les profils en longs de la Loire dans le Maine et Loire (4 ans,

2000/2003)), les cotes d'étiage de la Loire permettant de caractériser l'incision et l'évolution des pentes entre 1978/1984/1996/2002 et les mesures de bande active mesurées par Audrey Latapie sur photos aériennes dans sa thèse pour les mêmes dates. Le pas de mesure relativement élevé (environ 2.5km) nous a conduit à préciser l'approche sur la bande active par un travail plus précis : la bande active (ensemble eau/sédiments sans végétalisation apparente) a été mesurée tous les 250 m sur tout le site d'étude entre 2002 (année la plus récente possédée sur l'ensemble des tronçons) et 1850 ce qui représente un totale de 558 mesures. Le ratio d'aspect sera déduit des modèles hydrauliques du Q2 et du Q0.8.

- **Les indicateurs hydrauliques :** Nous évaluerons la capacité de transport pour le Q2 avec la formule de Meyer-Peter et Muller 1947 calée pour un paramètre de Shield de 0.045 plus cohérent que 0.047 en Loire moyenne (S.Rodrigues). Comme le signale Degoutte et Sograh/CNRS (1999), les formules de transport solide restent extrêmement imprécises pour calculer des volumes de sédiments mais utilisées en relatif, elles sont extrêmement pertinentes pour évaluer l'impact d'un aménagement ou comparer des tronçons. Dans cette optique, les capacités de transport seront exprimées en pourcentage de la capacité la plus forte. Les données sur les contraintes de cisaillement seront utilisées pour calculer ce que nous appellerons un différentiel de traction, paramètres calculé par la soustraction entre le diamètre moyen en place (BD Granulo DREAL Centre) et le diamètre potentiellement charriable pour un Q2 évalué par la formule de Shield pour un τ^* critique de 0.045.

- **Les modèles déjà établies :** les caractéristiques des tronçons seront intégrées dans les modèles de formation des barres alternes déjà établies (*Izumi et al 1978, Jaeggi 1984 et Ramez 2005*) afin de voir si la formation des barres alternes en Loire moyenne est soumise aux mêmes critères que les rivières déjà investiguées (majoritairement rivières à galets et graviers à forte pente et lit avec rugosité de forme négligeable).

V Résultats

V.1 Hydrologie des sites

Les données journalières ont été reconstituées sur la station du Pont de Cé en fonction des données mesurées sur la station de Saumur-Montsoreau, proche et en service depuis 1916 (on considère que les débits de Saumur et de Montsoreau sont identiques car les stations ne sont séparées par aucun affluent majeur).

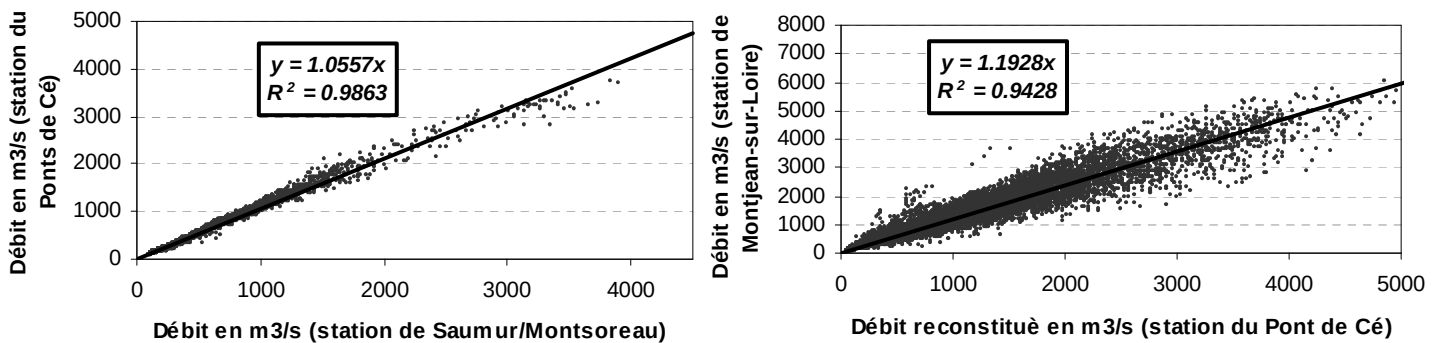


Fig. 7 : Recherche d'une relation entre les stations du Pont de Cé (PK867) et de Saumur/Montsoreau (PK825/812) et contrôle des chroniques reconstituées avec la station de Montjean sur Loire (Pk897)

La bonne corrélation permet d'admettre $Q_{\text{Pont de Cé}} = 1.0557 Q_{\text{Saumur/Montsoreau}}$

Cependant, les relations sont établies sur 10 ans (station du Pont de Cé mise en service en 2000). Etant donné la forte variabilité des débits d'une année sur l'autre (fig.9), une vérification des débits reconstitués sur 84 ans (1916→2000) est faite avec la station de Montjean-sur-Loire (en service depuis 1863) en vue de vérifier la cohérence du résultat. La corrélation avec Montjean-sur-Loire reste assez bonne et permet de valider les ordres de grandeurs des débits reconstitués.

Un travail identique est effectué pour la station de Langeais à ceci près que deux années manquantes (1998 et 1999) sont reconstituées avec la station de Tours, station présentant une bien meilleure corrélation que l'ensemble Saumur/Montsoreau :

Année	Origine du débit	Précision du résultat (R^2)
1996-1997 et 2000-2010	Mesures	1
1998-1999	$1.2247 Q_{\text{Tours}}$	($R^2=0.9751$)
1916-1996	$0.6721 Q_{\text{Saumur/Montsoreau}}$	($R^2=0.9458$)

Tableau 2 : Reconstitution des chroniques de débit sur la station de Langeais

La figure 8 montre que la Loire est soumise à un régime pluvio-océanique simple (une seule alternance de hautes et basses eaux) se caractérisant par des hautes eaux en fin d'hiver et des étiages sévères en été. On peut noter l'amplitude relativement élevée entre hautes eaux et basses eaux (facteur proche de 10). Bien que les hautes eaux soient en moyenne supérieures en Janvier et février, on remarque de nombreux pics de crues en décembre lors de la montée des eaux. Les débits annuels les plus bas ont majoritairement lieu en Septembre.

La construction des courbes de débits classés (annexe 5) permet de calculer les débits caractéristiques de la Loire au droit des différents sites. Cette information permettra de pondérer les débits observés sur les photos par leur occurrence annuelle.

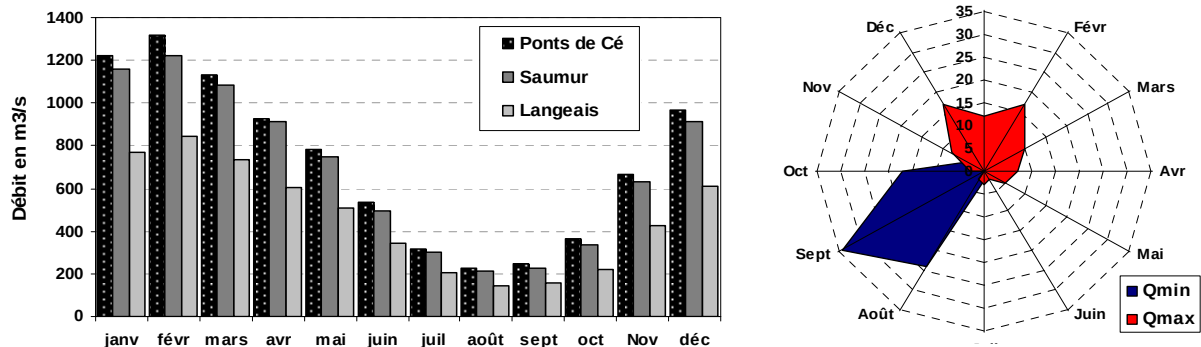


Fig. 8 : Caractéristiques du régime hydrologique de la Loire sur les stations d'étude

Les débits caractéristiques (déterminés sur les courbes des débits classés) de chaque station sont résumés dans le tableau ci-après :

	Qmoyen	Qmédian	Qcarac étiage (dépassé 355 j/an)	Qcarac hautes eaux (dépassé 10 j/an)
Station de Langeais	468	321.3	70.6	1666.8
Station de Saumur/Montsoreau	683	468.9	103	2333.8
Station des Ponts de Cé	721	495	107.7	2575.9

Tableau 3 : Débits caractéristiques

Les débits de crues ont été calculés par alignement des chroniques sur une loi de Gumbel :

Temps de retour (an)	2	5	10	Qmax annuel moyen
Station de Langeais	1949.4	2527.9	2910.9	2055
Station de Saumur/Montsoreau	2838.1	3656.0	4197.6	2988.0
Station des Ponts de Cé	3017	3872	4438	3173

Tableau 4 : Calcul des débits de crues par alignement des maximums annuels sur une loi de Gumbel

Le graphe (fig.9) permet de tempérer la notion « d'année moyenne » sur la Loire en présentant la forte variabilité des écoulements d'une année sur l'autre (*Ecart la moyenne = valeur observée à tx – valeur moyenne pour ce tx calculée pour l'ensemble des tx connus* et *Ecart*

Annuel Cumulé à la Moyenne $\rightarrow EACM = \sum_{12x}^{0x} Em(n,x)$ avec $Em(n,x) = \text{Ecart mensuel moyen}$

pour un mois n et une année x = $Q_{\text{moy}}(n, x) - Q_{\text{moy}}(n, \text{année } 1 \text{ à } x)$. De telles fluctuations restent tout à fait concordantes avec un régime majoritairement pluvial dans la mesure où ce dernier reste dépendant de l'aléa climatique ou « caprice des pluies ».

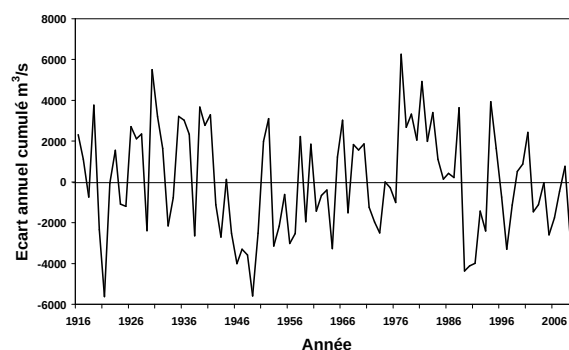


Fig. 9 : Mise en évidence des variations interannuelles du régime hydrologique de la Loire

V.2 Bilan sur les données

V.2.1 Les aménagements en Loire moyenne

L'analyse reprend l'inventaire des aménagements recensés dans les bases de données mises à disposition par les services de l'Etat. Les ouvrages de navigation (épis-duits) sont majoritairement présents sur le tronçon T*2. La cartographie des aménagements (annexe 4) ou des secteurs soumis à entretiens des berges et du lit ne montrent aucune corrélation avec la présence de barres alternes. Les agents de la DDT 49 expliquent cependant être intervenus plusieurs fois sur les barres sédimentaires forcées de T2 et T3 (ile du grand buisson) pour dévégétaliser et scarifier les structures. A noter que les deux anses d'érosion sur T3 (ile du grand buisson et à l'amont du pont) maintiennent plus ou moins en permanence des barres forcées. Un enrochement relativement important a d'ailleurs été mis en place sur le site du Grand Buisson.

Ponts	Année de construction	Note
La Chapelle	1834 - 1871	
Montsoreau	1901	Destruction guerre 39/45, reconstruction 45?50
Saumur amont	1982	
Saumur (Cessard)	1770	
Saumur aval	1950	
Gennes (Les rosiers)	1847	Destruction guerre 39/45, reconstruction 1948
Saint-Mathurin	1847	Destruction guerre 39/45, reconstruction 1951-1954

Tableau 5 : Date de construction et de destruction des ponts sur le site d'étude

V.2.2 Corrélation entre la présence des barres et les chroniques hydrologiques

L'analyse diachronique présence/absence des barres alternes est présentée dans le graphe suivant :

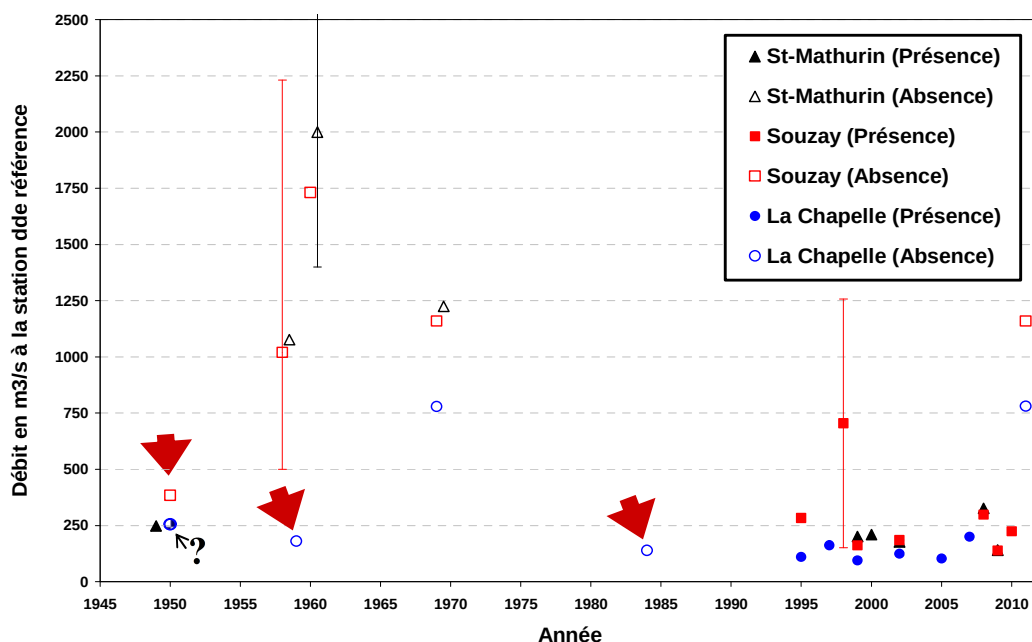


Fig. 10 : Analyse diachronique des photographies aériennes : présence/absence des barres alternes selon la date et le débit

Les cartes de 1850 et les cartes de Cassini ne montrent sur aucun des trois sites la présence de bancs alternés. On observe cependant de nombreux dépôts sur l'amont du site de La Chapelle-sur-Loire (t1) qui n'ont pas été assimilés à des bancs végétalisés.

Sur le site de la Chapelle (tronçon t1) :

La photographie aérienne la plus ancienne remonte à 1950, avant la construction de la chevette orientant les écoulements sur la centrale nucléaire de Chinon. Les barres alternes n'apparaissent clairement qu'à partir de 1995. Notons que de nombreux dépôts sableux s'accumulent le long du tronçon dès 1950 autour de portions d'îlots végétalisés. La qualité de la photo de 1950 (fig.11) met en évidence des formes de fond dont l'organisation rappelle celle de barres alternes en configuration multiple. Les surfaces émergées sont cependant inférieures avec les surfaces des années 1990/2000 pour des gammes de débits identiques. On remarque sur la photo de 1959 l'impact hydraulique relativement important de la construction de la chevette au droit de la prise d'eau d'EDF. La mise en place du seuil engendre une rehausse significative des lignes d'eau comme en atteste le débit inférieur ($181\text{m}^3/\text{s}$ pour 1959 contre $255\text{m}^3/\text{s}$ pour 1950) laissant émerger de plus faibles surfaces (fig.29). De même, la formation très nette d'îles très végétalisées juste en amont laisse à penser que le calage des lignes d'eau impacte l'hydrodynamique de la Loire.

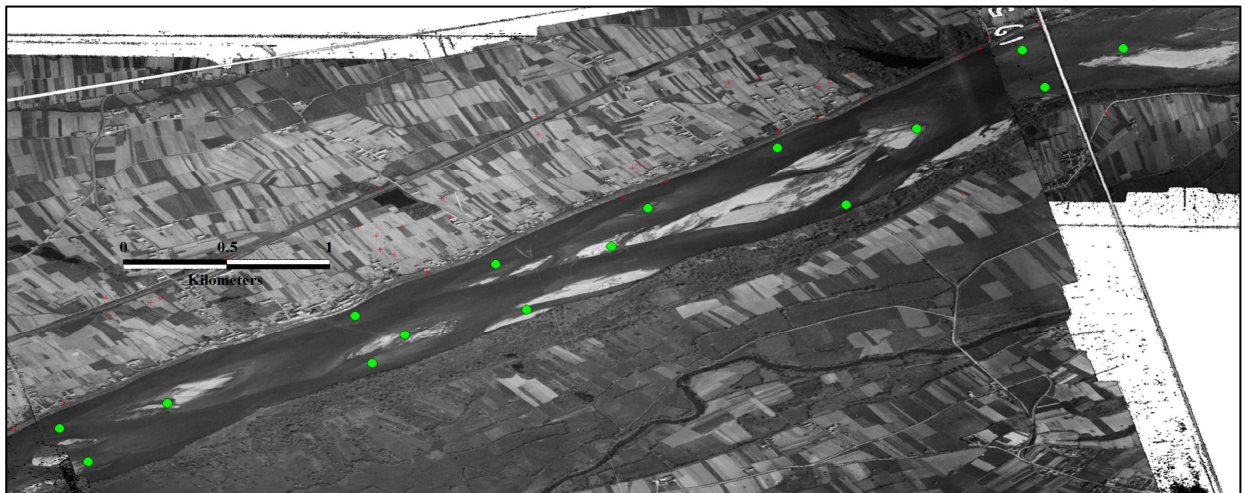


Fig. 11 : Analyse des macroformes alluviales sur le site de La Chapelle-sur-Loire en 1950

Sur le site de Souzay (tronçon t2) :

Les images de 1950 mettent en évidence des dépôts liés à la végétation sur le tronçon. Il est intéressant de noter que ces différents dépôts sont localisables aux mêmes endroits sur les photos aériennes plus récentes ce qui atteste de leur importance sur l'organisation sédimentaire du secteur. Dans une moindre mesure que pour t1, on peut vaguement distinguer en certains points des macroformes immergées rappelant une configuration alternée.

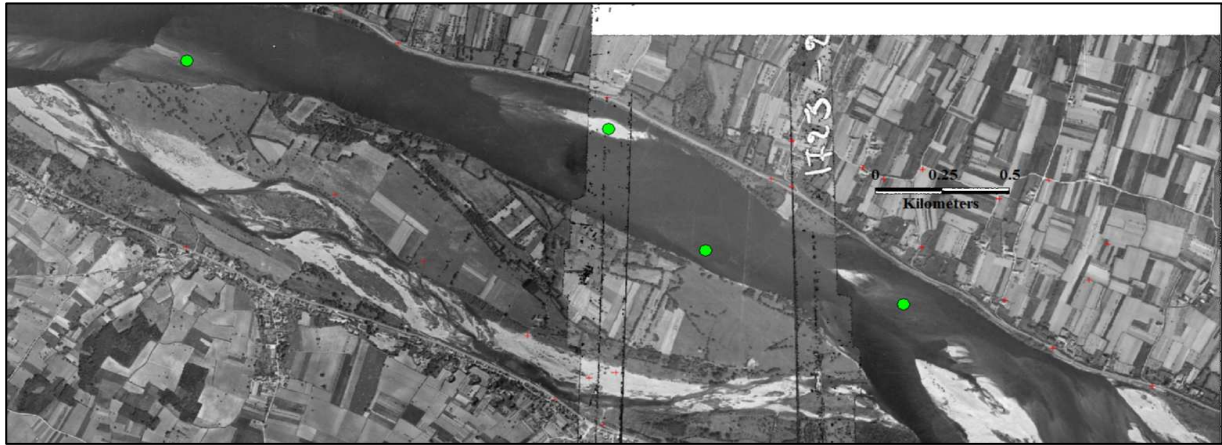


Fig. 12 : Site de Souzay en 1950

Sur le site de Saint-Mathurin (tronçon t3) :

A l'opposé des tronçons t1 et t2, les photos de 1949 attestent clairement de la présence de barres alternes bien formées sur le site de Saint-Mathurin. La taille des bancs semble cependant moins importante en que dans les années 2000 pour des gammes de débits identiques.

Les observations de terrain (2010/2011) et les photos aériennes en crue ne permettent pas de voir les barres. Le tableau suivant retrace pour chaque tronçon le débit le plus haut où des barres alternes sont visibles et le débit le plus bas où elles ne le sont plus.

Q (m ³ /s)	t1	t2	t3
Q _{max} visible	200	284	326
Q _{min} non visible	780	1160	1077

Tableau 6 : débits limites d'observation des barres alternes

L'analyse ne concerne que les photos dont la date est postérieure à l'observation nette de macroformes pour des débits d'étiage. Nous ne possédons cependant pas de donnée concernant le degré de déstructuration des macroformes et l'importance de la submersion selon les débits. Pour les 3 sites, les débits où les barres ne sont pas observables sont plus de deux fois inférieurs au débit caractéristique des hautes eaux (dépassé 10j/an).

V.3 Caractéristiques morpho-dynamique des barres alternes à l'échelle des sites

V.3.1 Digitalisation des corps sédimentaires, configuration, mobilité et vitesses de migration

La superposition des contours digitalisés (annexe 1) a pour but de faire la distinction entre barres fixes et barres mobiles. On remarque la présence de corps fixes en rive droite à l'amont de t1 et t3 en rive droite et rive gauche sur t2. La présence de ces barres forcées semblerait être corrélée à la présence d'îles sur t1 et t3 et du pont de Monstoreau sur t2. Comme il est noté en 1 et 2 sur t1 (annexe 1) les îles exercent un « forçage » des écoulements sur un cotés et une déstructuration et accumulation temporaire des corps sableux en migration sur le coté opposé. On peut généraliser cette observation sur l'île de Saumur sur t2 et l'île de Mesengean sur t3.

En ce qui concerne les configurations des barres, **seul le site de Saint-Mathurin présente une configuration type « single bar » marquée avec des espacements et des formes régulières (fig 1 et 13).**

Les sites de Souzay et de La Chapelle ont de grandes disparités selon les années et les débits. La régularité des formes et leur géométrie sont fortement impactées par la présence des îles et de nombreux chenaux segmentant les macroformes. On peut cependant remarquer un changement de configuration sur le site t2 (fig13). Les bancs passent d'une configuration « multiple bar » à « single bar » lors du resserrement du chenal au niveau de l'île de Souzay (flèche rouge et bleu sur la figure). Cette observation confirme que la forme du chenal a un impact localisé sur la configuration des barres. On peut faire la même observation sur le site t1 pour les photos postérieures à 1960 ou l'on discerne, en absence de végétation, une configuration « multiple bar » (fig.1 et fig.13), il est fort probable que le passage d'une configuration à l'autre soit du aux instabilités hydrauliques engendrées par les îles. Pour mémoire (suite aux entretiens avec la DDT du Maine-et-Loire et l'analyse de photographies de hauts résolution), certains dépôts ont tendance à se végétaliser. La colonisation végétale concerne logiquement les barres forcées ou fortement influencées par les îles. Des opérations de coupes et de scarifications ont déjà été réalisées par les services de l'Etat sans pour autant réussir à redonner leur mobilité aux barres forcées⁴. La figure suivante retrace pour deux années différentes les contours des bancs avec distinction entre les formes libres et celles influencées par les îles ou ouvrages fixes. A noter que même si une forme semble en apparence libre, elle peut très bien se retrouver sous l'influence des instabilités provoquées par les éléments forcés.

⁴ Cette analyse sortant du cadre du présent rapport n'a pas été poussée plus loin cependant, le phénomène méritait d'être remarqué.

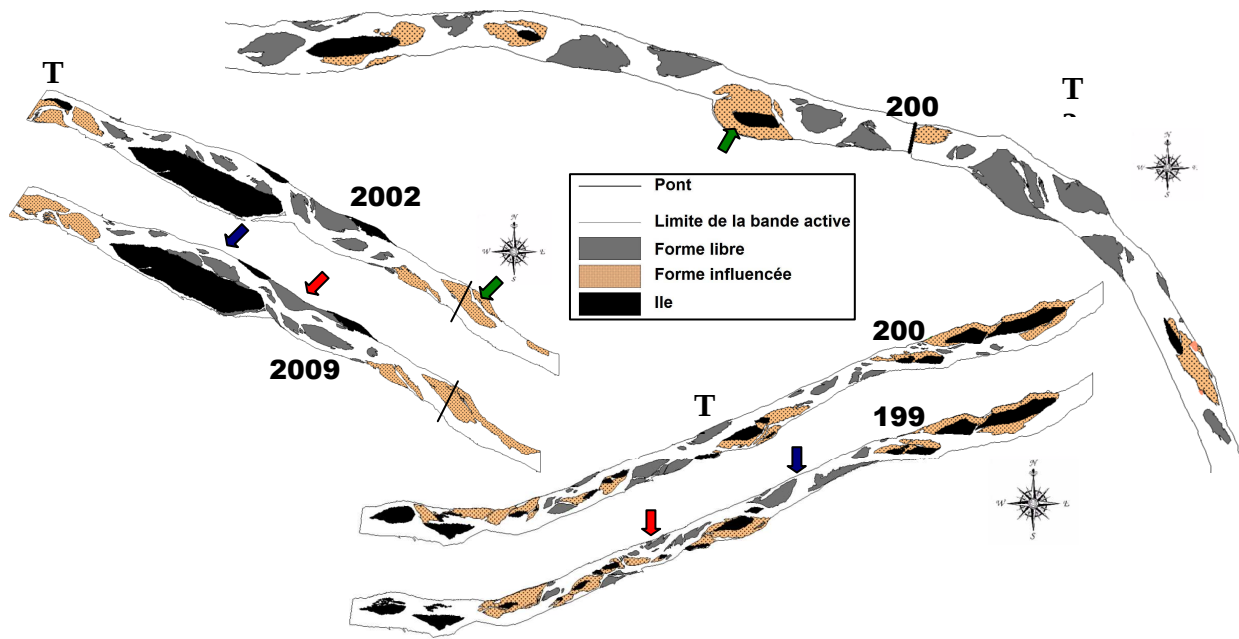


Fig. 13 : Résultats des digitalisations : morphométrie des barres alternes sur les différents sites

V.3.2 Analyse de la morphométrie des unités libres

L'analyse porte ici sur les unités sédimentaires que l'on peut assimiler à des formes libres (non rattachées directement à des îles). De nombreux auteurs ont proposé des valeurs d'équilibres pour les caractéristiques « largeur » et « longueur » des barres dépendant de la forme du chenal. On peut citer :

	Yalin 1972	Muramoto et al. 1978
Longueur d'onde	6 à 10 W	
Largeur	0.5 à 1W	
Longueur	4 à 6 W	3 à 10 W

Tableau 7 : valeurs de référence d'après la bibliographie (W=Largeur de pleins bords)

La corrélation entre les caractéristiques morphométriques des bancs et la morphologie du chenal est variable selon les sites (fig.14). Le tronçon t3 (qui présente la plus faible variation) et t2 présentent de bonnes corrélations entre la largeur du lit et la largeur max des bancs. Le corollaire sur les longueurs est cependant moins évident. Le tronçon t1 est systématiquement peu corrélé avec la largeur du chenal quelle que soit la variable analysée. Concernant la largeur les relations établies correspondent globalement aux intervalles de valeurs rencontrées dans la bibliographie. Les longueurs sont par contre systématiquement inférieures.

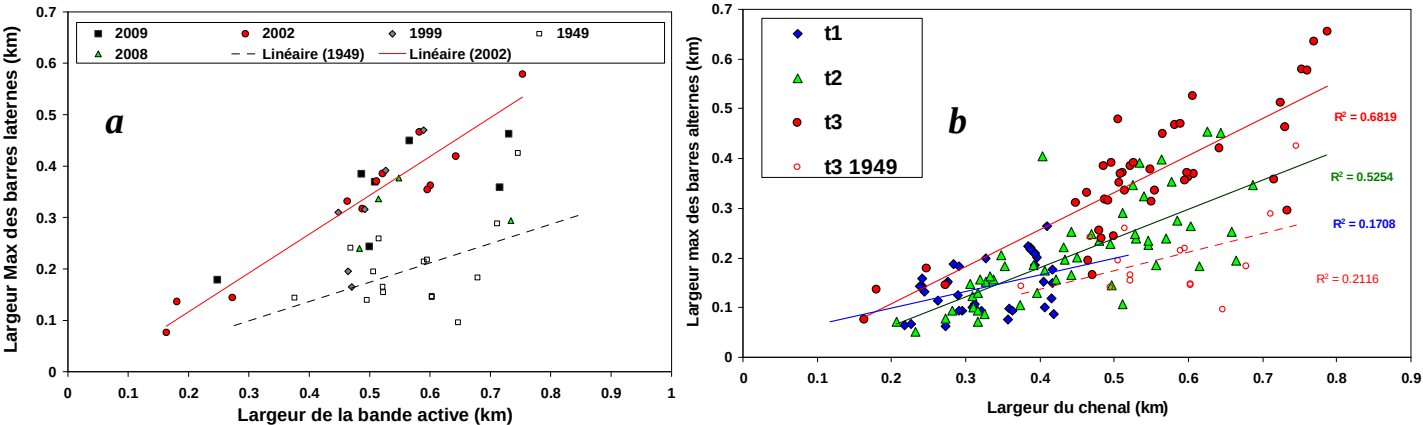


Fig. 14 : Largeur des éléments non fixés en fonction de la largeur du chenal sur le site de Saint-Mathurin (a) et sur l'ensemble des tronçons (b)

		t1	t2	t3	t3 1949
l=f(w)	moy	0.44	0.44	0.64	0.33
	coef.var (%)	33.6	29.7	20.8	31.15
L=f(w)	moy	1.52	1.30	1.46	0.96
	coef.var (%)	38.0	35.9	45.0	38.97
L/l	moy	3.76	3.14	2.87	2.89
	coef.var (%)	44.0	38.1	40.9	22.59

Tableau 8 : Facteur de corrélation reliant les caractéristiques morphométriques des barres alternes à la largeur du chenal

Le tableau 8 traduit bien des différences morphométriques inter-tronçons. Le rapport de forme (longueur/largeur) est décroissant d’amont en aval. Les unités sur t3 présentent les rapports les plus faibles (barres moins longues et plus larges). Bien que visuellement il semble clair que les unités sur Saint-Mathurin se distinguent dans leur organisation et leur forme, les coefficients de variation restent toutefois relativement élevés sur les trois secteurs.

Les longueurs d’onde des sinuosités générées par les dépôts ont été mesurées sur t3 à partir du tracé des relevés bathymétriques de la DREAL Centre et des photos aériennes pour 2009. On remarque la stabilité de la relation entre sinuosité et largeur du chenal. Il faut toutefois noter que les facteurs multiplicateurs moyens restent inférieurs aux données publiées par Yalin en 1972 (tableau 9). Cette observation peut être mise en rapport avec les faibles rapports de forme sur Saint-Mathurin.

	2000	2001	2002	2003	2009
moy	3.69	3.65	3.49	3.47	3.48
Coeft var %	23.36	15.83	22.81	16.34	17.66

Tableau 9 : Variation des longueurs d’onde entre 2000 et 2009 sur le site de Saint-Mathurin

Élément intéressant, bien que l’on distingue une mobilité et une plasticité importante des formes entre les années, la morphologie globale des barres semble fortement corrélée à la forme du chenal et ceci à l’échelle de l’unité sédimentaire elle-même (fig.15).

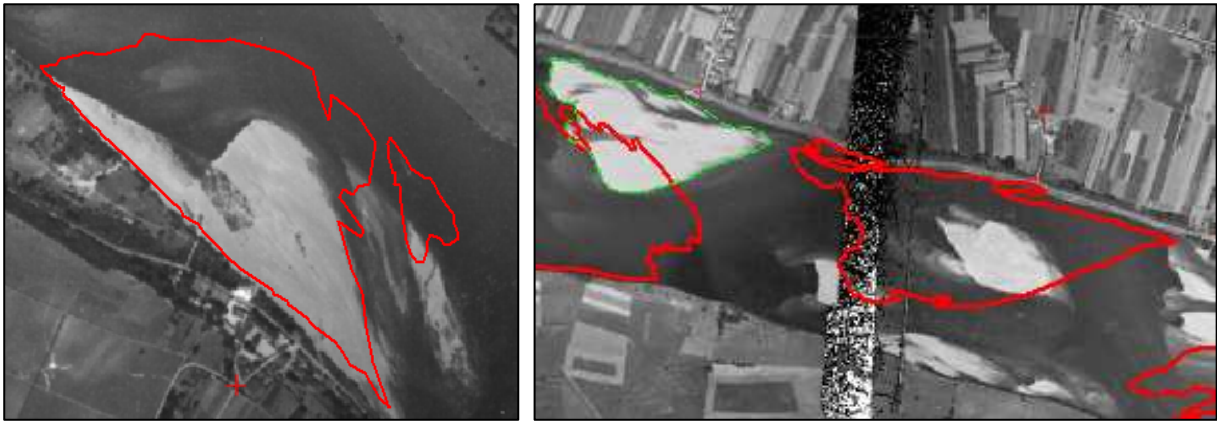


Fig. 15 : Barres alternes en 1949 et 2002 (en rouge) sur le site de Saint-Mathurin

La superposition des contours des barres digitalisés montre nettement la très forte mobilité des corps sédimentaires d'une année sur l'autre (annexe 1). Il s'avère que le pas de temps annuel ne permet que d'approximer les déplacements sur certaines unités bien identifiées. Les distances interannuelles de migration moyennes (fig.16) semblent globalement plus faibles sur le site de Saint-Mathurin (entre 110 et 338 m par an). Il convient de rester prudent sur cette conclusion dans la mesure la structuration plus désordonnée des barres sur le site de Souzay ne permet d'identifier avec certitude la même unité sédimentaire d'un suivi à l'autre. Cela tempère aussi les mesures résultant du suivi de la trajectoire des bateaux opérant les levées de fond entre les années 2000 et 2003 qui donnent généralement des valeurs plus fortes que les photos. Les agents de la DDT du Maine-et-loire estiment de par expérience (rencontre novembre 2010) que les distances annuelles de migration sur Saint-Mathurin se situeraient globalement entre 100 et 150 mètres par an. A titre de comparaison, les vitesses de migration mesurées par Jaeggi et al (cité dans Jodeau 2007) en 1984 sur le Rhin amont étaient de l'ordre de 150 à 400 m par an.

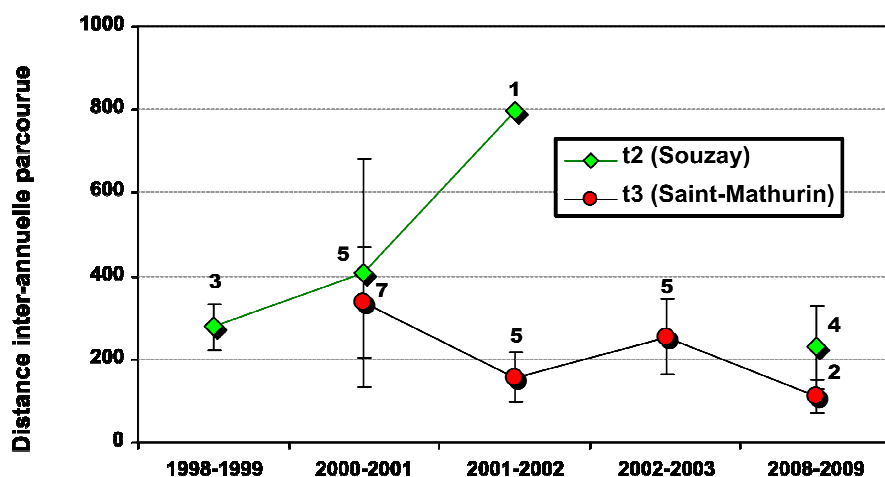


Fig. 16 : Distance de migration interannuelle. Les chiffres symbolisent le nombre de mesures par point

V.4 Contrôle géométrique de la formation des barres à l'échelle du tronçon

V.4.1 Intégration des données issues des modèles hydrauliques dans domaines actées sur les rivières à graviers.

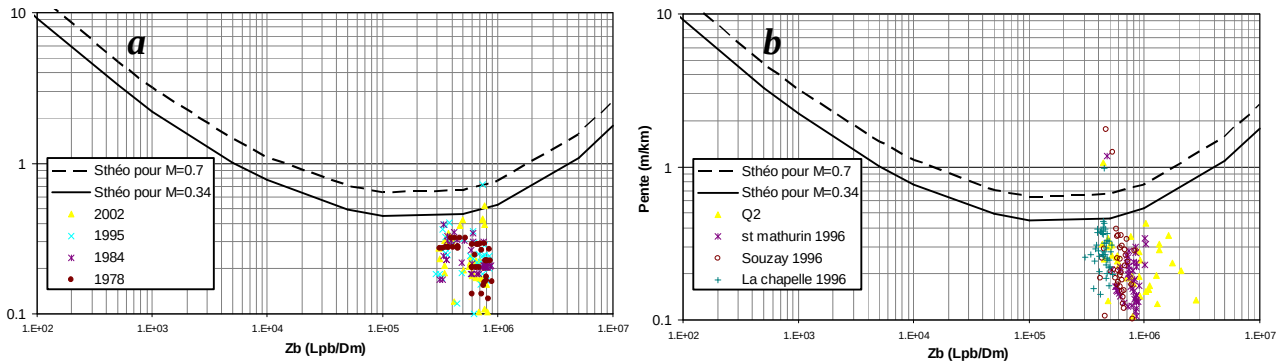


Fig. 17 : Incorporation des caractéristiques morphologiques des tronçons dans le modèle de formation établi par Jaeggi en 1984. Utilisation conjointe des largeurs de bande active issues des digitalisations de photo-aériennes (a) et des largeurs au miroir issues des modèles hydrauliques (b)

L'incorporation des données hydrauliques est présentée ici pour les modèles possédés (Jaeggi et al (1984) (fig.17) , Izumi et al (1978) (fig.18) et Ramez 2005 (fig.19)) . Pour Jaeggi, on constate le décalage important du à la granulométrie qui déplace le nuage de points en dehors des plages investiguées par l'auteur. La majorité des points reste en dehors du domaine de formation des barres. Bien que de nombreux points se rapprochent de la courbe, les pentes sont trop faibles pour permettre l'entrée dans le domaine de formation. Notons que dans b les points (autres que la série jaune) sont issus de secteurs à bancs alternés.

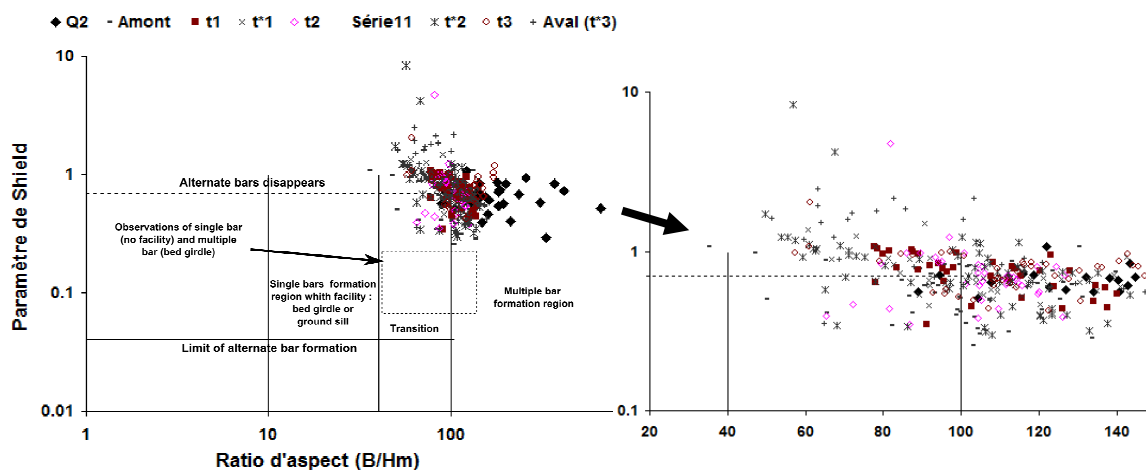


Fig. 18 : Incorporation des caractéristiques morphologiques des tronçons dans le modèle de formation établie par IZUMI et al. En 1978. Les paramètres hydrauliques sont calculés sur le Q2 (losange noir) et le Q0.8 avec pour ce débit différenciation des différents tronçons

Concernant la figure 18, l'ensemble des valeurs se situe à cheval entre le domaine de transition, celui de formation de bancs multiples et celui de disparition des barres alternes. On remarque

cependant qu'un fort taux de sections non situées sur des tronçons présentant des barres se trouve aussi dans le domaine de formation possible.

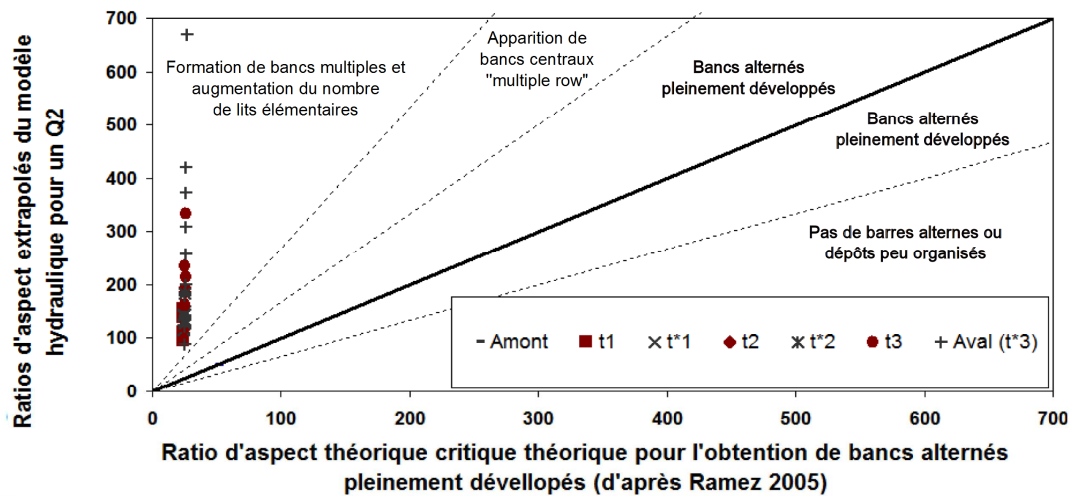


Fig. 19 : Incorporation des caractéristiques morphologiques des tronçons dans le modèle de formation théorique établie par RAMEZ 2005. Utilisation des ratios d'aspect établis pour un Q2

Sur la base des travaux de Jaeggi qui avait déjà proposé une valeur seuil de ratio d'aspect pour la formation de barres alternes ($(4.5L_{pb}/D_m)^{0.15}$) Ramez (2005) a mis en évidence la présence d'un ratio L/P critique (β_c). La valeur a été testée et recalée pour tenir compte du phénomène de granulométrie étendue sur 43 rivières différentes. Les très bonnes corrélations obtenues avec les cas réels lui ont permis d'établir que $\beta_c = 12.2(L_{pb}/D_m)^{0.053}$. L'auteur propose des amplitudes de validité ($8/3 \beta_c$, $5/3 \beta_c$ et $2/3 \beta_c$) permettant de situer l'influence du rapport de forme sur la morphologie des macroformes induites. Une fois de plus les points sont situés dans le domaine de formation des barres multiples sans pour autant que ces dernières soient prépondérantes en Loire Moyenne.

V.4.2 Analyse de la bande active en 2002

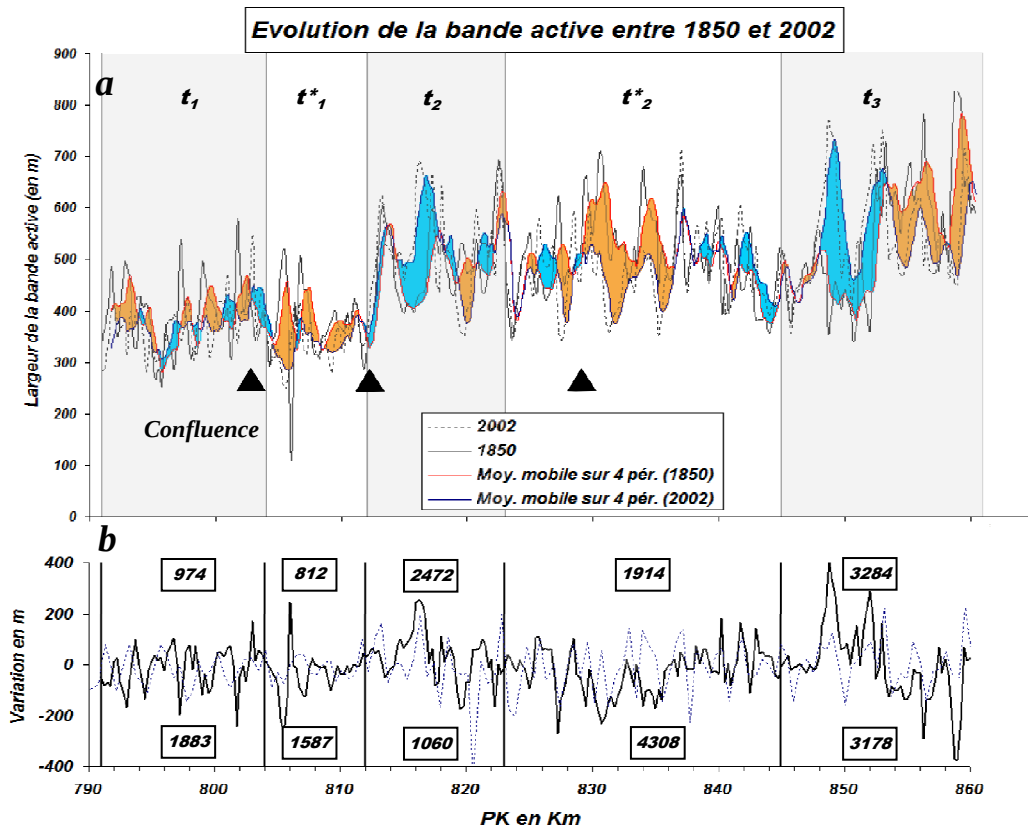


Fig. 20 : Analyse des largeurs de bandes actives sur la base des digitalisations effectuées sur les cartes de 1850 et de 2002 sur un pas de mesure de 250m (soit 558 mesures) en (a) et analyse de la variation en mètres sur chaque transect pour la même période (b). Les encadrés noirs représentent les bilans positifs et négatifs sur chaque tronçon

Tronçon	T1	T*1	T2	T*2	T3
A : Larg.moy (m)	367.3	356.1	519.6	476	548.5
Coefficient de variation	12.4%	16.1%	17.4%	14.8%	17.3%

Tableau 10 : Caractéristiques moyennes du chenal sur les tronçons étudiés

Il est difficile de trouver une tendance moyenne sur l'ensemble des tronçons. Nous précisons que les limites sont reprises depuis les ortho-photos et ne doivent être considérées que de manière globale. La figure 20 et le tableau 10, permettent de distinguer les valeurs en deux groupes séparés par la confluence avec la Vienne (t_1 et t^*_1 pour l'amont, t_2 , t^*_2 et t_3 pour l'aval). On assiste clairement à une augmentation à l'aval de la confluence (environ 40% sur l'on compare les moyennes). Les coefficients de variation restent modérés ce qui est normale pour un cours d'eau type chenal unique anthropisé.

Tronçon	T1	T*1	T2	T*2	T3
A : Bilan (m)	-909.5	- 775	+1412.5	- 2394.2	+106
B : Longueur du tronçon (km)	11	10	11	22	16
A/B	-82.7	-77.5	+128.4	-108.8	+6.6

Tableau 11 : Bilan des gains et des pertes de bandes actives entre 1850 et 2002

V.4.3 Evolution de la bande active entre 1850 et 2002

La figure 20 (a/b) et le tableau 11 mettent en exergue les évolutions de la bande active entre 1850 et 2002. Une fois, encore, on assiste à une grande disparité entre les tronçons. Nous rappelons le fait que ceux-ci ont fait l'objet de mesures particulièrement précises pour l'occasion (un transect tous les 250 m soit 558 mesures). Les bilans ($\sum$ variations) par tronçons sont des indicateurs globaux à analyser avec précaution dans la mesure où ceci ne renseigne pas sur l'intensité et la répartition des perturbations sur le tronçon. Ils permettent cependant de comparer les tronçons, d'approximer les volumes de stockage ou de déstockage de sédiment et la dynamique d'érosion d'un méandre lorsque l'épaisseur des alluvions est connue (Malavoi et Bravard 2010).

Les bilans les plus hauts sont observables sur les tronçons t2 et t*2 (bilan respectivement excédentaire et déficitaire). Le tronçon T3 est intéressant car il présente simultanément un bilan quasiment à l'équilibre et les variations les plus fortes entre 1850 et 2002. Même si les **bilans restent majoritairement déficitaires, la Loire possède encore une petite capacité d'auto-ajustement.**

L'ensemble des éléments marquants sont cartographiés et présenté en annexe 3:

- Le gain sur t2 est dû à une anse d'érosion 3 km à l'aval de la confluence avec la Vienne. On remarque la présence immédiatement à l'amont d'un enrochement de 2 km entretenu par les services de l'Etat. Le bras secondaire de l'île de Souzay s'est partiellement colmaté sans doute en lien avec l'incision du chenal.
- Le déficit sur T*2 s'explique principalement par la fermeture et la végétalisation complète d'un bras en rive gauche sur la commune de Saint-Martin-La-Place (PK 831) et la végétalisation d'une ancienne grève (sans doute perchée par l'incision) juste à l'amont de l'île de Trèves (PK 835).
- Les gains de bande active sur le tronçon t3 sont imputables à deux érosions principales, l'une en intrados du méandre au niveau de Saint-Remy-La-Varenne et l'autre à l'embouchure de la Petite Loire (ancien bras secondaire). Cette érosion est maintenant inactive car un enrochement d'environ 1 km stabilise l'intégralité de la berge en rive gauche. Le secteur est toujours entretenu car la barre sédimentaire fixée par l'enrochement et l'île aux buissons se végétalise progressivement.
- Les pertes sur le tronçon t3 sont principalement imputables à la déconnexion de la boire de Gohier (par laquelle transitait la Petite Loire) et la rehausse (ou le colmatage aval ?) d'une chevrette en rive droite (PK 859)

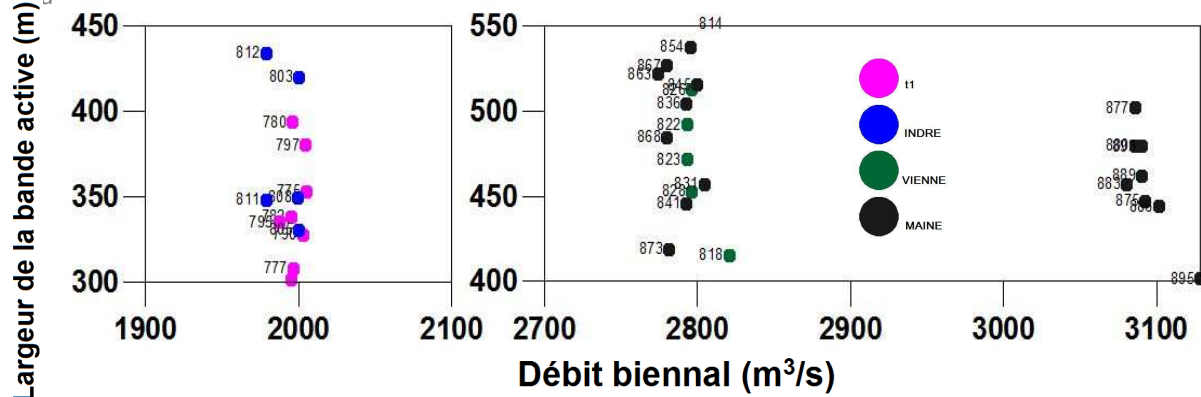


Fig. 21 : Analyse de la distribution des valeurs de largeur de bande active en fonction du débit biennal au droit de la section concernée. La variation des couleurs renseigne les tronçons en aval des confluences

La figure 21 permet de relativiser la notion de mobilité de la Loire et de capacité d'auto-ajustement abordée plus haut en soulignant l'artificialisation locale du chenal. On constate que même si la Loire possède encore une certaine variabilité de forme, il n'y a pas de relation de proportionnalité entre la largeur de la bande active et le débit biennal. En effet, les concepts de géométrie hydraulique chers à la renaturation de cours d'eau (*Malavoi et bravard 2010 et Malavoi/Biotec 2006*) établissant des règles de proportionnalité entre le débit de pleins bords (assimilé au débit biennal) et la largeur de pleins bords (que l'on peut assimiler à la bande active pour les rivières à chenal unique) ne fonctionnent pas sur les tronçons étudiés.

V.4.4 Analyse de l'évolution de l'incision

L'évolution morphologique du fond de la Loire est actuellement suivie par la DREAL Centre via un réseau de points dont les cotes sont mesurées en étiage. On considère que l'évolution des lignes d'eau est représentative de l'évolution de la cote du fond. L'analyse reprend trois chroniques de données :

- 1978/1984 : Tendance à l'incision à l'amont de la confluence avec la Vienne (de 0.05m à 0.7m) et dépôt à son aval sur une trentaine de km.
- 1984/1996 : Incision globale sur l'ensemble des tronçons avec des pics entre l'amont et l'aval du tronçon t3 allant jusqu'à 0.8m.
- 1984/2002 : Dynamique identique à la période 78/84 dans une mesure diminuée.

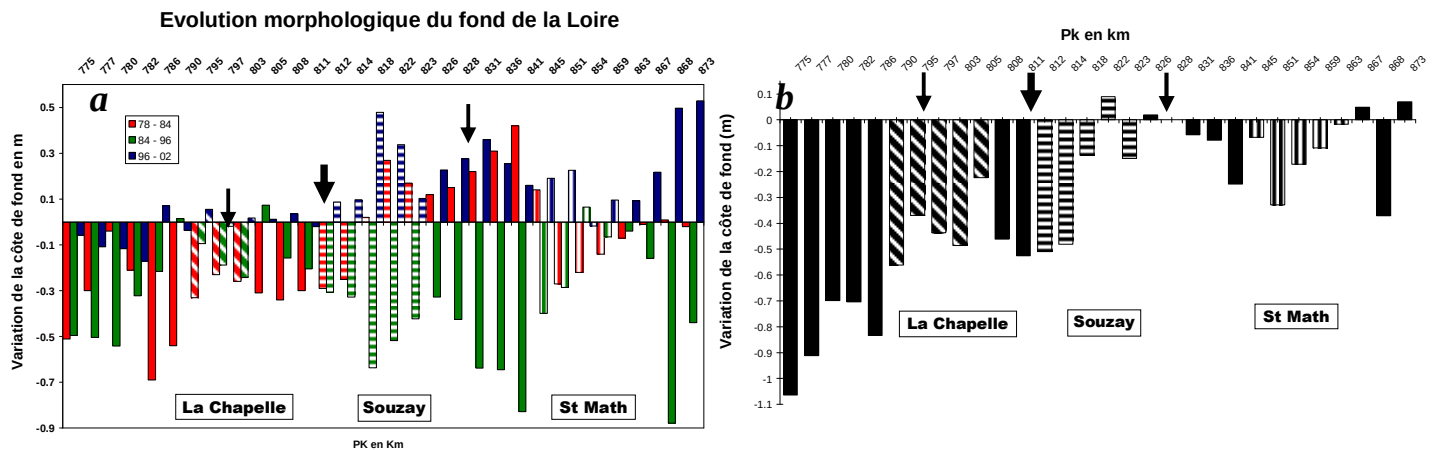


Fig. 22 : Représentation de l'incision via le suivi des côtes d'étiage effectué par la DREAL Centre pour 3 pas de temps en (a) (1978/1984 – 1984/1996 – 1996/2002) et représentation du bilan entre 1978 et 2002 (b). Les flèches noires symbolisent les confluences avec de gauche à droite : l'Indre, la Vienne et le Thouet.

Si l'on raisonne en termes de bilan sur l'ensemble de la période 1978/2002 (fig.22 (b)) l'amont du tronçon T1 s'incise continuellement. Les dépôts aval (peut être influencés de la variation de forme du chenal sous l'effet des contributions liquides et solides de la Vienne) s'échelonnent entre 0.1 et 0.4 m. Tout comme pour les largeurs de bande active, nous pouvons quand même noter que le fleuve garde une certaine dynamique au niveau de ses processus géomorphologiques. On remarque que les plus fortes fluctuations des cotes de fond (t2 et t*2) conduisent à des bilans équilibrés sur certains tronçons. L'enfoncement aval (de l'ordre de 20/30 cm) reste à relativiser étant donné l'incertitude de la mesure.

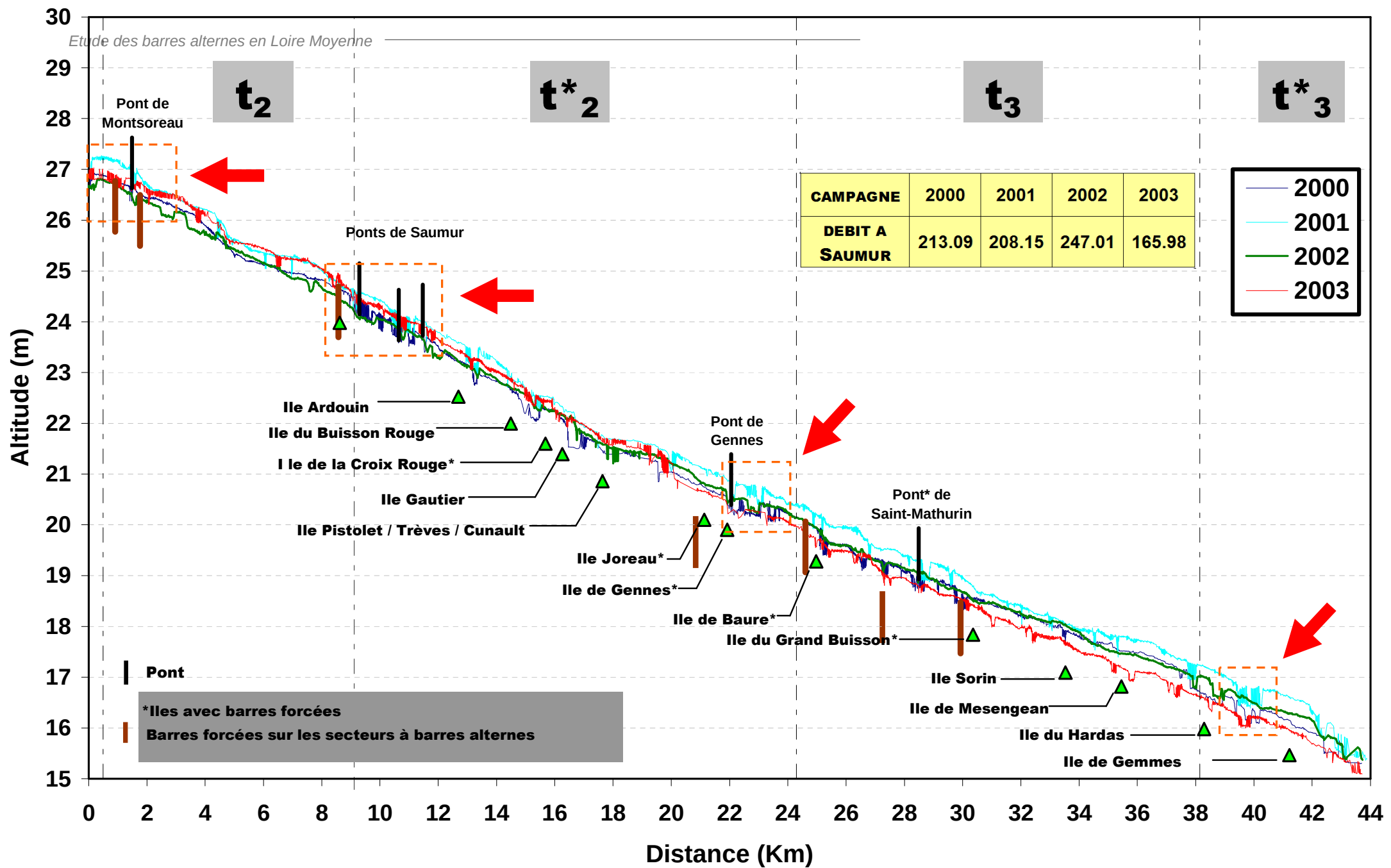


Fig. 23 : Représentation du profil en long de la Loire dans la Maine et Loire ainsi que des principaux ouvrages identifiés sur les photographies aériennes. Les barres forcées représentées sont uniquement celles présentes sur les tronçons présentant des barres alternes

De par la précision des profils (fig.23), la dynamique d'incision peut clairement être abordée, non pas d'un point de vue global comme il a été fait précédemment, mais d'un point de vue local en lien avec les aménagements. On remarque que les variations sont nettement plus accentuées à l'aval. Même si l'on peut éventuellement émettre l'hypothèse que l'exhaussement quasi général des fonds en 2001 est du à un problème de calibrage du sondeur, on remarque l'importance des variations des côtes de fond (pouvant aller jusqu'à un mètre) d'une année sur l'autre. La première conclusion de ce graphique est qu'il semble délicat de statuer sur la dynamique d'incision de la Loire lorsque les mesures sont espacées dans le temps ne comportent que de faibles variations. Les instabilités provoquées à l'aval des îles ou des ponts entraînent de nombreuses fosses d'érosions localisées d'une profondeur globalement comprises entre 30 et 60 cm sur des longueurs pouvant aller jusqu'à 1 km. Notons à l'amont du pont de Gennes l'impact local des déconnexions de bras secondaires (ici en rive droite) entraînant des incisions aussi importantes que les ouvrages.

Les limites générales des tronçons présentant des barres alternes ainsi que les ponts et les îles ont été repris depuis les photos aériennes et repositionnés sur le graphe. Face au nombre important de barres forcées sur les tronçons, nous avons représenté uniquement les barres forcées sur les secteurs à barres alternes. Comme le montre les flèches rouges, l'amont et l'aval des tronçons semblent marqués par la présence d'instabilités du fond en lien avec une barre forcée, un ouvrage ou une île. Cette analyse est intéressante, notamment suite aux observations de barres fixes faites au V.3.1.

V.4.5 Capacité de transport

La différence de traction (d_{tr}) est la différence entre le diamètre potentiellement charriable par la Loire (calculée via la formule de Shield) et le diamètre en place. Pour un τ^* de 0.045

(S.Rodrigues), son expression est la suivante : $d_{tr} = d_{0.045} - d_{moy} = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma_w)0.045} - d_{moy}$

τ = contrainte de cisaillement en N/m^2 - γ_s et γ_w = poids volumiques en KN/m^3 - d = diamètre des sédiments (m)

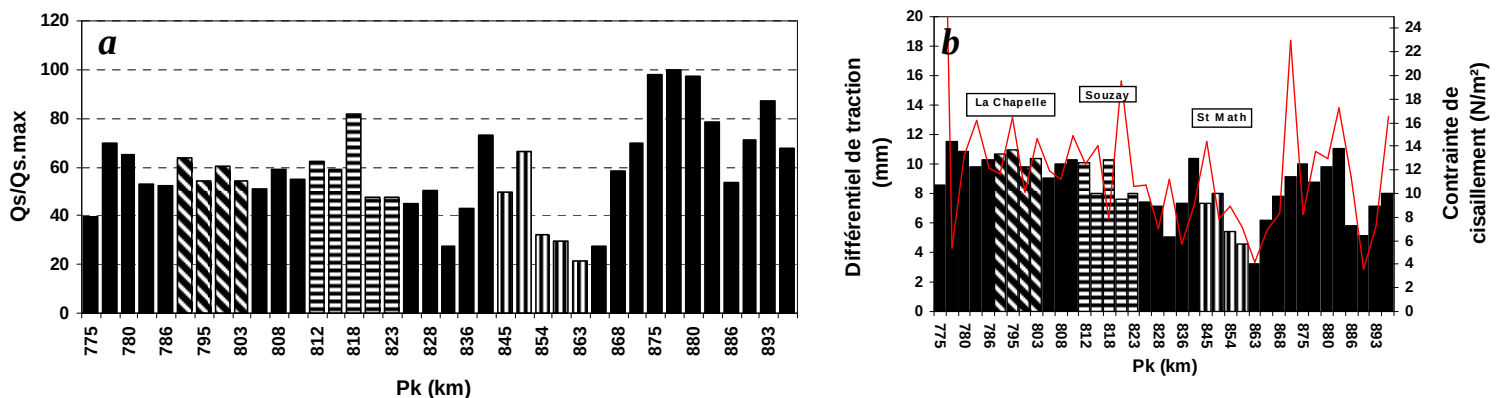


Fig. 24 : Analyse de la capacité de transport relative (évaluée via la formule de Meyer Peter et Muller 1947) sur les tronçons homogènes pour Q_2 en (a) et représentation des contraintes de cisaillement et du différentiel de traction en rouge (b)

La capacité de transport (MPM 1947) et les contraintes de cisaillement calculées pour un Q2 ne permettent pas, même exprimées en relatif, de discriminer les tronçons présentant les barres alternes. On remarque cependant la forte chute au niveau de Saint-Mathurin (à relier avec les dynamiques d'incision moins actives observées sur la figure 22(a) et l'élargissement sur la figure 20)) et la très forte augmentation immédiatement aval (le différentiel de traction passe de 3.5 à 18 mm).

V.4.6 Structure des pentes

Les pentes (calculées via le réseau de suivi des cotes d'étiage) sont relativement faibles et s'échelonnent entre 0.09‰ à 0.72‰. Les amplitudes entre les différents tronçons (fig.25 (b)) ne permettent pas de distinguer sur cet unique critère les tronçons présentant des barres alternes. D'un point de vue chronologique, on assiste à une accentuation des différences locales entre l'année 2002 et l'année 1978 qui présente un profil plus lissé. Les plus fortes augmentations se remarquent à l'aval de t3 et au niveau de t2. Ces deux augmentations pourraient être corrélées avec des resserrements brutaux du chenal principal, en lien sur t2 avec la déconnexion d'un chenal secondaire au niveau de l'Ile de Souzay. Une fois, de plus, ces éléments soulignent le fait que la Loire possède encore une capacité d'auto-ajustement mais que ces ajustement sont le reflet des pressions anthropiques grandissantes sur la seconde moitié du 20^{em} siècle.

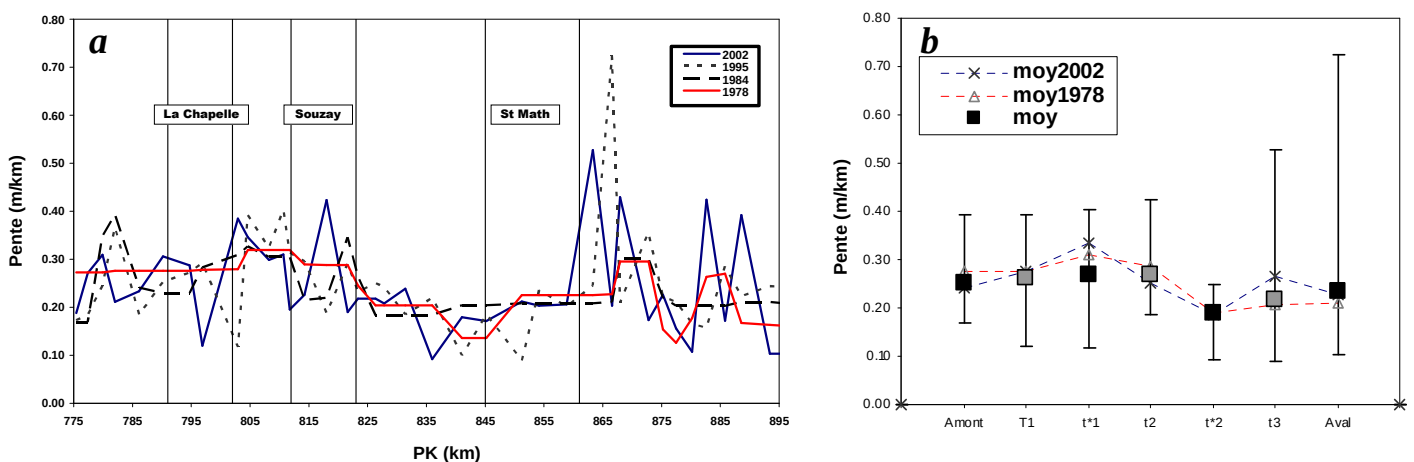


Fig. 25 : Représentation de l'évolution des pentes entre 1978 et 2002 (données Latapie (en cours) calculées sur la base du réseau de suivi des cotes d'étiage de la Loire) en (a) et représentation des valeurs des pentes moyennes (toutes années prises en compte) pour chaque tronçons avec ajout des valeurs maximums et minimums connues sur chaque tronçon en (b)

V.4.7 Ratio d'aspect

Le ratio d'aspect est identifié par de nombreux auteurs comme étant un des facteurs de contrôle majeur de la mise en place des barres alternes. Il est ici évalué pour Q2 et Q0.8 à partir des données disponibles issues des modélisations ($\beta_2 = L^2/A$ et $\beta_{0.8} = H/L$ avec L Largeur au miroir du modèle, A aire de la section mouillée et H hauteur d'eau moyenne). La figure 26 (a) met en

évidence l'impact des aménagements sur la forme du lit. Les principales fluctuations du ratio d'aspect (PK 806 à 815, 826 et 841 et 867) sont à mettre en relation avec des constrictions brutales de la bande active ou l'enfoncement du chenal. Les sections présentant de telles réaction sont systématiquement situées sur des zones d'épis (PK 806 à 815) ou dans des zones urbaines (PK 826 et 841). Les valeurs moyennes sont globalement situées entre 100 et 200 pour le secteur d'étude. Bien que l'on trouve des valeurs moyennes supérieures sur T3, les extremums de chaque tronçon ne permettent pas (fig.26 (b)) de distinguer des plages de valeurs identifiables comme typique des secteurs à bancs alternés.

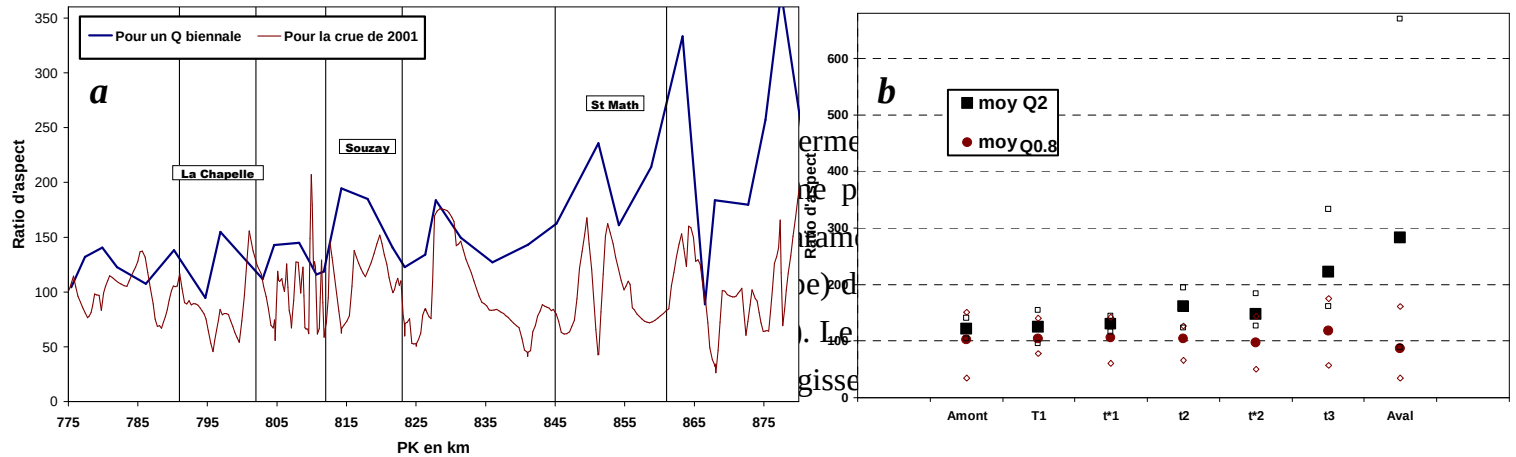


Fig. 26 : Représentation de l'évolution du ratio d'aspect (rapport L/P) pour le Q2 et le Q0.8 en (a) et représentation de la distribution des valeurs moyennes et extrêmes pour ces mêmes débits en (b)

Initialement, deux ACP ont été réalisées (Annexe 2). Une sur les variables de contrôle (ici Q2, Qs(MPM), contrainte de cisaillement et puissance spécifique) et une sur les variables de réponse (pente, vitesse, largeur de bande active, granulométrie, incision et ratio d'aspect). Les 2 analyses sont logiquement corrélées et discriminent clairement deux groupes d'individus situés entre l'amont et l'aval de la confluence avec la Vienne, répartis le long des axes en fonction de leur PK. L'évolution naturelle des variables le long du continuum biaise ici l'objectif de l'analyse. Pour pallier à cela, les variables tirant naturellement vers une répartition des individus le long des PK ont été supprimées de l'analyse (fig.27 (a) et (b)). Le choix a aussi été fait de pondérer les largeurs de bande active (B) mesurées sur ortho-photographie par la valeur de débit biennal transitant au droit de la section pour masquer « l'effet confluence ».

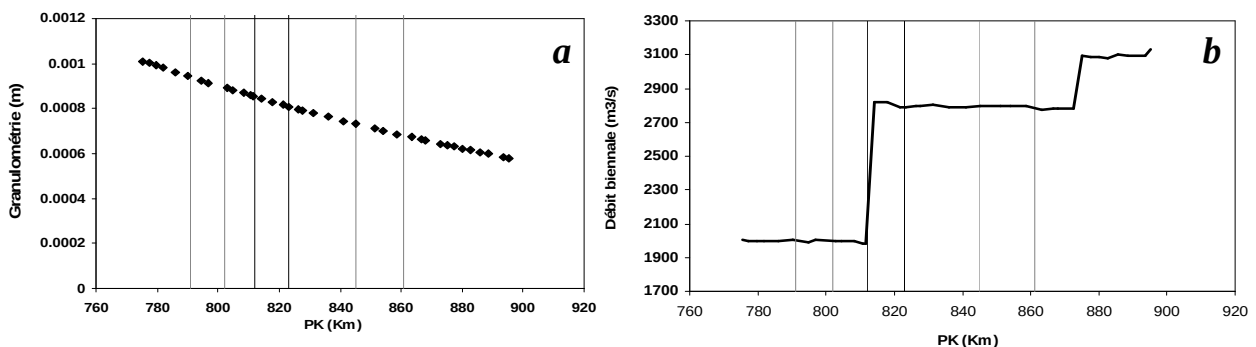


Fig. 27 : Représentation de l'évolution de la granulométrie moyenne (a) et débit biennal (b) en fonction des points km

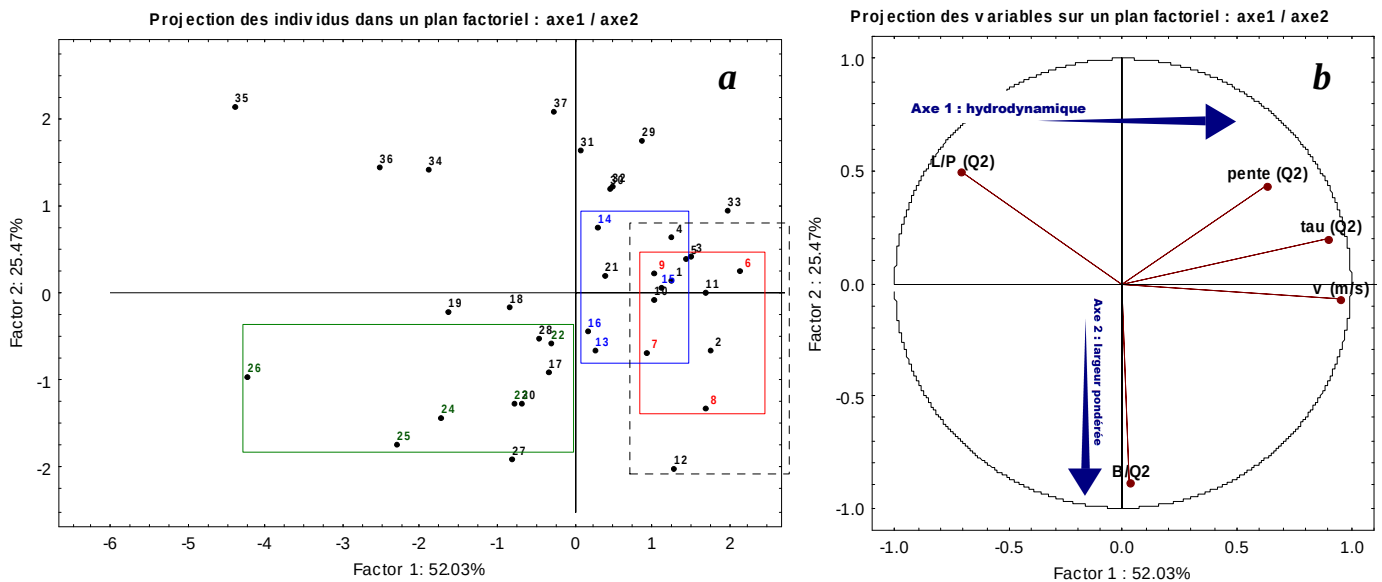


Fig. 28 : Analyse en composante principale sur les caractéristiques morphologiques et hydrauliques (variables) des tronçons (individus) avec projection des individus (a) et des variables (b) sur un plan factoriel

L'axe horizontal répartit les individus selon un gradient que l'on peut qualifier « d'hydrodynamique » : les variables « contrainte de cisaillement » et « vitesse » (« pente » dans une moindre mesure) y sont logiquement très corrélées. L'axe vertical renseigne préférentiellement du rapport $B/Q2$. Une fois encore, la confluence avec la Vienne (tronçons dans le rectangle en pointillés excepté 15) démarque les tronçons. L'analyse montre clairement que, au regard des variables analysées, les tronçons présentant des barres alternes ne peuvent se distinguer des autres tronçons en formant un groupe aux caractéristiques homogènes. On pourra cependant distinguer trois groupes sur l'ACP :

- Les tronçons issus de T1 sont caractérisés par des vitesses, des contraintes de cisaillement et des pentes plutôt fortes avec des rapports $B/Q2$ moyens. Les tronçons sur T2 s'inscrivent dans la même typologie (en relatif par rapport à T3) mais avec des valeurs moins fortes.
- Le tronçon T3 s'apparente pratiquement à un unique groupe présentant des conditions hydrauliques peues ou moyennement intenses logiquement conjuguées à un lit large et peu profond. Le ratio d'aspect semble clairement un critère ici prépondérant pour la discrimination.
- Les tronçons aval à T3 présentent des conditions hydrauliques variables mais se distinguent par un resserrement du chenal et des ratios d'aspect plus faibles.

On remarque très bien que seuls les tronçons sur T3 se distinguent de manière homogène. T1 et T2 sont relativement mélangés avec des individus issus de t^*1 et t^*2 .

VI Discussion

Données sur l'ancienneté des formes

Les données récoltées dans le cadre de l'étude permettent d'attester avec certitude que les barres alternes étaient déjà présentes en 1949 sur le site de Saint-Mathurin. De même la structure de propagation des formes de fond observée en 1950 sur le site de La Chapelle-sur-Loire permet de fortement suspecter leur présence à cette époque en configuration « multiple row ». Il est beaucoup plus délicat de conclure sur le site de Souzay dans la mesure où les photos postérieures à 1950 les plus récentes sont datées de 1995. Nous pouvons juste citer pour mémoire la description d'Edouard Martin, lieutenant de réserve au 6^{em} Génie qui, chargé de la destruction de pont de Montsoreau le 14 juin 1940 décrit : « la Loire était basse et la rive très ensablée ».

Les données relatives à la morphologie des sites et aux aménagements sont pour la plupart postérieures à 1945. Elles ne remontent donc pas assez loin pour expliquer un changement radical de morphologie entraînant la formation des barres alternes. Le fait que les cartes de Cassini et les cartes de 1850 ne présentent pas de bancs alternés pourrait permettre de resserrer la période où les bancs se seraient potentiellement mis en place. Cependant, bien que les dépôts sableux soient clairement identifiés, notamment dans les chenaux secondaires, sur les différentes cartographies précitées, nous n'avons pas d'information quand à la période d'édification de cartes. Le présent travail met clairement en évidence le fait que les barres alternes ne sont pas visibles durant une bonne partie de l'année. Il est donc possible qu'elles n'aient pas été cartographiées à l'époque.

Sur l'impact des aménagements

L'analyse diachronique des photographies nous permet de déduire que les impacts anthropiques issus de la seconde moitié du 20^{em} siècle (extraction de granulats et gestion hydraulique principalement) ne sont pas responsables de l'initiation du phénomène sur les sites T1 et T3. Les traces d'ouvrages de gestion hydraulique (épis, duits...) sont de plus relativement éparpillées sur les tronçons (Annexe 4). Cependant, il ressort clairement qu'au niveau local les aménagements (et/ou dérèglements hydromorphologiques qu'ils induisent) ont un impact fort sur l'organisation des structures sédimentaires. Les agents de la DDT du Maine-et-Loire estiment que les ponts perturbent fortement le transit sédimentaire en engendrant de grosses plages de dépôts vaseux difficilement reprises en période estivale même après intervention. Les photographies confirment largement cette observation notamment au niveau du Pont de Montsoreau (t2) où s'est formée une barre forcée exactement à l'amont des chaînes de barres alternes. Une des possibilités évoquées pour l'induction des barres par les ponts fut l'accumulation locale d'éléments générateurs d'instabilités au niveau des piles dans la mesure où la plupart des ponts ont été reconstruits à la sortie de la guerre 39-45 sur de nouvelles fondations tout en laissant en place les anciennes. Cette hypothèse est cependant remise en cause par l'absence de pont sur le site de La Chapelle et le fait que les formations préexistaient sur le site t3 en 1949 alors que le pont de Saint-Mathurin n'était pas encore reconstruit.

L'organisation régulière en configuration multiple des formes de fond sur t1 en 1950 contraste fortement avec l'irrégularité des dépôts que l'on observe actuellement. La multiplication des îles et des surfaces végétalisées impacte fortement l'organisation des dépôts et des migrations sédimentaires. La comparaison des photos de 1950 et de 1959, période durant laquelle la Chevette permettant l'alimentation de la centrale nucléaire de Chinon a été mise en place, met clairement en évidence l'impact hydraulique de cette dernière sur la dynamique amont (effet « plan d'eau », baisse apparente de l'activité hydrodynamique de la Loire). Il est cependant difficile de conclure sur le rôle du seuil vis-à-vis de l'important développement des surfaces végétalisées sur t1 dans la mesure où le réseau de suivi des cotes d'étiage de la DREAL indique que le tronçon t1 est celui présentant les plus fortes incisions de tout le secteur d'étude (fig.22) (peut être en lien avec la fermeture d'un large bras secondaire en rive droite à l'amont du site).

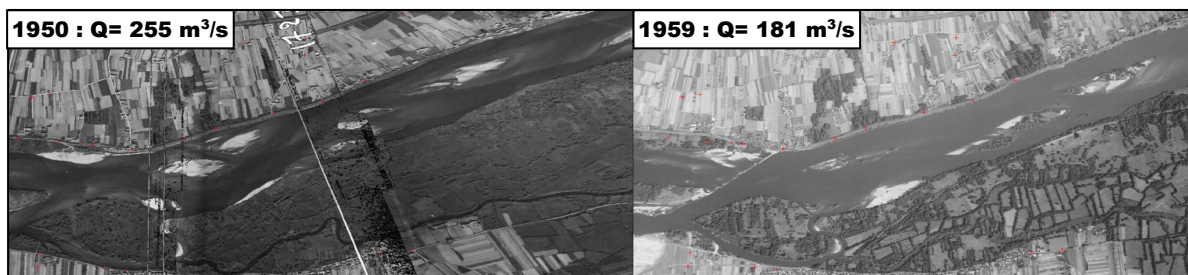


Fig. 29 : Impact de la construction de la Chevette en aval de t1

Sur la configuration des sites

Malgré le fait que les trois sites d'étude présentent des configurations relativement différentes, un des éléments marquant de ce travail est la mise en évidence de barres forcées en « tête de chaîne » et ceci pour chacun des sites. Elles proviennent de la déconnexion d'un bras secondaire sur t1, d'une île végétalisée à l'amont d'un élargissement sur t3 et du pont de Montsoreau sur t2. A noter que ces barres forcées sont présentes en 1949 sur t3 mais pas sur t2 et t1 (bras actif) bien que l'île en cours de formation contraigne déjà fortement la largeur du chenal en rive gauche. Nous observons donc le même schéma sur l'amont de chacun des sites : un chenal plus étroit dont la largeur est comprimée par une barre forcée suivie par un élargissement plus ou moins fort. Il est intéressant de noter que la barre forcée à l'amont du pont de Souzay en 1950 avait une superficie et un rôle déflecteur bien moins important que celle qui est actuellement en place et qu'à cette date, les documents en notre possession ne montrent pas de barres alternes (fig.30/12).



Fig. 30 : Barre forcée au niveau du pont de Montsoreau en 2002 (a) et 1950 (b)

Bien que la synthèse bibliographique (*Colombini et al 1984, Jaeggi 1987, Ramez 2005 Izumi et al (1978), Sohei Abe (1982)*) montre l'importance prépondérante des caractéristiques morphologiques du chenal pour l'induction et le développement des barres alternes, nous pouvons émettre l'hypothèse que les barres forcées jouent un rôle majeur pour l'initiation du phénomène. Elles induiraient en complément d'un changement de configuration ou de direction du chenal une première sinuosité au sein d'un chenal préférentiel d'écoulement (sans doute creusé en décrue) dans le lit mineur qui ne présente jamais de barre. Bien qu'il faille vérifier par des investigations de terrain, il est probable que ce chenal soit pérennisé par un phénomène d'incision en lien avec la constriction exercée par les structures fixées. De plus, les analyses des profils en long (fig.25) montrent clairement sur l'amont et l'aval des tronçons des perturbations au niveau des lignes de fond en lien avec la présence de ces barres forcées ou d'un changement brutal de la largeur du chenal. Cette observation rejoint certaines publications (citées par S.Rodrigues (2010) dans son analyse bibliographique) montrant des relations entre les barres libres et les barres forcées (*Tubino et Seminara 1990 et Tubino et al. 1999*). Il convient toutefois de rester prudent sur le rôle tenu par les barres forcées et ceci pour deux raisons : premièrement nous n'avons pas de photographie ou de donnée sur la configuration morphologique du lit avant la mise en place des barres alternes et deuxièmement, la barre forcée sur le site de Saint-Mathurin en 1949 était beaucoup moins développée qu'aujourd'hui tandis que la qualité de la photographie ne permet pas de distinguer les formes de fond et un éventuel chenal préférentiel d'écoulement.

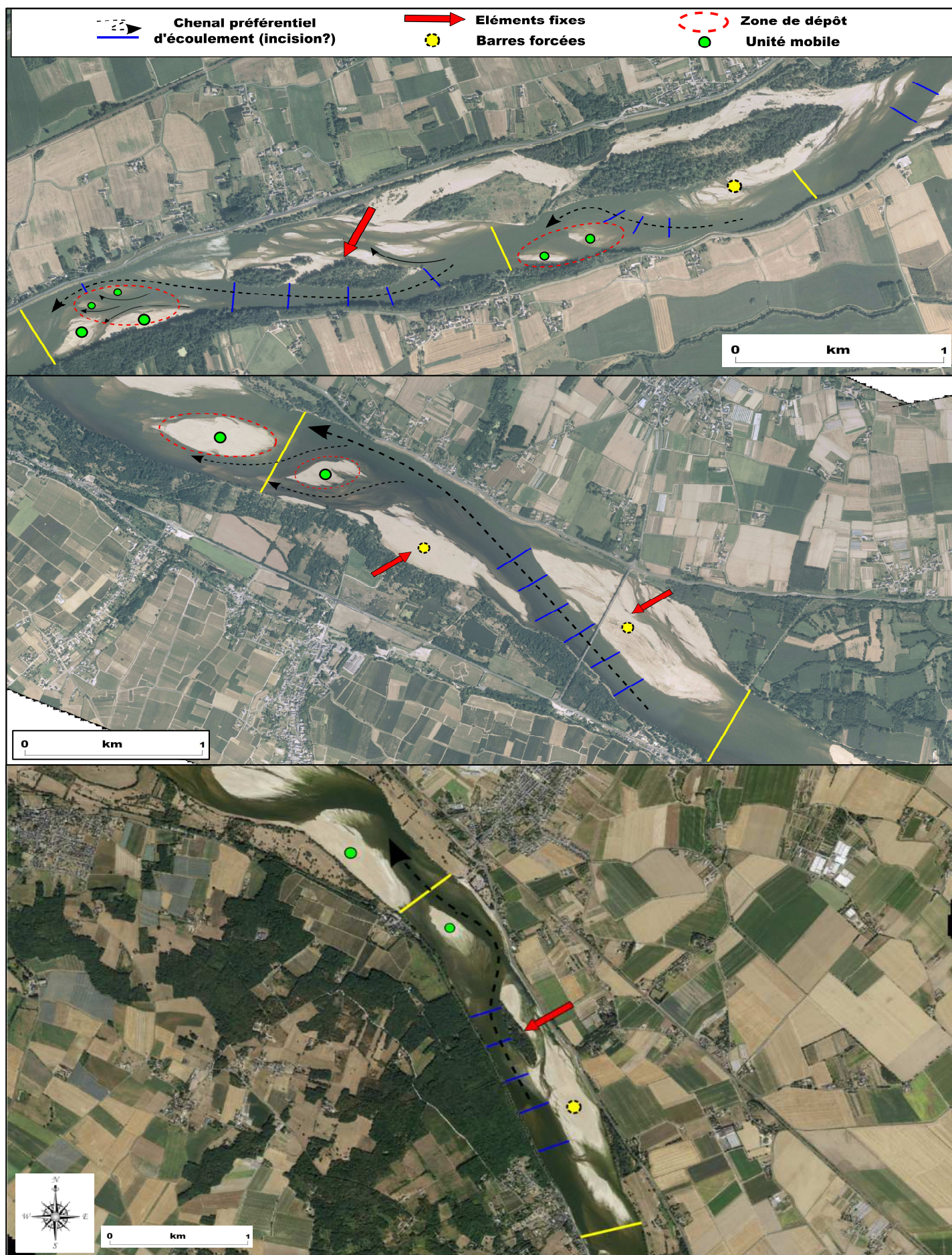


Fig. 31 : Influence des barres forcées sur la configuration du chenal

Sur la morphométrie des barres alternes

Il est possible d'établir une relation claire entre la largeur du chenal et les caractères longueur et largeur des barres sur les sites t2 et t3. Les corrélations restent systématiquement meilleures sur t3 qui est le seul à présenter une configuration homogène typique de barres en configuration simple. Les nombreuses îles, forçant les dépôts ou induisant les figures de migration des sédiments, altèrent les relations sur t1 et dans une moindre mesure sur t2. La forme triangulaire typique des barres sur t3 (caractérisées par de plus faibles rapports de forme) est pérenne depuis 1949, élément intéressant corroboré par l'analyse de la morphologie en rapport avec la localisation des barres (fig.15) sur le tronçon. Il semblerait que, même si la largeur et la longueur des unités ont fortement évolué depuis 1949, tableau 8), la forme globale de l'unité dépende de son positionnement sur le tronçon soit de la configuration locale du chenal. Cette répétition des formes dans le temps et dans l'espace n'est pas observée sur les deux autres sites. On peut toutefois se demander si la taille plus petite des barres de 1949 n'est pas due à de plus faibles apports sédimentaires par rapport à aujourd'hui ou à une étape de mise en place récente des unités encore en cours de formation.

Concernant les coefficients de corrélation avec la largeur du chenal, il est intéressant de noter que nous nous trouvons (exceptée pour la relation concernant la largeur des unités sur t3) systématiquement en dessous des constantes trouvées dans la littérature en notre possession (Yalin 1972, Muramoto et al.1978, Malavoi et Bravard 2010). Cette constatation pourrait traduire d'un fonctionnement différent et souligne encore que d'autres investigations doivent être menées pour comprendre la dynamique des barres dans les lits sableux larges présentant des processus migratoires plus complexes que dans les rivières à galets sans rugosité de forme.

Deux éléments sont venus « perturber » la digitalisation des contours des bancs sur les trois sites : la présence de très nombreux chenaux segmentant les barres et les difficultés sur les photographies de qualité à distinguer des contours nettes en raison de la visualisation de la partie immergée de l'unité et des mésoformes de fond en cours de migration qui en résultent. L'analyse des diamètres charriables en crue (fig.24) montre clairement que la Loire est à même de transporter l'ensemble de son panel granulométrique en évitant les phénomènes durable de trie et de pavage. Cela pourrait expliquer les forts coefficients de variation constatés, notamment sur la relation longueur des unités/ largeur du chenal sur le tronçon t3 (45%). Même en période d'hydrologie faible ou moyenne, on distingue clairement des mésoformes migrer et des parties de barres alternes en cours de détachement. Ce constat et l'observation sur la figure 14 de relations plus ou moins bonnes selon les années nous amène à introduire une notion de forte « plasticité » des unités malgré l'incision du chenal. Il est important de noter ce phénomène dans la mesure où de nombreuses rivières alpines comme l'Isère (Jacky Girel 2010) voient leurs barres alternes se fixer sous l'effet conjugué de l'incision du chenal, de l'enlèvement et de la végétalisation des bancs de galets.

La variation constante des formes autour d'une valeur moyenne et la non stationnarité de la relation entre la largeur des barres et la largeur du chenal nous amène à émettre l'hypothèse de

l'existence d'un débit d'équilibre des formes, sans doute proche des débits observés en 2002 où la proportionnalité est la meilleure pour t3 (fig14 (a)).

L'étude des distances interannuelles de migration des unités doit être considérée avec prudence dans la mesure où peu de photographies sur deux années consécutives furent disponibles et quand bien même, seules quelques unités peuvent être identifiées d'une année sur l'autre. Le suivi des trajectoires des sondes bathymétriques est aussi entaché d'incertitudes, notamment sur le site de Souzay où la disposition des barres est très irrégulière. Les valeurs peuvent être considérées, du fait de la régularité des formes et des plus faibles écarts-types, comme des ordres de grandeurs représentatifs sur le site de Saint-Mathurin. Elles nécessiteraient validation par un suivi plus régulier pour le tronçon t2.

Sur le contrôle géométrique de la formation des barres à l'échelle du tronçon

Les paramètres morphologiques du chenal analysés un par un ne permettent pas de distinguer avec certitude des différences entre les tronçons présentant des barres alternes et ceux n'en présentant pas. Cependant, rappelons que le faible nombre de valeurs par tronçon entraîne des écarts types importants avec des courbes en « dents de scie » dont les points ne correspondent pas forcément aux limites des tronçons. Si l'on s'attarde sur les valeurs moyennes, le tronçon de Saint-Mathurin présente des ratios d'aspect supérieurs aux autres tronçons de l'étude. L'ACP amène des résultats complémentaires et permet sur les variables sélectionnées (77% de la variance totale expliquée) de distinguer t1 et t2 de t3 qui présente de plus faibles vitesses et contraintes de cisaillement contre de plus forts ratio d'aspect et rapport B/Q2. Cette observation conjuguée à la morphométrie typique des barres alternes de t3 tendrait à confirmer que le ratio d'aspect joue un rôle dans l'initiation ou la différenciation des formes. Bien que la constriction amont du chenal par les éléments fixes augmente le phénomène, on distingue sur les trois tronçons une augmentation de la largeur sur l'amont des sites qui doit probablement impacter le ratio d'aspect. Si des plans de sondes sont disponibles, il serait intéressant de calculer les ratios d'aspect présents sur t1 en 1950 avec ceux de Saint-Mathurin. De plus, une ACP sur les mêmes critères pourrait être refaite à partir du modèle 1D sur l'ensemble de la Loire Moyenne afin de voir si d'autres tronçons peuvent se regrouper avec Saint-Mathurin.

L'incorporation des données dans les modèles prédictifs récupérés dans la bibliographie situe systématiquement les tronçons de l'étude hors du domaine de formation des barres alternes ou dans le domaine des barres multiples généralement moins bien délimité que celui des barres simples. Les valeurs sortent très souvent du champ d'application des modèles ce qui permet d'émettre des réserves sur leur bonne adéquation en contexte fluviale sur lit instable. En effet, il est souvent nécessaire de fournir sur les graphes des valeurs de profondeur, de largeur ou de ratio d'aspect moyens sur un profil qui, sur plusieurs centaines de mètres, peut présenter de fortes hétérogénéités. Rappelons cependant que les données fournies sont relatives à un débit biennal et que les photographies en notre possession montrent que les barres ne sont plus visibles pour des débits dépassés 100 jours par an. De plus, L'analyse sommaire des conditions de transport

atteste que le débit de début d'entraînement de la granulométrie moyenne est dépassé lors du débit biennal.

L'ensemble de l'analyse diachronique sur la morphologie met en évidence l'impact des activités anthropiques sur le site d'étude. Les réponses morphologiques attestent du fait que la Loire possède encore une certaine capacité d'auto-ajustement. Cependant, comme le montre les nombreuses instabilités sur les formes de fond en lien avec la présence de ponts, d'îles ou de bras déconnectés, les fréquents calibrages en lien avec la navigation, la forte augmentation des variations de la pente depuis 1978 et la quasi absence d'espace de mobilité, on peut grandement se poser des questions sur la rémanence de ces impacts et sur le risque d'atteinte de la notion (Wasson 1995) d'irréversibilité hydromorphologique

Critique de la méthode

En premier lieu, il est indispensable de garder à l'esprit que toutes les mesures proviennent d'un traitement orthophotographique et sont donc entachées d'une incertitude (forte différence de qualité entre les suivis, orientations différentes engendrant des confusions entre les ombres et les contours de la végétation, difficulté de situer de manière répétable les contours des barres alternes du fait de la visibilité ou non des formes de fond, abondance de chenaux segmentant des barres clairement identifiables comme étant une unique unité).

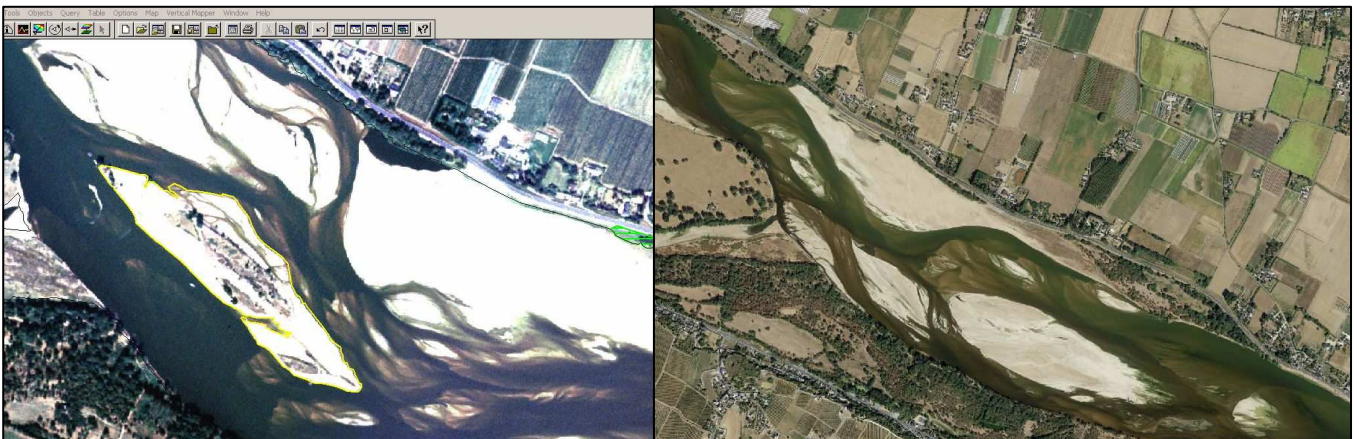


Fig. 32 : Différence de définition de photographies aériennes chenalisation des barres et migration des formes de fond (Souzay, 1999-2009)

Il est aussi important de noter que les données sur la géométrie du chenal proviennent d'un modèle hydraulique 1D adapté pour la simulation des crues sur l'ensemble de la Loire moyenne. La densité des profils est en conséquence relativement large (environ 1 tous les 2.5km) et donc peu adapté à une caractérisation fine à l'échelle des sites. De plus, la condition même de construction d'un modèle hydraulique nécessite de définir des profils aux endroits clefs de la variation du chenal. Les profils intermédiaires artificiellement générés ne fournissent donc que des valeurs moyennes conditionnées par les extrêmes. Les mesures de largeurs de bandes actives effectuées tous les 250 m (fig.20, pas de mesure 10 fois supérieur) et l'analyse des profils en long (fig.23) attestent bien de la très forte variabilité locale des conditions d'écoulements.

VII Perspectives

La DDT du Maine et Loire (049) rencontrée pour l'occasion possède les archives papiers de l'ensemble des plans de sondes réalisés dans le département. Les données numériques pourraient potentiellement être récupérées. Une analyse diachronique de la structure du lit en lien avec les évolutions morphométriques des barres observées sur les photos permettrait de voir si des corrélations peuvent être faites et de mieux comprendre l'histoire morphologique des sites.

Il est clair que l'étude de la dynamique hydro-sédimentaire des unités doit être réalisée in situ et à l'échelle de la crue. Pour ce faire, nous proposons, en lien avec les suivis morphologiques globaux du chenal, une caractérisation fine sur deux tronçons : au niveau de la zone d'induction des barres (analyse de l'action des barres forcées) et sur une ou deux unités libres pour les différentes étapes du cycle hydrologique de la Loire et des événements morphogènes. L'objectif serait de caractériser l'évolution de la forme et de la dynamique des bancs avec le débit (élément difficilement appréciable sur les photos du fait du pas de temps et des formes de fond) mais surtout d'avoir une idée de l'interaction hydro-sédimentaire avec les formes de fond qui progressent dans la continuité des barres.

Les paramètres à analyser **pour chaque suivi** sont les suivants :

- **Topo-bathymétrie** → création d'un MNT (Modèle Numérique Terrain) de l'ensemble du chenal par bathymétrie mutli-faisceaux (suivi des mésoformes) et topographie des macroformes au tachéomètre laser. L'analyse topographique pourra être complétée par la mise en place de chaînes d'érosions au sein même des macroformes pour le suivi des cycles érosions/dépôts.
- **Hydraulique** : → suivi de l'évolution transversale et longitudinale des gradients de lignes d'eau et caractérisation des vitesses et de la débitance par ADCP (Acoustique Doppler Courant Profiler) au droit de transects représentatifs du site d'étude.

Analyse :

Les MNT, les cartes d'érosions/dépôts qui en résultent et le suivi des chaînes d'érosions permettront de caractériser la dynamique des formes sédimentaires (bancs alternés et dunes) tout au long de l'épisode morphogène ou des périodes clefs du cycle hydrologique. Les liens entre la formation (ou déformation) des macroformes avec la propagation des mésoformes seront recherchés. L'évolution de la dynamique des formes alluviales sera confrontée avec les gradients hydrauliques mesurés. Une attention particulière sera portée sur les gradients hydrauliques transversaux (côtes des lignes d'eau, vitesses et contraintes de cisaillement) afin de voir si ceci influent sur la dynamique des barres et si l'action est la même avec l'évolution du débit. L'analyse par ADCP permettra d'affiner le suivi des conditions d'écoulement à une échelle plus précise que le lit complet en travaillant, dans la mesure du possible, à des échelles plus fines que

le chenal principale. Dans le même esprit, un volet de l'étude pourra porter sur la mise en place de bifurcations au sein des barres. Le phénomène est visible sur les photos aériennes et semble à l'origine du détachement et de la migration d'une partie des macroformes et ceci même en période de faible hydrologie.

Dans ce cadre-là, nous proposons de suivre une ou deux unités présentes à l'aval de l'île aux buissons sur Saint-Mathurin (t3) (fig.33). Ces barres paraissent relativement récurrentes et stables dans leur forme et leur vitesse de migration sur les photos que nous avons. Concernant l'étude des barres forcées, un entretien avec S.Rodrigues (GEEAC, université de Tours) semblerait indiquer que le site d'Ingrandes (Loire aval, non abordé dans le cadre de cette étude) serait tout à fait adapté du fait d'investigations déjà réalisées.

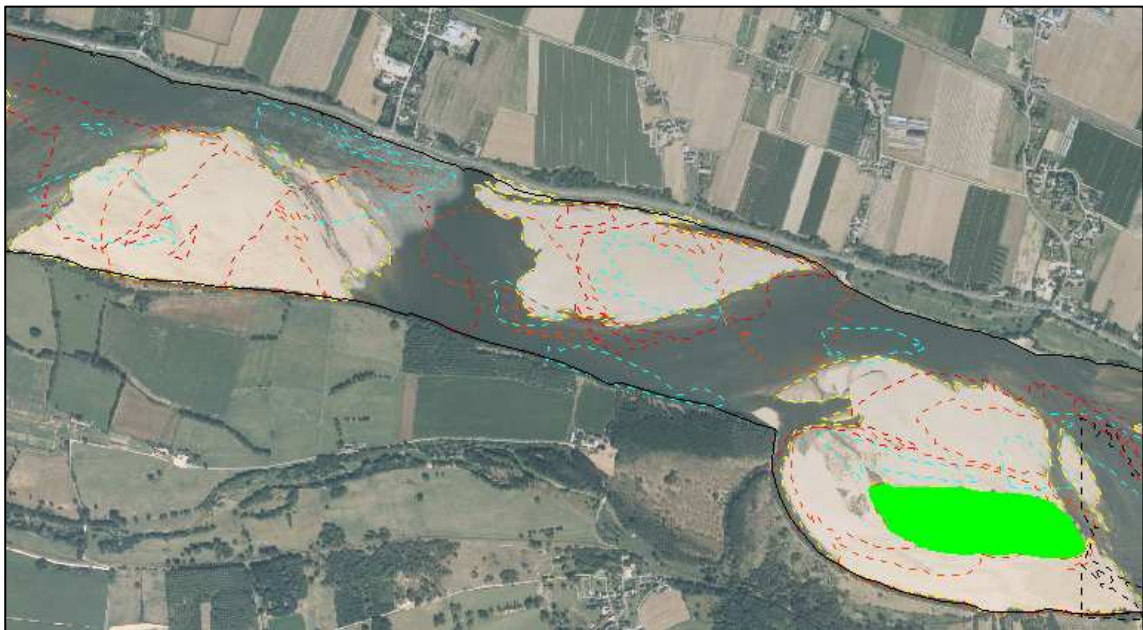


Fig. 33 : localisation du site d'étude potentiel

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 : Barres alternes simple configuration sur le site de Saint-Mathurin en 2009 (a) et en configuration multiple sur le site de La Chapelle-sur-Loire en 1999 (b)	3
Fig. 2 : Barres alternes et processus de création de méandres (Yalin 1972) dans Malavoi et Bravard 2010.....	4
Fig. 3 : Modèles prédictifs présentant des plages de formation théoriques pour les barres alternes d'après Izumi et al en 1978 (a) et Jaeggi en 1984).....	5
Fig. 4 : Localisation du site d'étude.....	6
Fig. 5 : Corrélation entre la largeur de la bande active mesurée sur ortho-photo sen 2002 et la largeur au miroir en débit biennal (b) et la crue de 1996 (a) (dépassée 76 jours par an)→ modèle 1D Latapie (en cours).....	7
Fig. 6 : Analyse morphométrique des barres alternes en a et étude des mesures des vitesses annuelles de migration	10
Fig. 7 : Recherche d'une relation entre les stations du Pont de Cé (PK867) et de Saumur/Montsoreau (PK825/812) et contrôle des chroniques reconstitués avec la station de Montjean sur Loire (Pk897)	12
Fig. 8 : Caractéristiques du régime hydrologique de la Loire sur les stations d'étude	13
Fig. 9 : Mise en évidences des variations interannuelles du régime hydrologique de la Loire.....	13
Fig. 10 : Analyse diachronique des photographies aériennes : présence/absence des barres alternes selon la date et le débit	14
Fig. 11 : Analyse des macroformes alluviales sur le site de La Chapelle-sur-Loire en 1950	15
Fig. 12 : Site de Souzay en 1950	16
Fig. 13 : Résultats des digitalisations : morphométrie des barres alterne sur les différents sites	18
Fig. 14 : Largeur des éléments non fixés en fonction de la largeur du chenal sur le site de Saint-Mathurin (a) et sur l'ensemble des tronçons (b).....	19
Fig. 15 : Barres alternes en 1949 et 2002 (en rouge) sur le site de Saint-Mathurin.....	20
Fig. 16 : Distance de migration interannuelle. Les chiffres symbolisent le nombre de mesures par point.....	20
Fig. 17 : Incorporation des caractéristiques morphologiques des tronçons dans le modèle de formation établi par Jaeggi en 1984. Utilisation conjointe des largeurs de bande active issues des digitalisations de photo-aériennes (a)et des largeurs au miroir issues des modèles hydrauliques (b)	21
Fig. 18 : Incorporation des caractéristiques morphologiques des tronçons dans le modèle de formation établie par IZUMI et al. En 1978. Les paramètres hydrauliques sont calculés sur le Q2 (losange noir) et le Q0.8 avec pour ce débit différentiation des différents tronçons.....	21
Fig. 19 : Incorporation des caractéristiques morphologiques des tronçons dans le modèle de formation théorique établie par RAMEZ 2005. Utilisation des ratios d'aspect établis pour un Q2	22
Fig. 20 :Analyse des largeurs de bandes actives sur la base des digitalisations effectuées sur les cartes de 1850 et de 2002 sur un pas de mesure de 250m (soit 558 mesures) en (a) et analyse de la variation en mètres sur chaque transect pour la même période (b). Les encadrés noirs représentent les bilans positifs et négatifs sur chaque tronçon.....	23
Fig. 21 : Analyse de la distribution des valeurs de largeur de bande active en fonction du débit biennal au droit de la section concernée. La variation des couleurs renseigne les tronçons en aval des confluences.....	25
Fig. 22 : Représentation de l'incision via le suivi des côtes d'étiage effectué par la DREAL Centre pour 3 pas de temps en (a)(1978/1984 – 1984/1996 – 1996/2002) et représentation du bilan entre 1978 et 2002 (b). Les flèches noires symbolisent les confluences avec de gauche à droite : l'Indre, la Vienne et le Thouet.	26

Fig. 23 : Représentation du profil en long de la Loire dans la Maine et Loire ainsi que des principaux ouvrages identifiés sur les photographies aériennes. Les barres forcées représentés sont uniquement celles présentes sur les tronçons présentant des barres alternes	27
Fig. 24 : Analyse de la capacité de transport relative (évaluée via la formule de Meyer Peter et Muller 1947) sur les tronçons homogènes pour Q2 en (a) et représentation des contraintes de cisaillement et du différentiel de traction en rouge (b)	28
Fig. 25 : Représentation de l'évolution des pentes entre 1978 et 2002 (données Latapie (en cours) calculées sur la base du réseau de suivi des cotes d'étiage de la Loire) en (a) et représentation des valeurs des pentes moyennes (toutes années prises en compte) pour chaque tronçons avec ajout des valeurs maximums et minimums connues sur chaque tronçon en (b).....	29
Fig. 26 : Représentation de l'évolution du ratio d'aspect (rapport L/P) pour le Q2 et le Q0.8 en (a) et représentation de la distribution des valeurs moyennes et extrêmes pour ces mêmes débits en (b).....	30
Fig. 27 : Représentation de l'évolution de la granulométrie moyenne (a)et débit biennale (b) en fonction des points km	30
Fig. 28 : Analyse en composante principale sur les caractéristiques morphologiques et hydrauliques (variables) des tronçons (individus) avec projection des individus (a) et des variables (b) sur un plan factoriel.....	31
Fig. 29 : Impact de la construction de la Chevrette en aval de t1	33
Fig. 30 : Barre forcée au niveau du pont de Montsoreau en 2002 (a) et 1950 (b).....	33
Fig. 31 : Influence des barres forcées sur la configuration du chenal	35
Fig. 32 : Différence de définition de photographies aériennes chenalisation des barres et migration des formes de fond (Souzay, 1999-2009).....	38
Fig. 33 : localisation du site d'étude potentiel.....	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : localisation des stations limnigraphiques d'intérêts	8
Tableau 2 : Reconstitution des chroniques de débit sur la station de Langeais	12
Tableau 3 : Débits caractéristiques	13
Tableau 4 : Calcul des débits de crues par alignement des maximums annuels sur une loi de Gumbel	13
Tableau 5 : Date de construction et de destruction des ponts sur le site d'étude.....	14
Tableau 6 : débits limites d'observation des barres alternes	16
Tableau 7 : valeurs de référence d'après la bibliographie (W=Largeur de pleins bords).....	18
Tableau 8 : Facteur de corrélation reliant les caractéristiques morphométriques des barres alternes à la largeur du chenal	19
Tableau 9 : Variation des longueurs d'onde entre 2000 et 2009 sur le site de Saint-Mathurin....	19
Tableau 10 : Caractéristiques moyennes du chenal sur les tronçons étudiés.....	23
Tableau 11 : Bilan des gains et des pertes de bandes actives entre 1850 et 2002.....	23

BIBLIOGRAPHIE

- Ashworth, P.J., Best, J.L., Roden, J., Bristow, C.S. and Klaassen, G.J. (2000) : "Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh", *Sedimentology* (23p)
- Belleudy.P (2009) : "hydrologie, transport solide et végétation" (15p)
- Bravard.J.P, Petit.F (1997) : "Les cours d'eau, dynamique du système fluviale", *Armand Colin* (222p)
- DEGOUTTE.G : Fascicule de cours AgroParisTech (Paris IV, ENGREF)
- Devauchelle.O (2007) : Thèse "Ecoulements de surface et érosion" (176p)
- Jaeggi, M (1984) : "Formation and effects of alternate bars" *Journal of Hydraulic Engineering* (14p)
- Jodeau.M (2007) : thèse "Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues" (231p)
- MALAVOI.J.R, J.P. Bravard : (2010) "Eléments d'hydromorphologie fluviale" *ONEMA* (281p)
- MALAVOI/Biotec (2007) : « Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau », *AESN* (159p)
- Ramez.P (2005) : "Formation de bancs dans un lit endigué - Partie 1 : théorie", *la Houille blanche* (20p)
- Ramez.P (2005) : "Formation de bancs dans un lit rectiligne - Partie 2 : calage et application" *la Houille blanche* (9p)
- Rodrigues.S (2010): "A new field approach for understanding alternate bar dynamics: combining bedform migration, scour/fill processes and the low preservation potential of the sedimentary record. A case study of the Loire River (France)" *Sedimentology* (65p)
- Rodrigues.S : Fascicule de cours IMACOF (Université François Rabelais de Tours)
- Sogreah/CNRS, Guide méthodologique (1999) : « La gestion des rivières, transport solide et atterrissements », *Les études des agences de l'eau* (93p)
- Sohei.A (1982) : "On the effects of cross dykes on alternate bars" *IAHS* (8p)
- Wasson.J.G, MALAVOI.J.R, Maridet.L, SOUCHON.Y,Paulin.L (1995) : « Impact écologique de la chenalisation des rivières », *CEMAGREF* (168)
- Yalin (1972) : "Mechanics of sediment transport" *Pergamon Press* (290p)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 :

SUPERPOSITION DES CONTOURS DES CORPS SEDIMENTAIRES (DE HAUT EN BAS : T1, T2 ET T3) : ➔ P45

ANNEXE 2 :

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES ➔ P46

ANNEXE 3 :

VARIATION DE LA BANDE ACTIVE ENTRE 1850 ET 2002 ➔ P47

ANNEXE 4 :

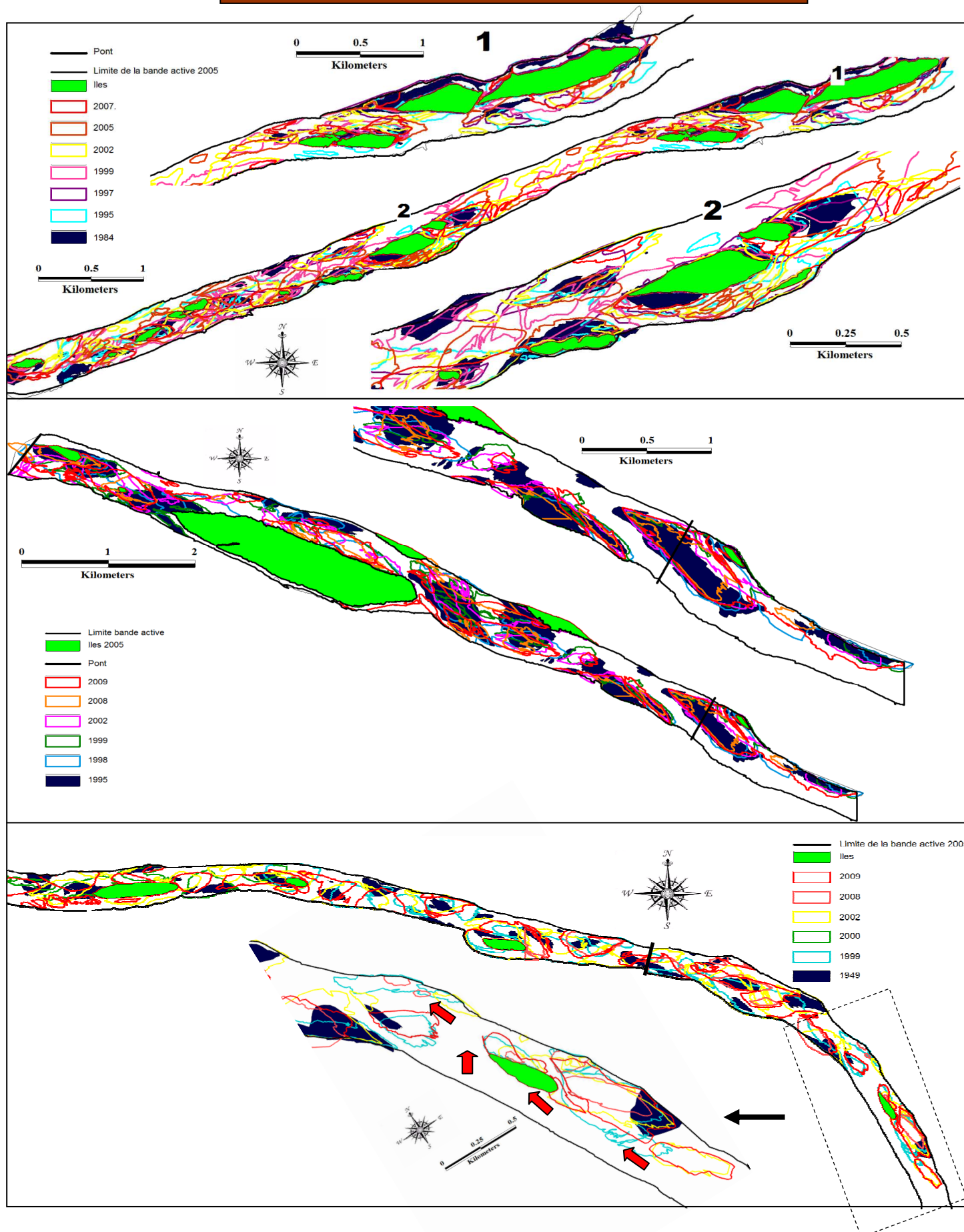
CARTOGRAPHIE DES AMENAGEMENTS REFERENCES PAR LES SERVICES DE L'ETAT SUR LES SITES D'ETUDE ➔ P48

ANNEXE 5 :

COURBE DES DEBITS CLASSES ➔ P49

ANNEXE 1

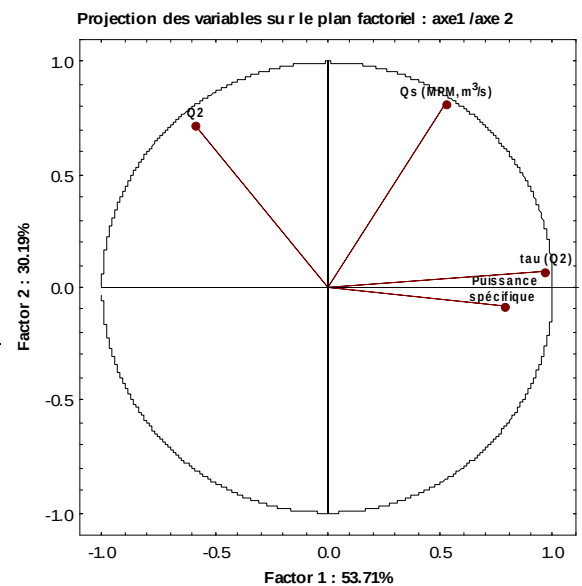
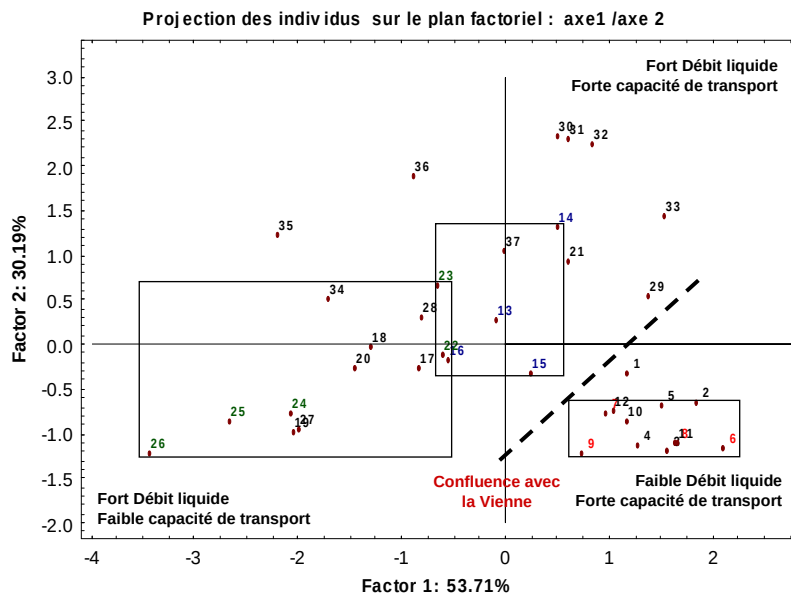
SUPERPOSITION DES CONTOURS DES CORPS SEDIMENTAIRES (DE HAUT EN BAS : T1, T2 ET T3)



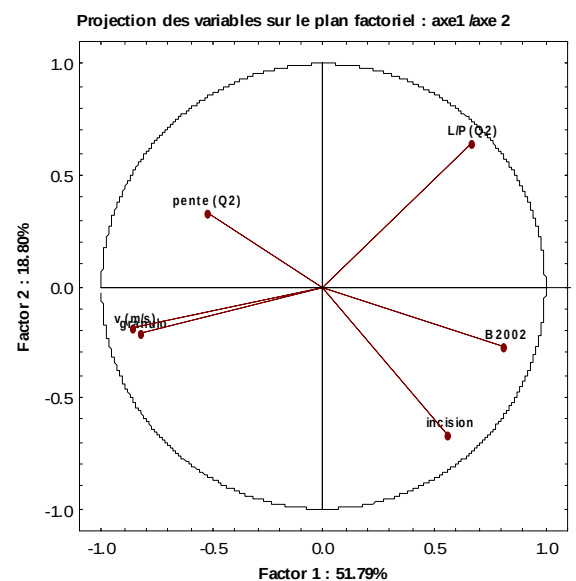
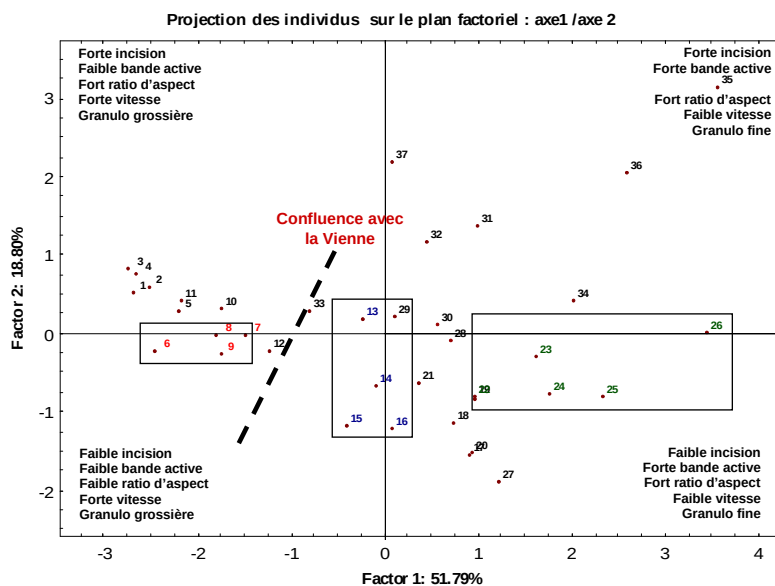
ANNEXE 2

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

VARIABLE DE CONTROLE

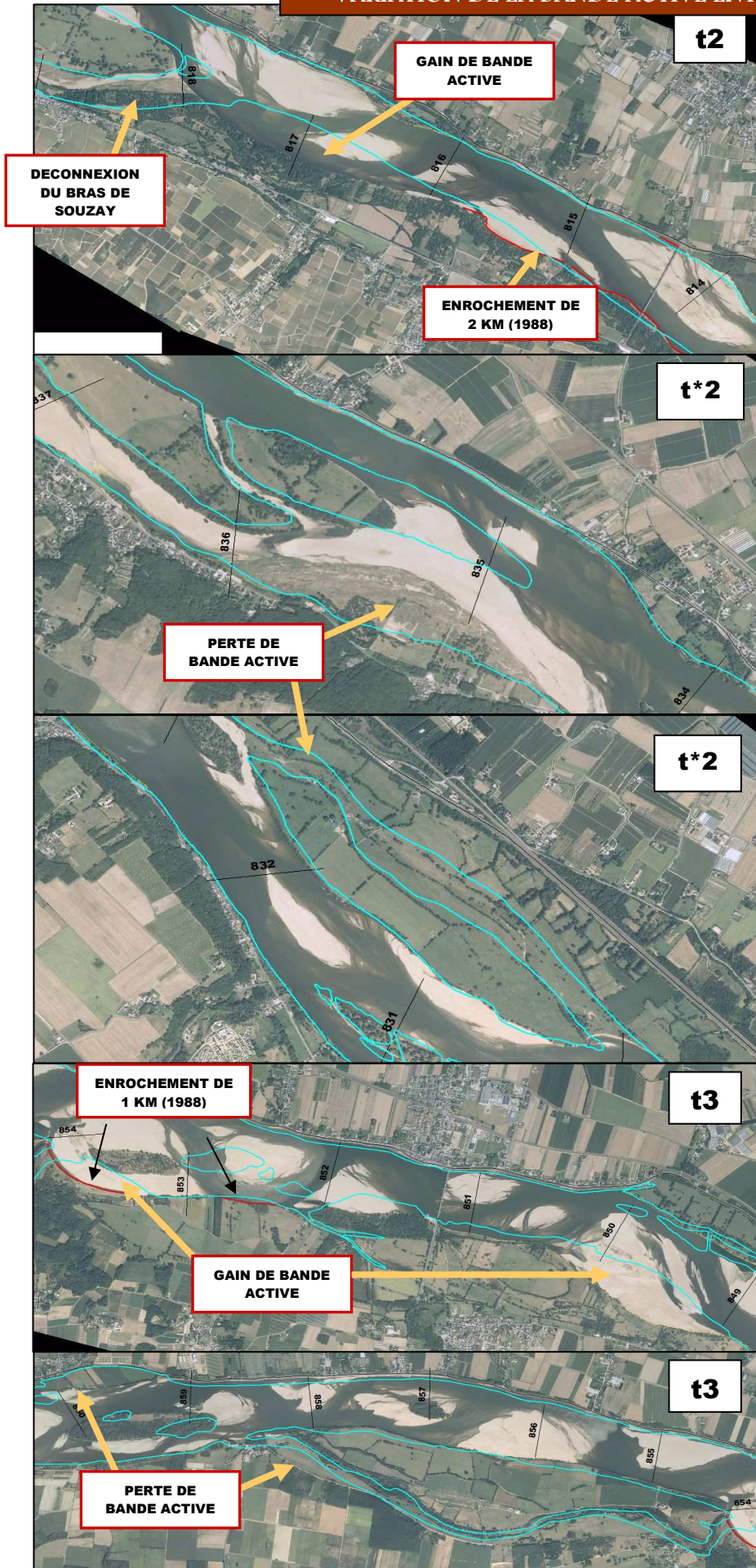


VARIABLE DE REPONSE



ANNEXE 3

VARIATION DE LA BANDE ACTIVE ENTRE 1850 ET 2002



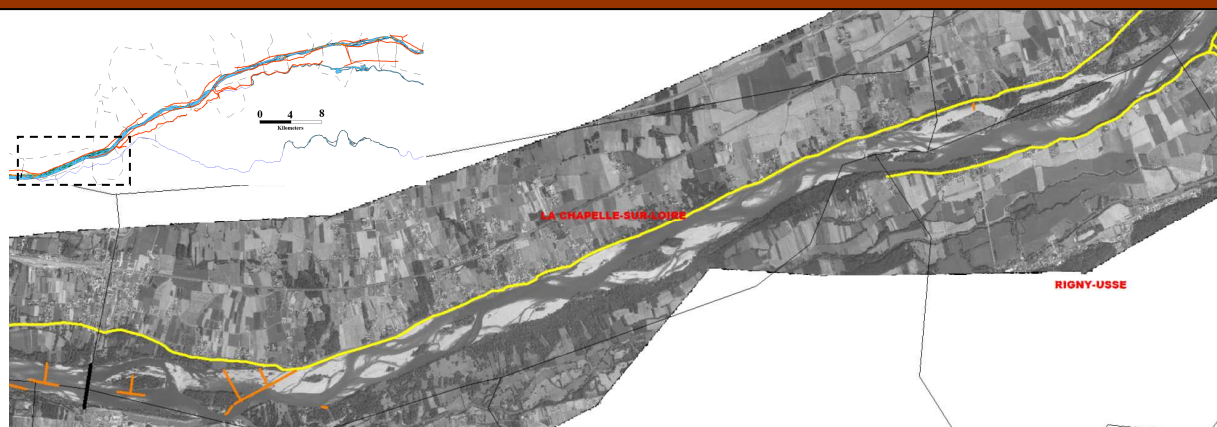
Evolution de la bande active entre 1850 et 2002

- Tracé en 1850
- Enrochements
- | PK

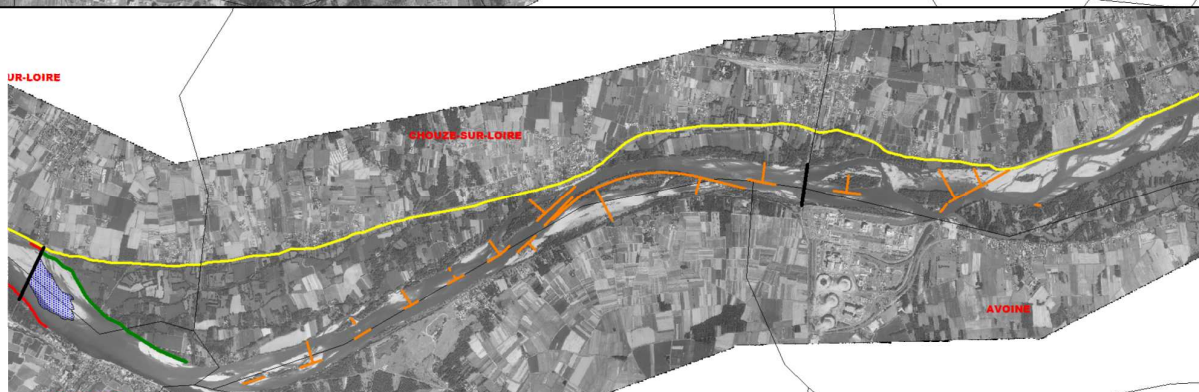
ANNEXE 4

CARTOGRAPHIE DES AMENAGEMENTS REFERENCES PAR LES SERVICES DE L'ETAT SUR LES SITES D'ETUDE

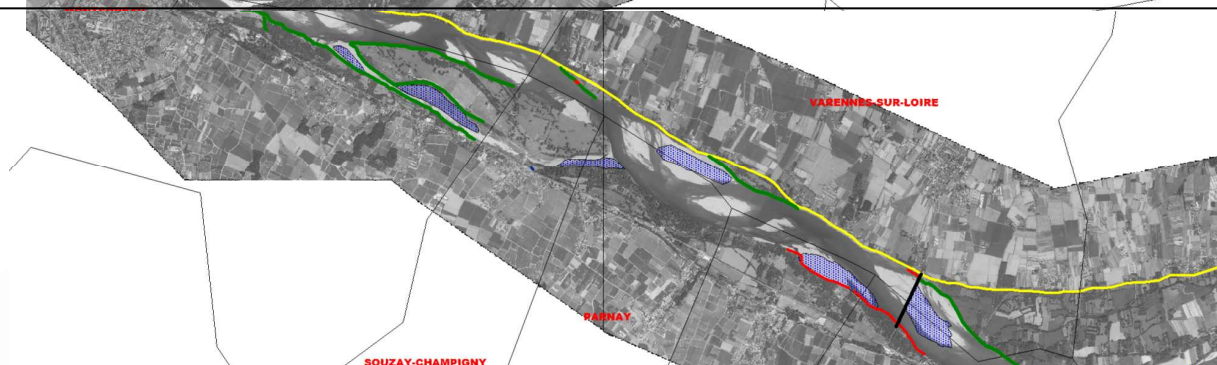
T1



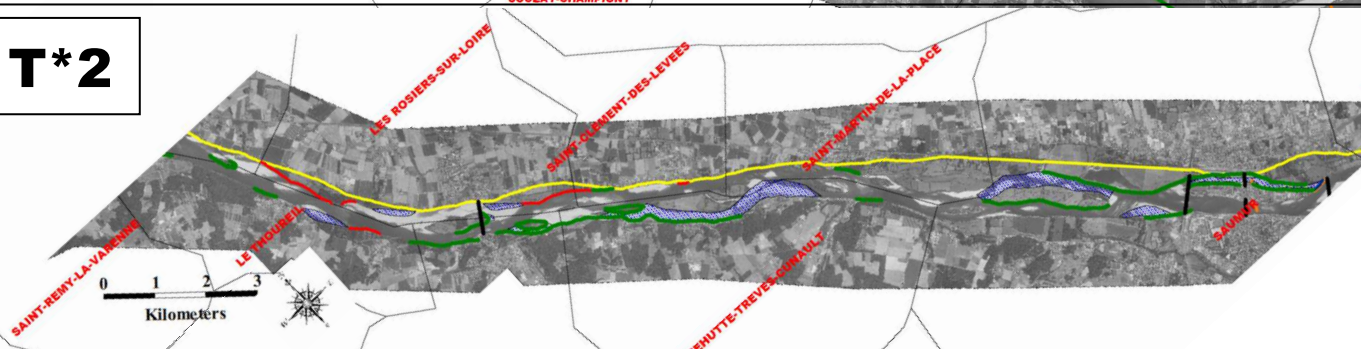
T*1



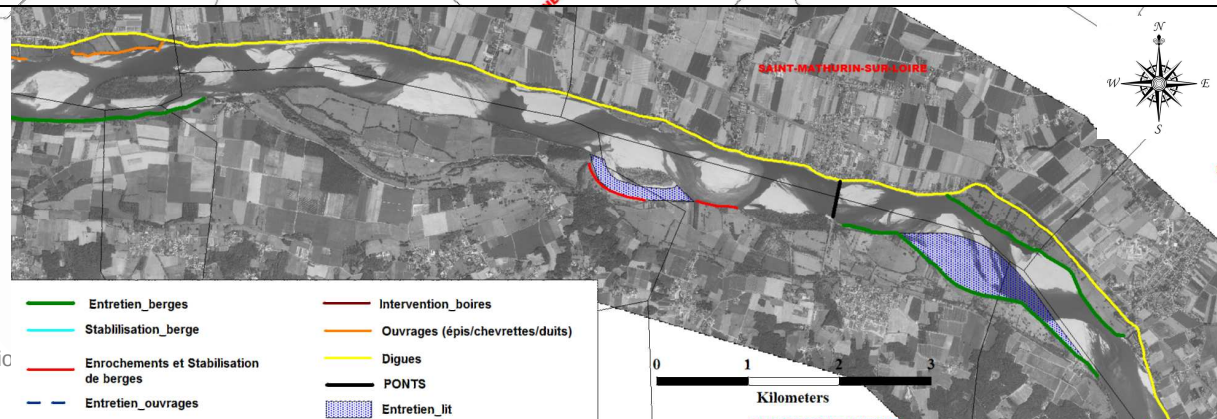
T2



T*2



T3



Joseph Thic

- | | |
|---|------------------------------------|
| — Entretien_berges | — Intervention_boires |
| — Stabilisation_berge | — Ouvrages (épis/chevrettes/duits) |
| — Enrochements et Stabilisation de berges | — Digues |
| — Entretien_ouvrages | — PONTS |
| | — Entretien_lit |

0 1 2 3
Kilometers

ANNEXE 5

COURBE DES DEBITS CLASSES

