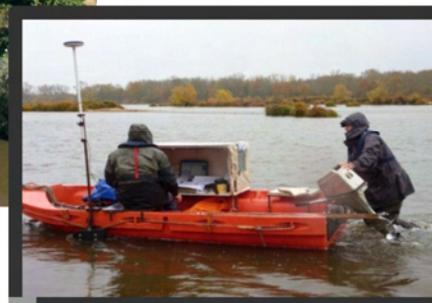
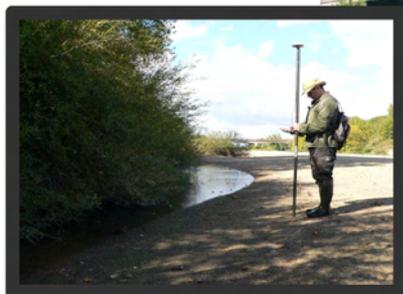


# « ENTRETIEN ET GESTION DURABLE DU LIT DE LA LOIRE »

- ÉVOLUTION MORPHODYNAMIQUE DU LIT MINEUR DE LA LOIRE MOYENNE
- DIAGNOSTICS GÉOMORPHOLOGIQUES SUR 3 SITES : GUILLY , LA CHARITÉ-SUR-LOIRE ET MESVES



Fouzi NABET, direction : PR Emmanuèle GAUTIER ET PR Charles LE COEUR  
Laboratoire de Géographie physique CNRS UMR 8591 Université Paris 1



# Cadre scientifique



- ❑ **Zone Atelier Loire (depuis 2001) : co-évolution passée et actuelle des processus physiques et des sociétés humaines**  
Coordonnée par N. Carcaud et F. Trément

- ❑ **Programme PATRA (2010-2012) : rôles des aménagements fluviaux**

*Patrimoine et trajectoires paysagères des vallées ligériennes*

(coord. : H. Davodeau; INHP-Angers volet 5: héritages de la navigation, coord. : S. Grivel; Univ Orléans)

- ❑ **Financement de thèse (FEDER – Etablissement public Loire): F. Nabet (2008-...) : Hydrogéomorphologie**



# **Cadre de gestion du fleuve**

**□ Collaboration avec :**

**- MEDDTL**

**- DREAL Centre de Bassin**

**- Plan Loire Grandeur Nature - EPL**

**- DDT**

**- Réserve Naturelle Nationale du Val de Loire**

**- Conservatoires des Espaces Naturels (Régions Centre et Bourgogne)**

**- Centre Technique de Blois**

**- Université de Chinon**

## plan

- ❑ **Rappel de la problématique et des objectifs de l'étude**
- ❑ **Présentation des sites ateliers**
- ❑ **Présentation de la méthodologie**
- ❑ **Résultats :**
  - 📄 **analyse à moyenne échelle spatiale : les extractions de granulat, l'évolution des profils des lignes d'eau et l'évolution des formes en plan**
  - 📄 **analyse à grande échelle spatiale : l'évolution topographique**
- ❑ **Optimisation des travaux de restauration**
- ❑ **Conclusion**

## **Deux principaux thèmes de réflexion :**

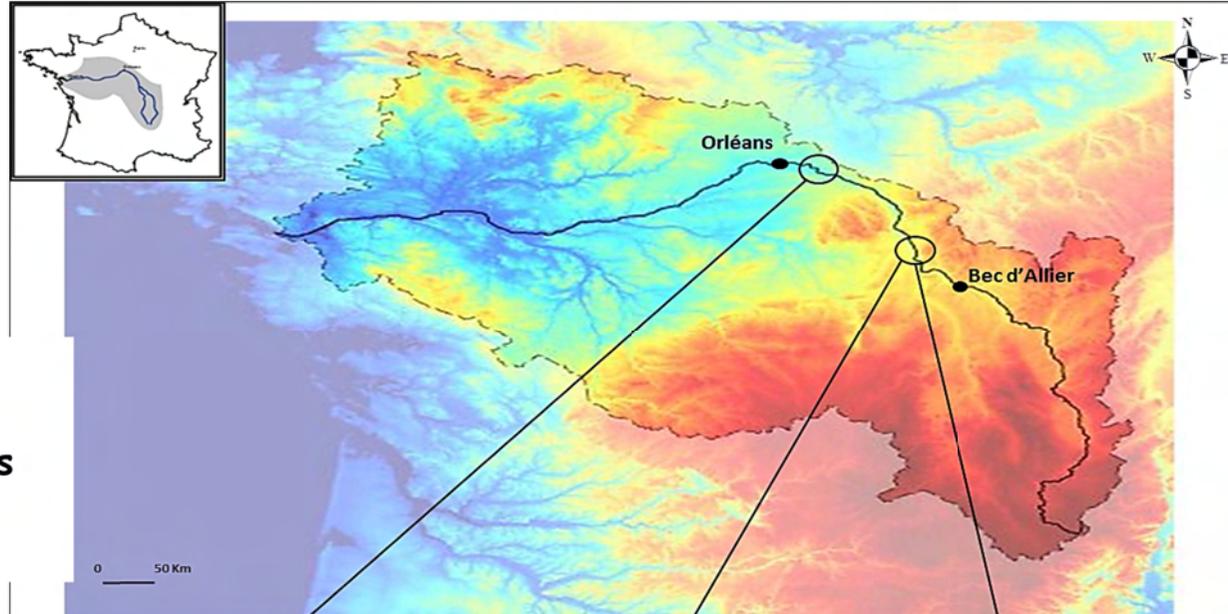
**1. Analyse du problème d'incision et du réajustement du lit de la Loire plus de 10 ans après l'arrêt des extractions de granulats.**

***Comment intervenir au sein du lit mineur pour assurer l'extension de la lame d'eau sur la largeur du lit et préserver le patrimoine faunistique et floristique ?***

**2. Analyse du rôle des chenaux secondaires dans la dynamique fluviale (phénomène de chenalisation), analyse de la réponse géomorphologique des secteurs faisant l'objet de travaux de restauration**

# Présentation des sites ateliers

3 sites ateliers :  
3 exemples de compréhension du fonctionnement de deux signatures géomorphologiques différentes (anastomose, méandre)



Site des méandres de Gully



Site de Mesves



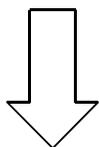
Site de la Charité-sur-Loire

13/04/2017

## Caractéristiques physique et hydrologique des sites d'étude :

approche comparative permettant l'analyser les processus de réajustement fluvial suite aux modifications d'origine anthropique et naturelle apportées à l'hydrosystème ligérien.

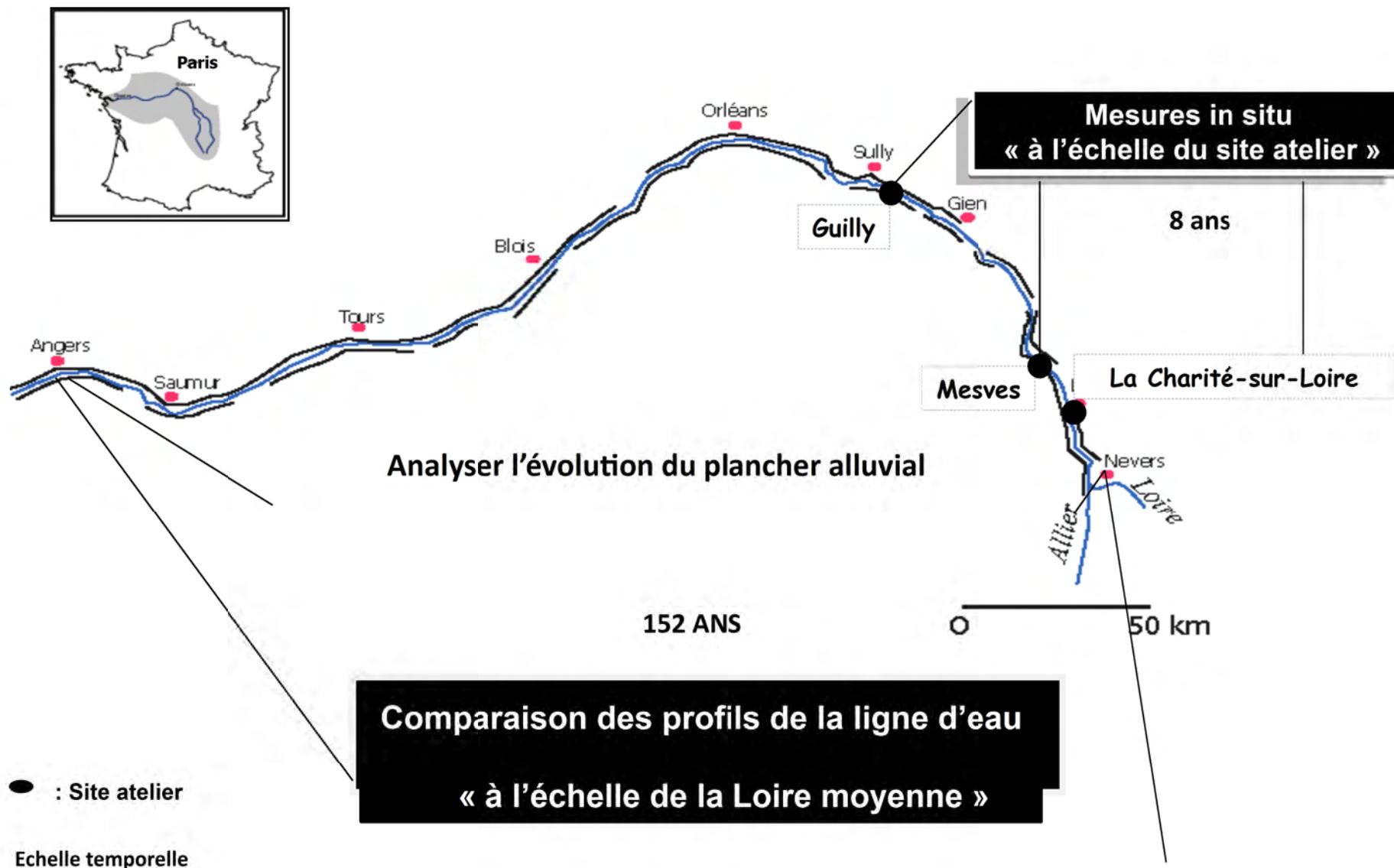
Débits à pleins bords (proches des débits dominants) :  
 La Charité-sur-Loire :  $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 Mesves :  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 Guilly :  $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Influence le rythme d'évolution du couvert végétal et les processus du transport solide

Numéro du site d'étude	site atelier n°1	site atelier n° 2	site atelier n°3
Nom du site atelier	la Charité-sur-Loire	Mesves	Les méandres de Guilly
Longueur du secteur fonctionnel	4 km	3 km	9 km
Largeur de la bande active	230 m	350 m	335 m
Largeur du lit entre levée	600 m	700 m	500 m
Largeur de la plaine	2 à 4 km	2 à 4 km	7 km
Pente du cours d'eau (m/m)	0,0005	0,0005	0,0005
Puissance spécifique	11 – 12 W m <sup>-2</sup>	11 – 12 W m <sup>-2</sup>	11 – 12 W m <sup>-2</sup>
Unités fluviales	chenal principal, bras secondaires, îles, franc-bord	chenal principal, bras secondaire, îles et franc-bord	chenal principal, bras secondaire, îles et franc-bord
Nombre de chenaux	4	2	2
Débit moyen	350 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	350 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	350 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Débits de connexion des bras secondaires	280 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	950 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	230 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Stations de mesures	Givry	Givry	Gien
Types d'aménagements	Levée, chevrette, pont, radier, quai	Levée	Levée, quai

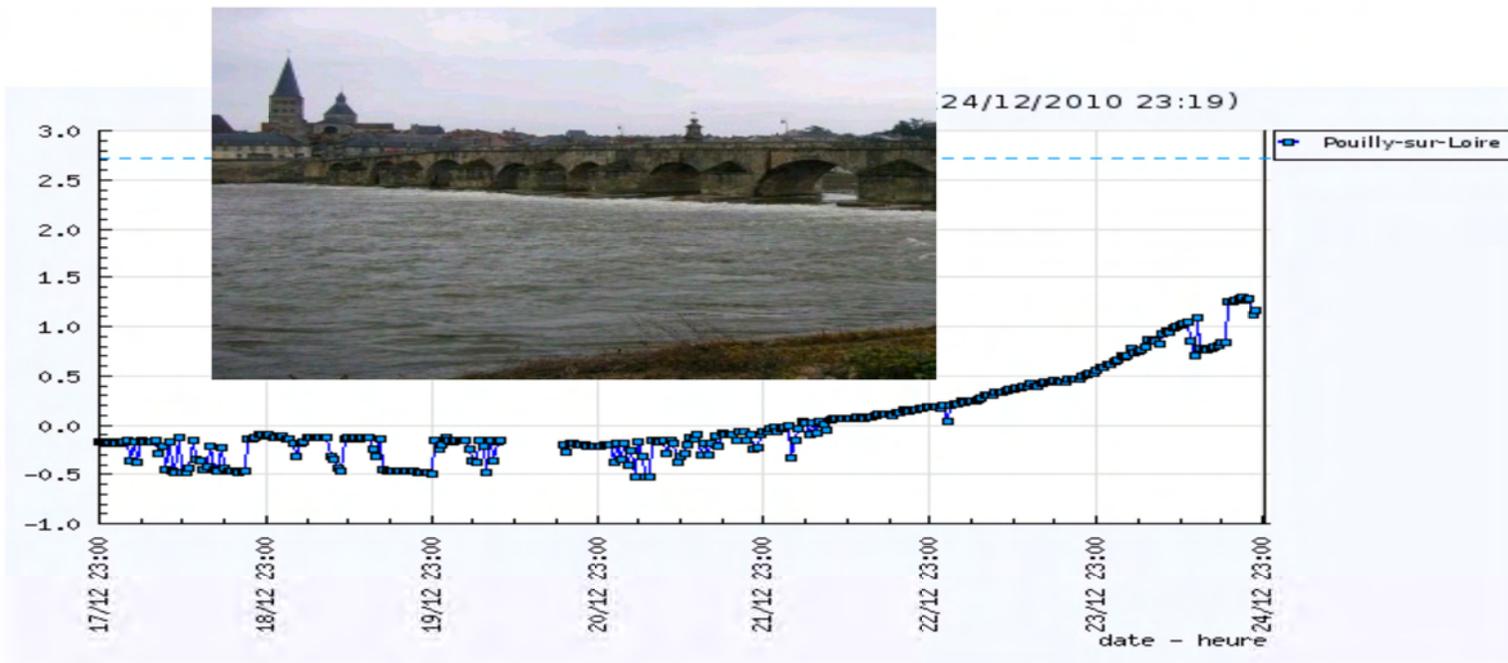
# Emboitement des échelles spatio-temporelles d'analyse



Une approche systémique multi scalaire

Une analyse

4 – des durées de submersion des bras : profils des lignes d'eau



Objectifs : calculer le débit d'entrainement des grains, la durée de submersion des bras secondaires faisant l'objet de travaux de restauration

**□ L'analyse à moyenne échelle spatiale**

# Des extractions de sédiments massives dans le lit des cours d'eau

- La France après la 2<sup>e</sup> Guerre Mondiale : une reconstruction nécessaire
  - Fin des années 1960 : La construction des villes nouvelles en périphérie de Paris (Evry, Saint-Quentin en Yvelines, Marne-la-Vallée...)
- = un besoin en béton



Orléans en 1941 (<http://morgann.moussier.free.fr>)

**Des lits fluviaux très exploités par les extractions de sédiments des années 1950 aux années 1990**

**Sur la Loire : 225 millions de tonnes**

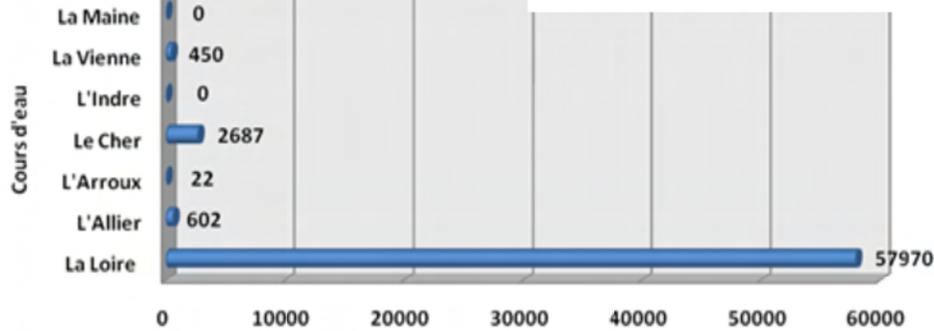


Evry ville nouvelle ([www.evry.fr](http://www.evry.fr))

# Généralisation de l'industrie d'extraction à l'ensemble du corridor de la Loire

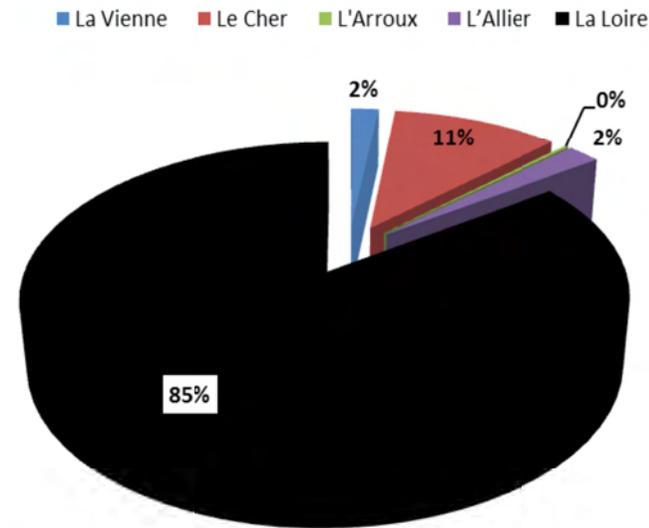
*les quantités extraites excèdent les quantités annuellement transportées par la Loire*

Période des extractions : 1981 - 1993

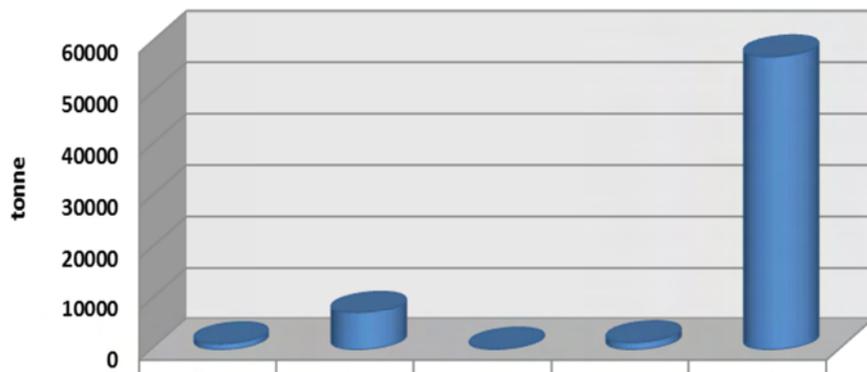


	La Loire	L'Allier	L'Arroux	Le Cher	L'Indre	La Vienne	La Maine
Total	57970	602	22	2687	0	450	0

Extraction de matériaux en milliers de tonnes



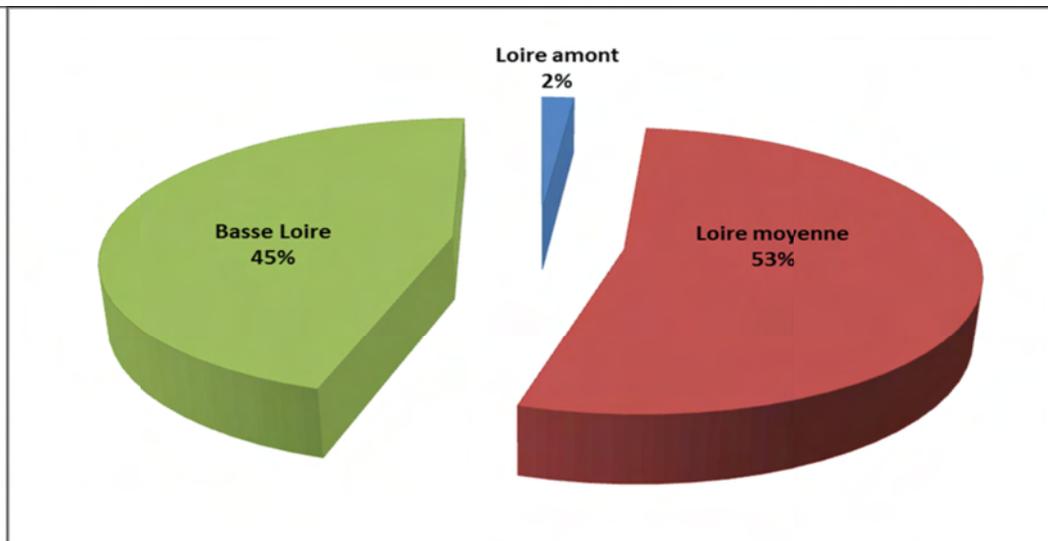
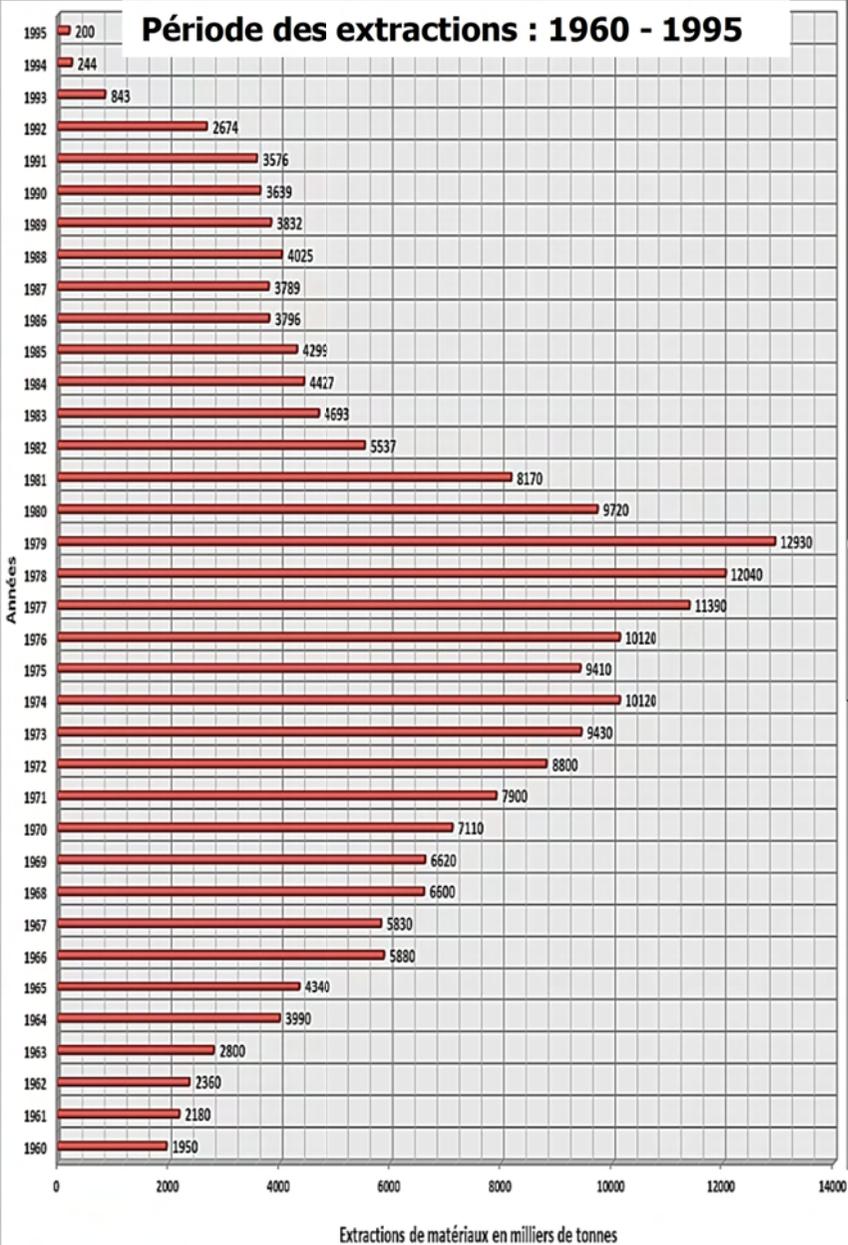
t km<sup>-1</sup>



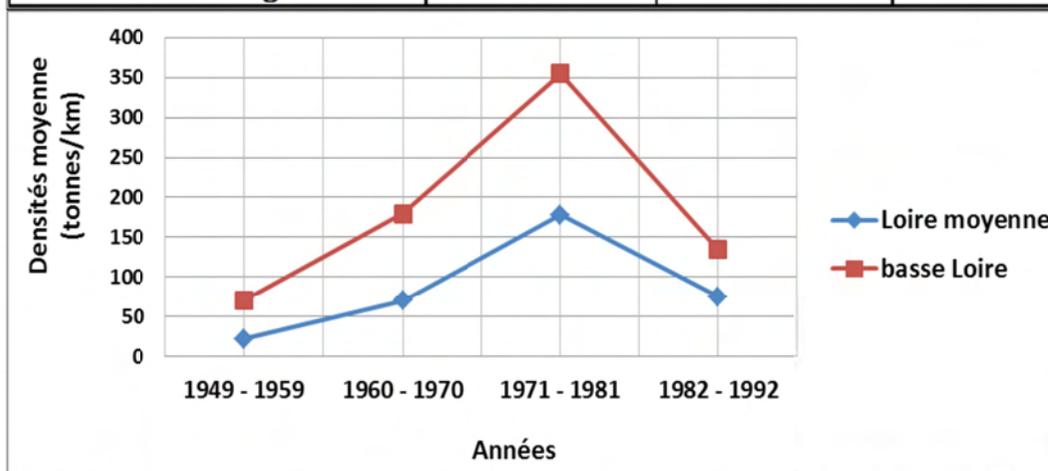
tonne / km	La Vienne	Le Cher	L'Arroux	L'Allier	La Loire
	1209,67	7321,52	166,16	1430,26	57226,06

**Une forte exploitation des sédiments de la Loire à l'échelle du bassin versant**

# Évolution des extractions de matériaux granulaires dans le lit mineur de la Loire



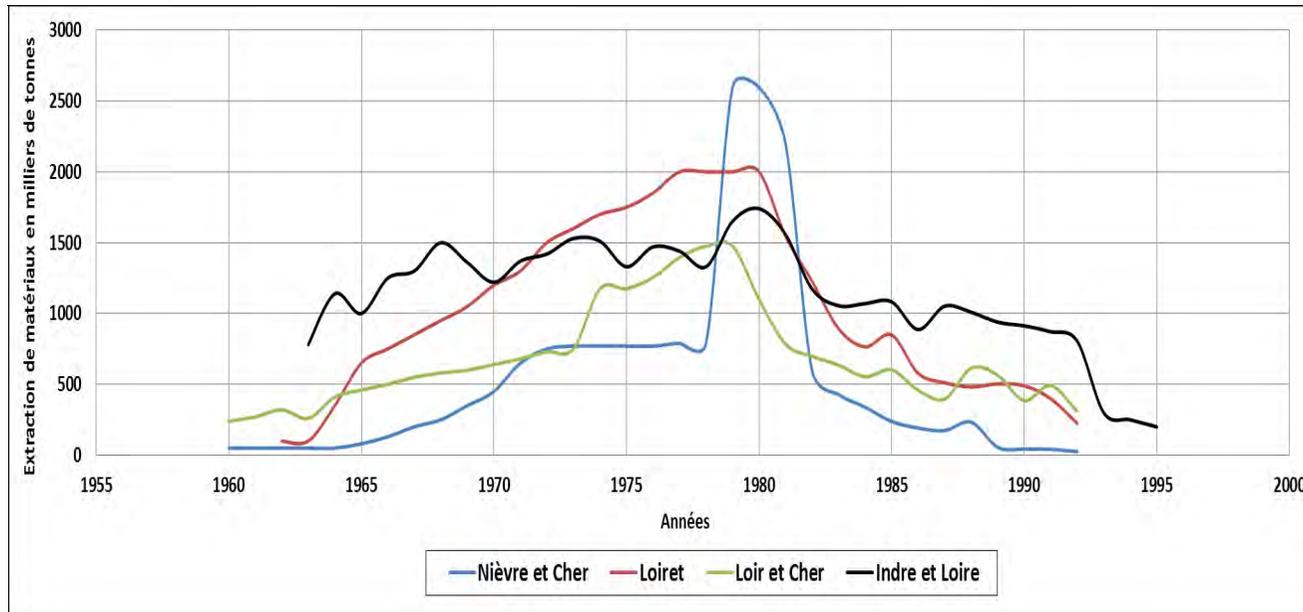
Périodes	1981 - 1993	1949 - 1995	
Secteurs	Loire amont	Loire moyenne	Basse Loire
Valeurs (milliers de tonnes)	3934	118741	102638
Pourcentages	2%	53%	45%



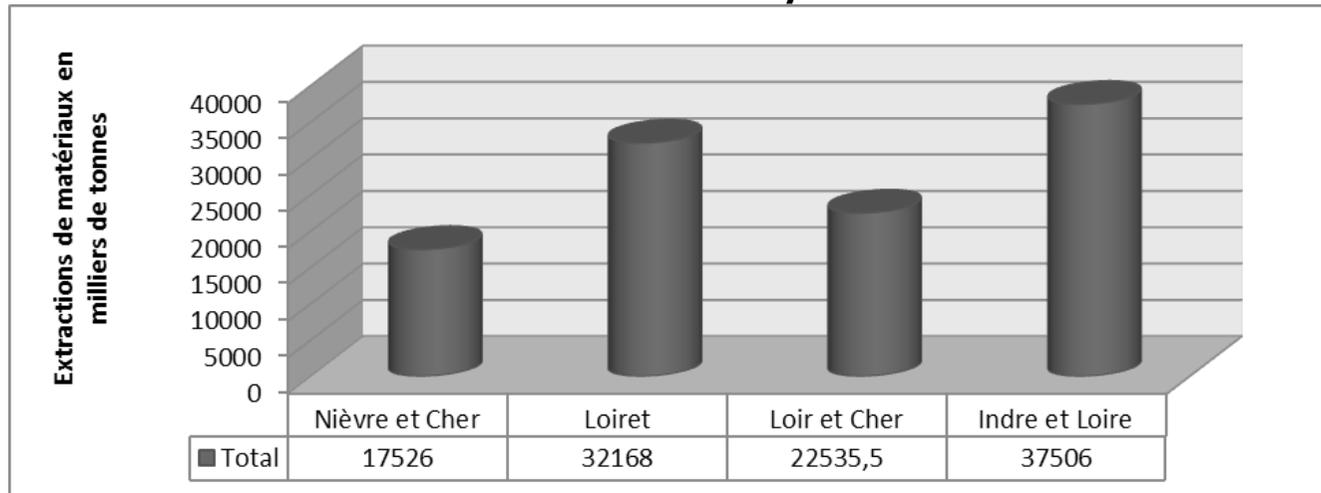
**Évolution de la densité moyenne ( $t\ km^{-1}$ ) des extractions en Loire moyenne et basse Loire entre 1949 et 1992**

# La Loire moyenne : une variation de l'intensité des extractions à l'échelle des départements

## Évolution interannuelle des extractions de sédiments dans les départements de Loire moyenne

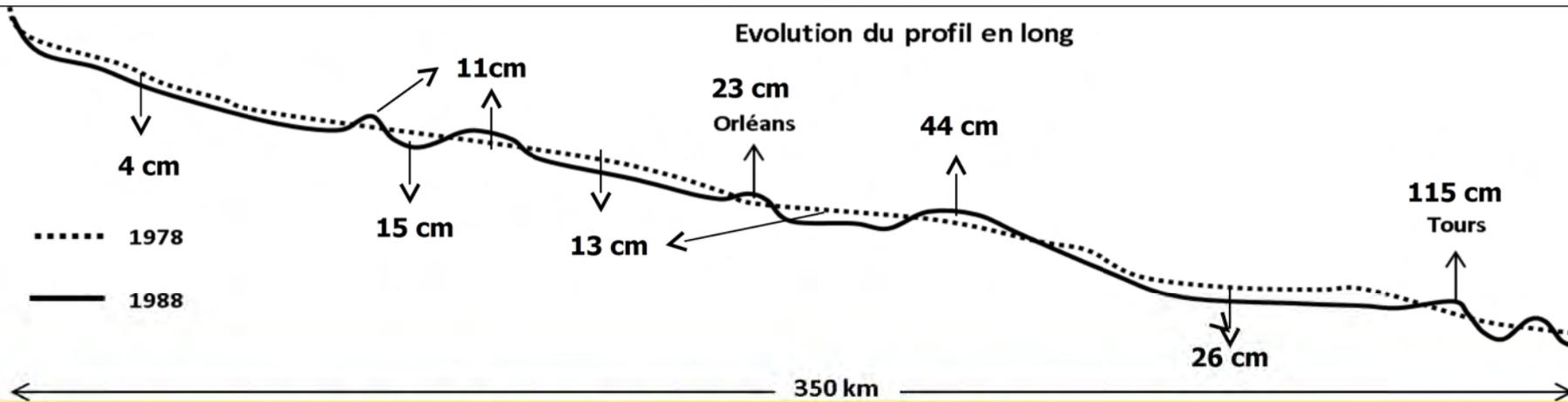


## Répartition par département des extractions de matériaux alluvionnaires effectuées dans le lit mineur en Loire moyenne

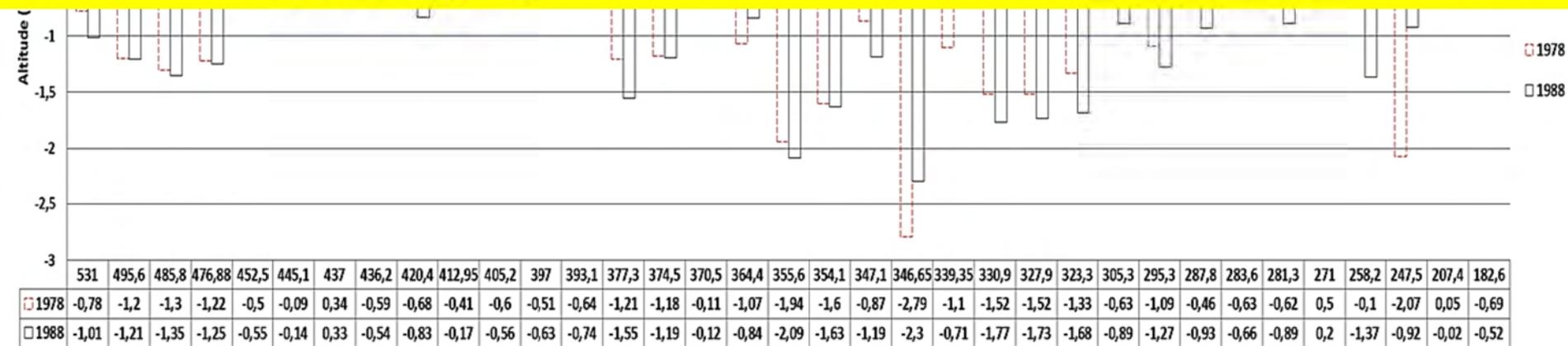


# Résultats : un enfoncement du lit fluvial

## Évolution verticale du profil en long en Loire moyenne 1978 – 1988

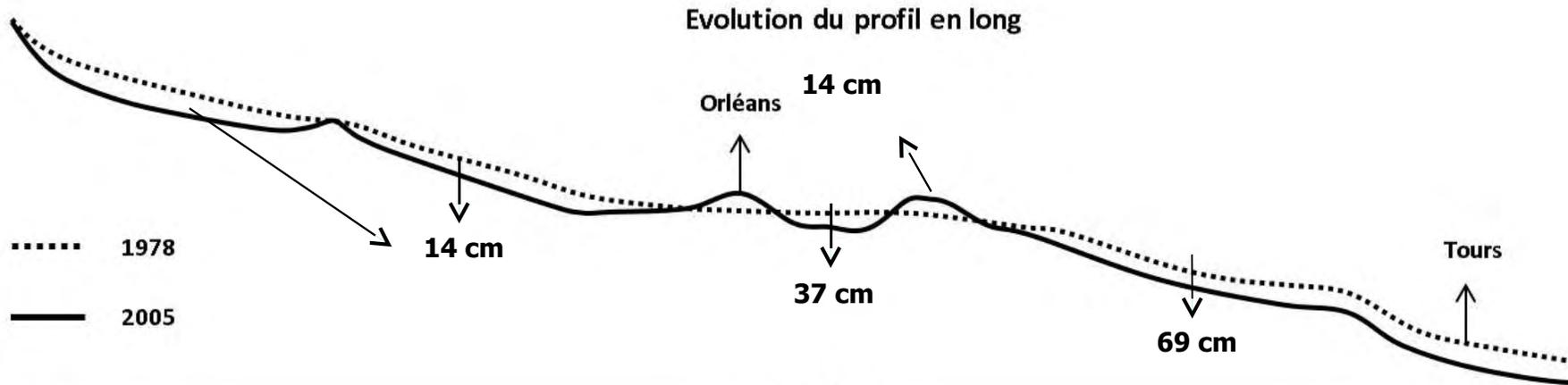


- Abaissement : 226,9 km, soit 65,1 % du linéaire.
- Alternance de zones d'abaissement et de remontée de la ligne d'eau : 95,9 Km soit 27,51 %.
- Exhaussement : 25,7 km soit 7,37 %.

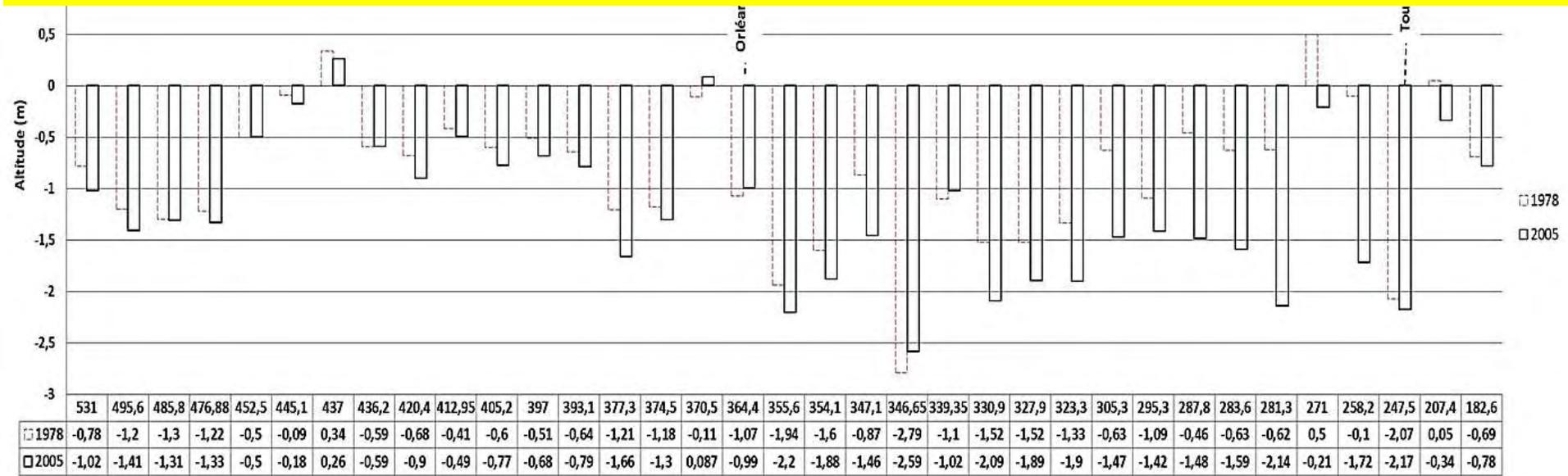


# Résultats

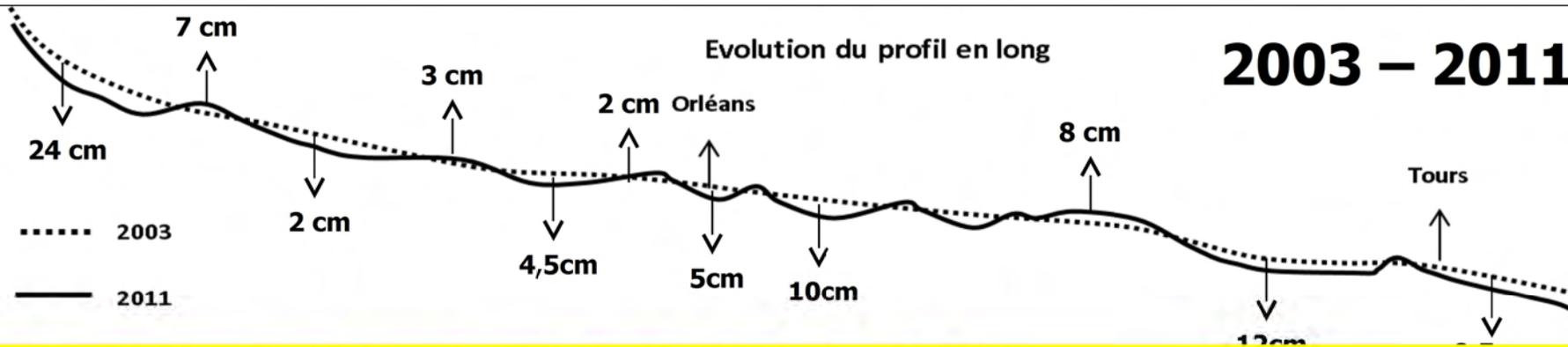
## 1978 – 2005



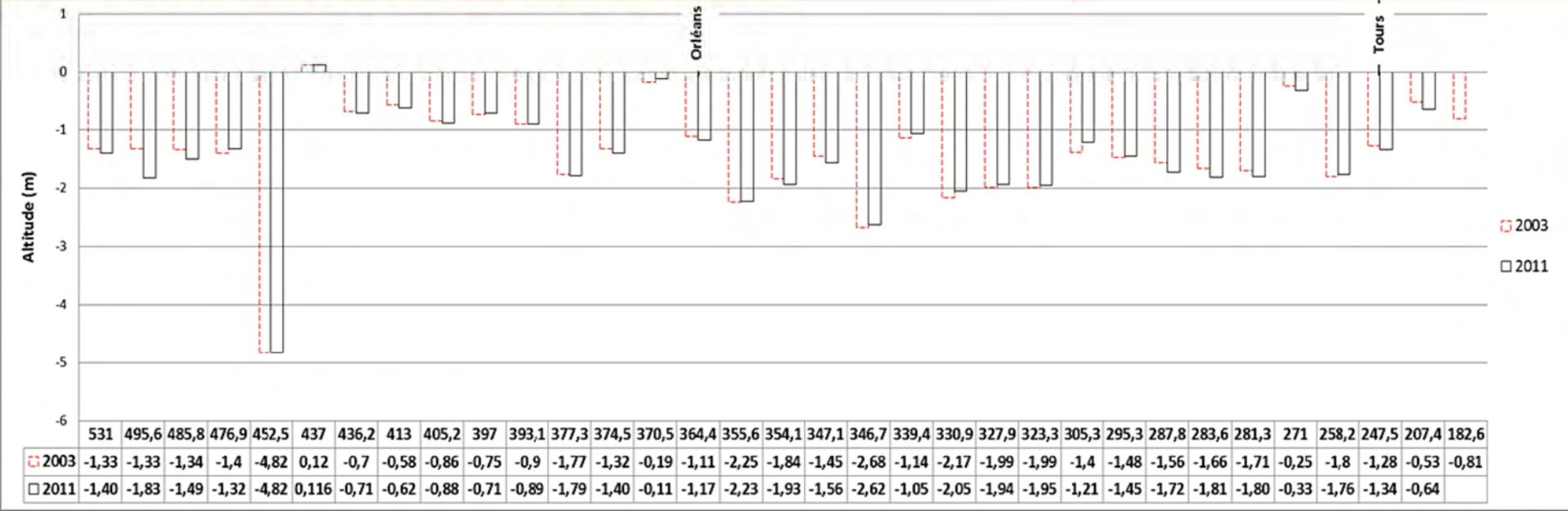
- Abaissement : 318 km, soit 91 % du linéaire.  
 - exhaussement : 31 km, soit 9 % du linéaire.



# Une incision qui se poursuit après l'interdiction des extractions en lit mineur

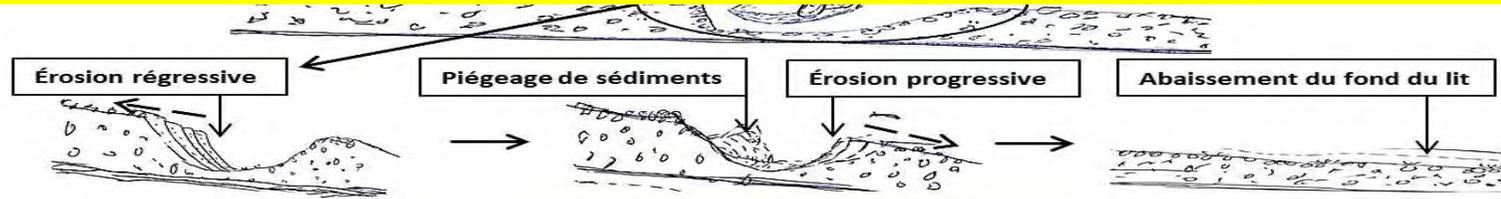


- Abaissement : 245 km soit 70 % du linéaire.  
 - exhaussement : 105 km soit 30 %.

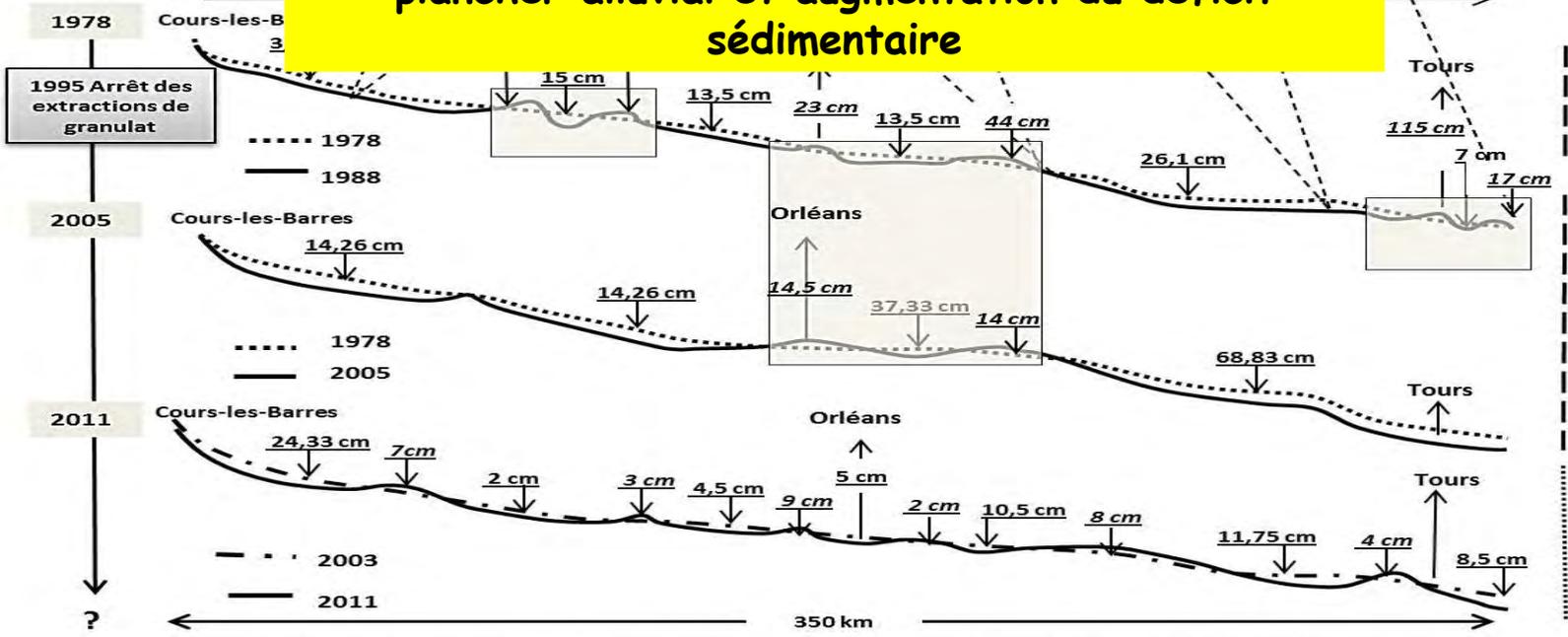


# Résultats Lien entre extractions de granulat et mode d'ajustement du fond du chenal principal

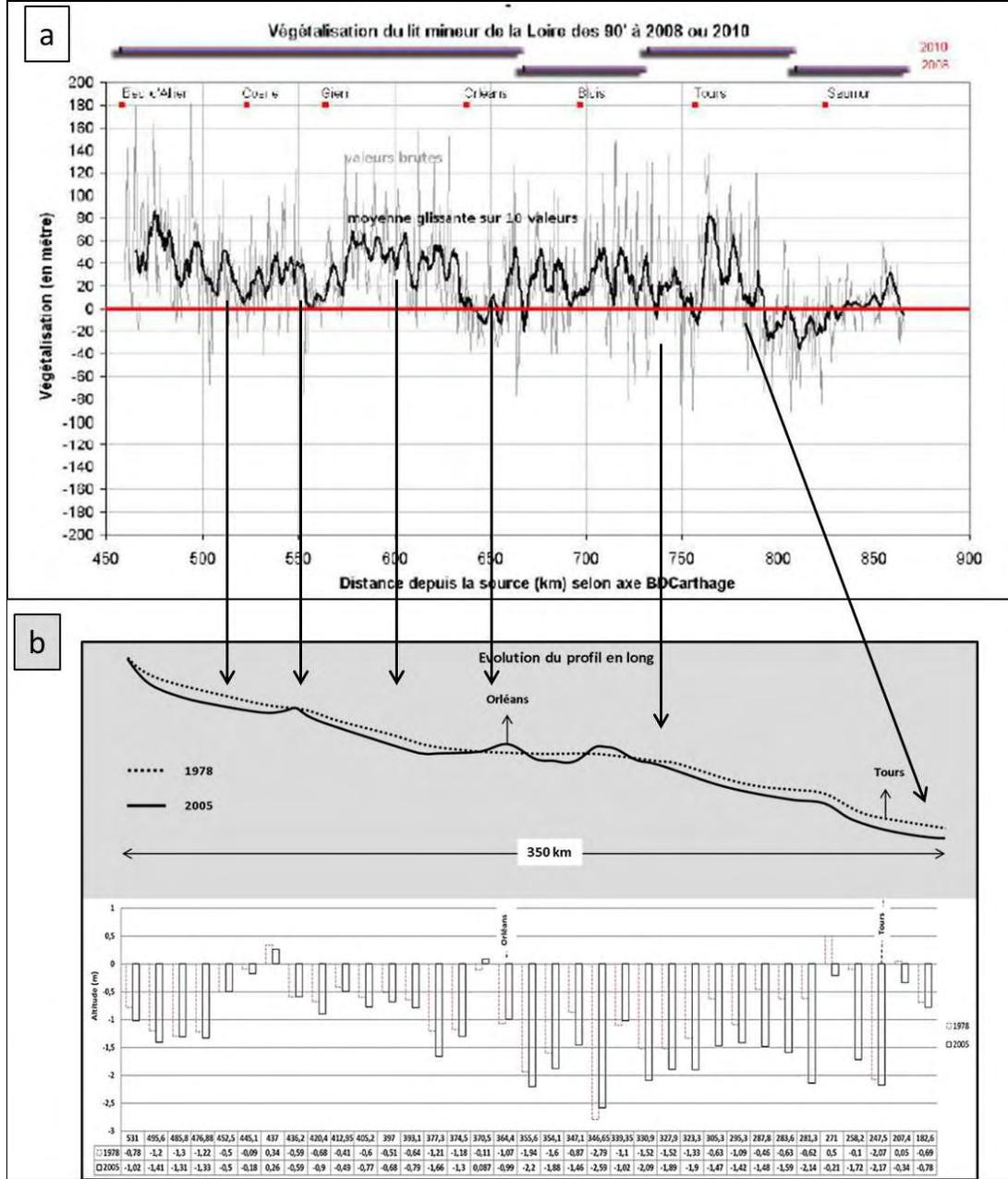
Les secteurs à rupture brutale de pente correspondent aux secteurs qui ont connu la plus forte exploitation



**Modification des processus d'ajustement du plancher alluvial et augmentation du déficit sédimentaire**



- - - - - Période 1978-2005 :  Rehaussement et Incision  Incision permanente  
 ..... Période 2003-2012 : Faible rehaussement et poursuite de l'incision



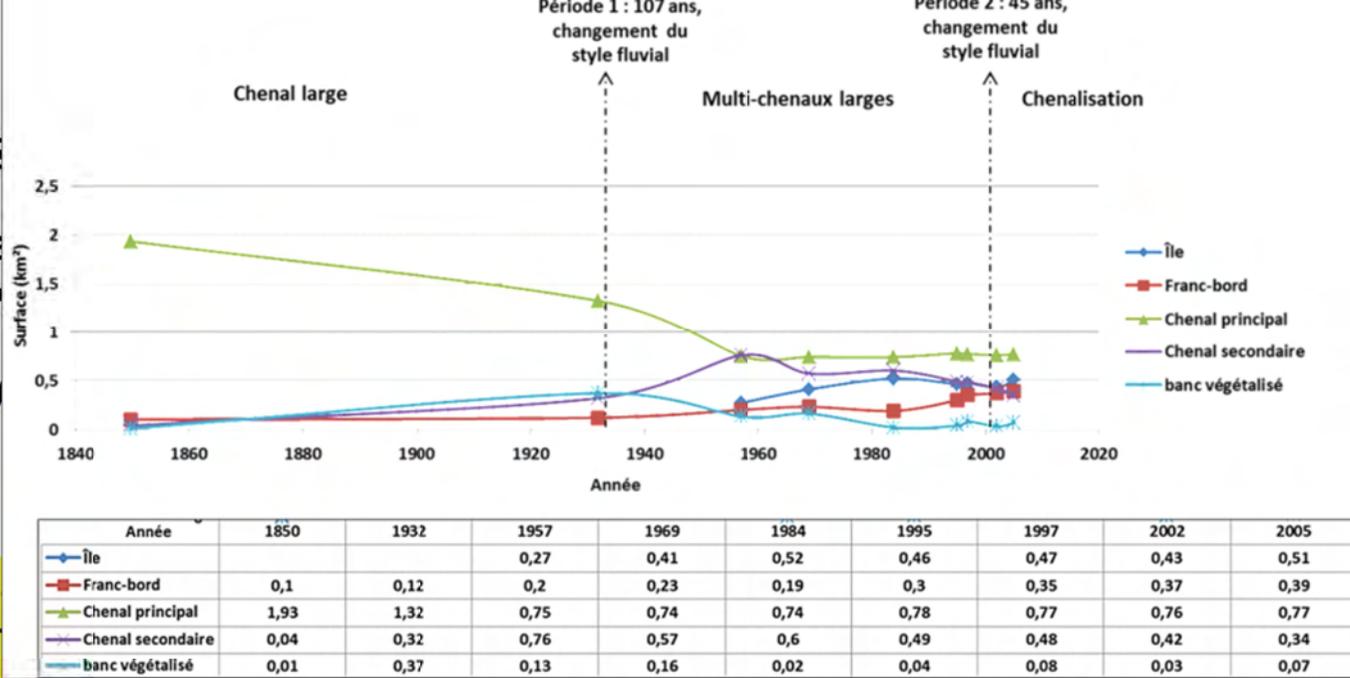
**Rapprochement des résultats de l'évolution de la largeur de la bande végétalisée (a) réalisé par Braud et Latapie (2012) et l'évolution verticale des profils de la ligne d'eau (b), (1978 – 2005). Les secteurs concernés par une forte incision ont aussi connu une importante extension du couvert végétal**

# Résultats

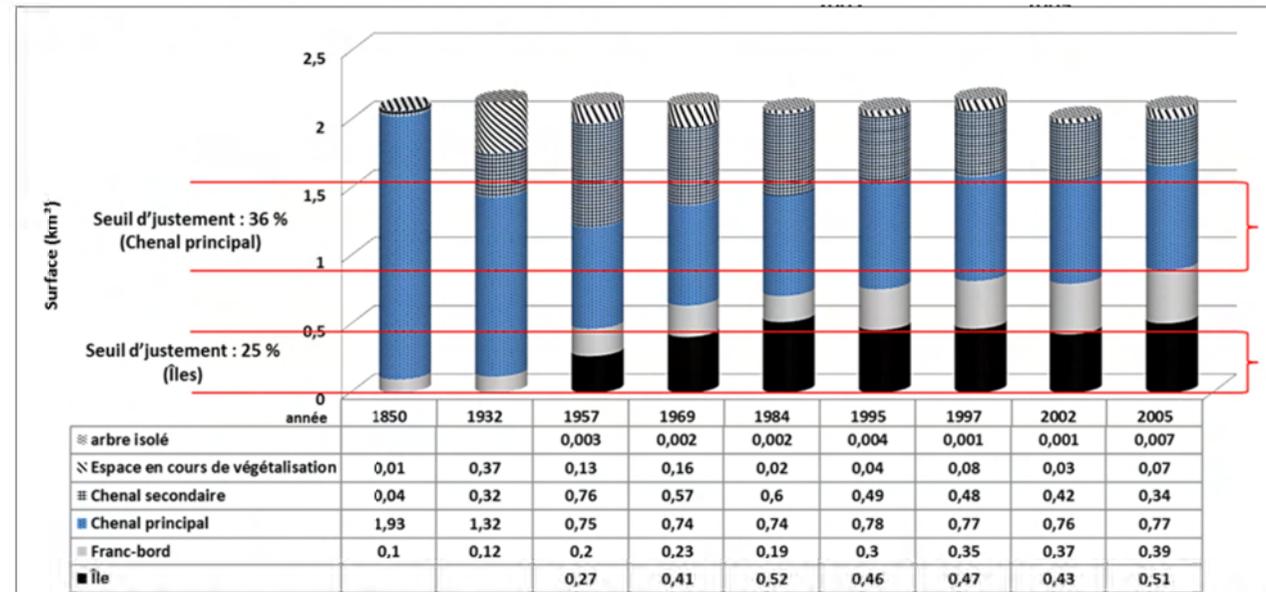
(exemple du site de la charité)

Une métamorphose radicale des formes fluviales, passage du style fluvial au cours de des extractions de granulats

L'ajustement des formes du lit de la Loire s'est produit en deux vitesses

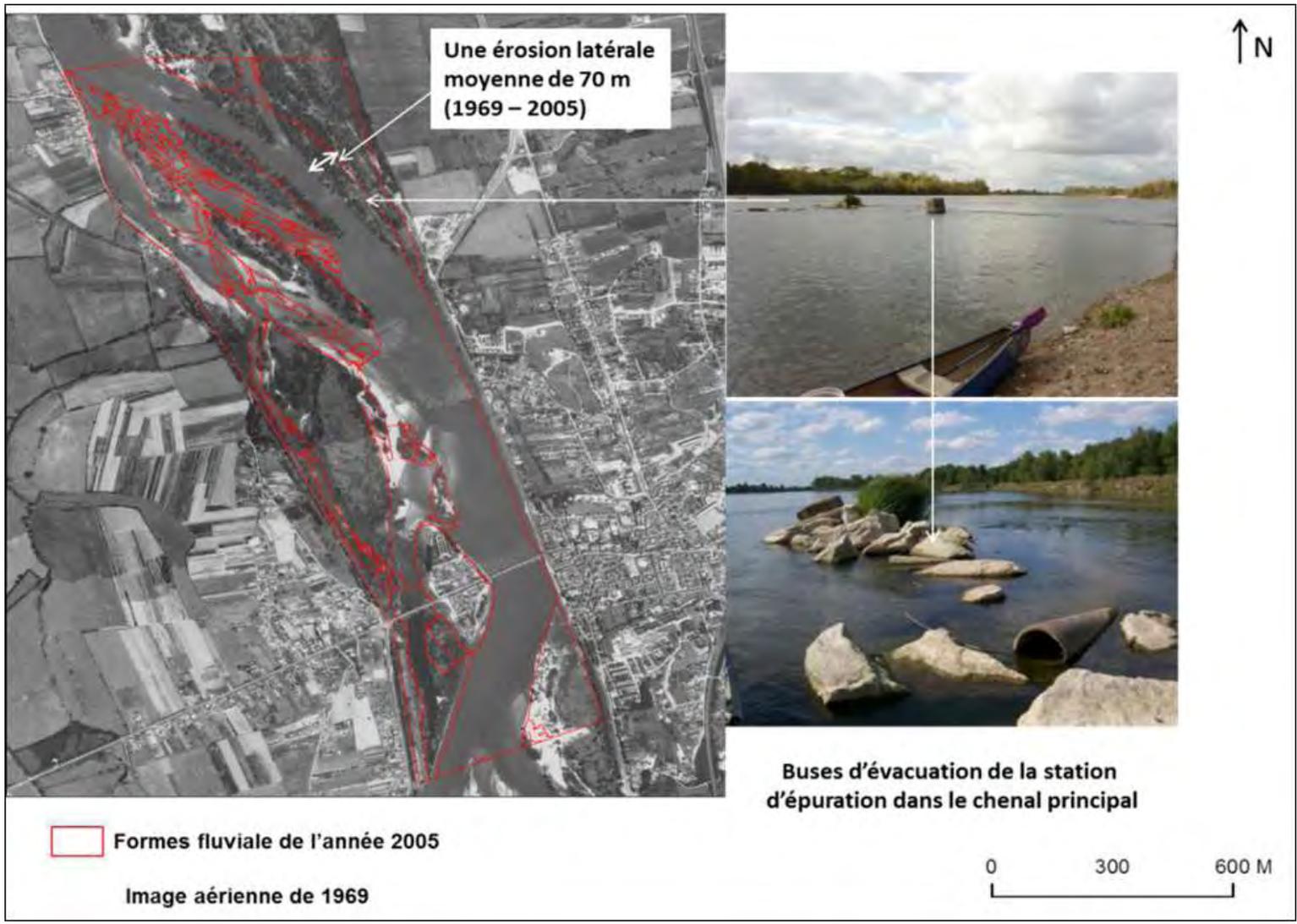


Évolution des surfaces des différentes formes fluviales au sein du lit mineur et détermination des pas de temps relatifs au changement du style fluvial (site atelier de La Charité-sur-Loire).

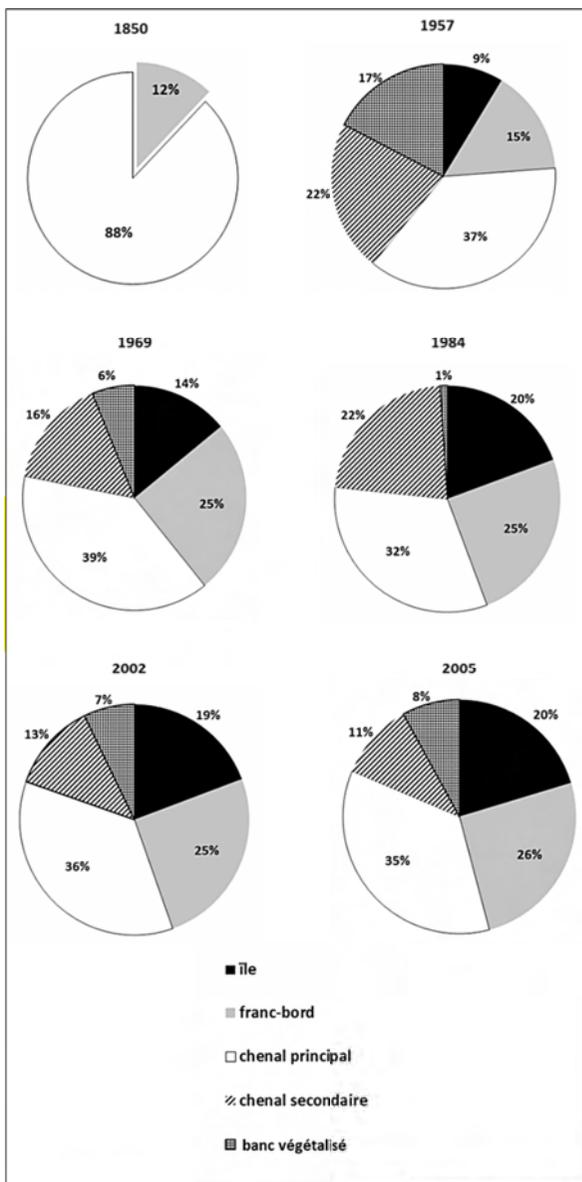


Évolution des différentes unités du lit mineur et détermination des seuils spatiaux de stabilité du chenal principal et des îles, soit respectivement 36 et 25 %.

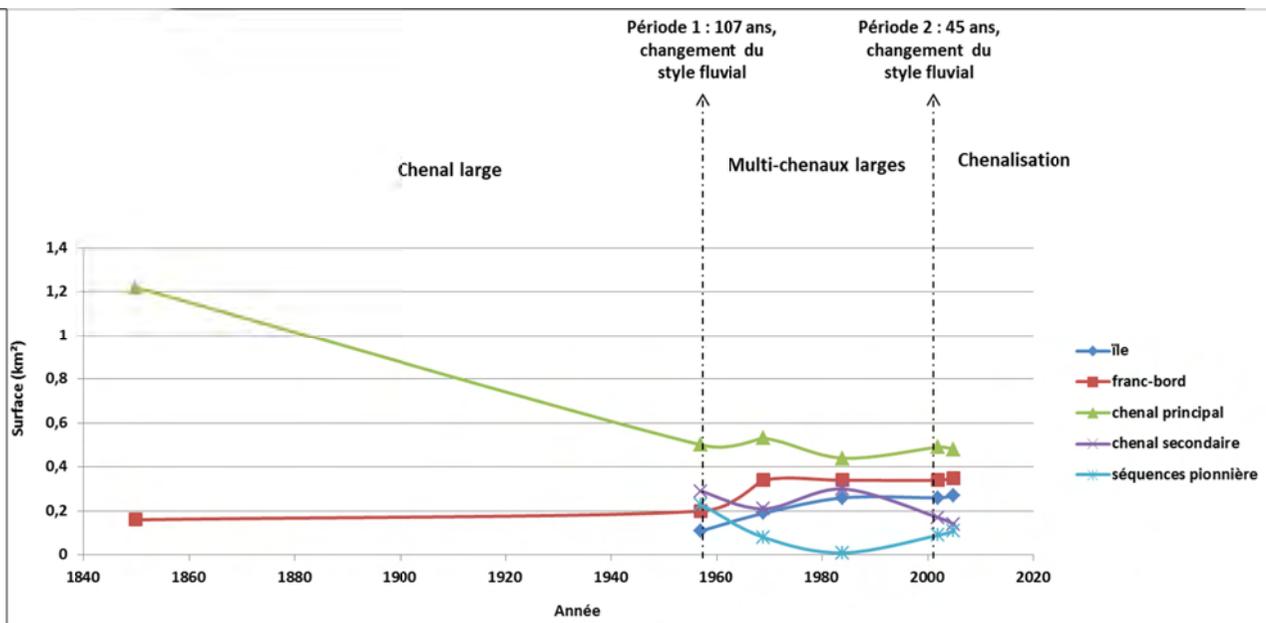
# Migration latérale « vers la rive droite » du chenal principal



Une importante zone d'érosion de la berge en rive droite

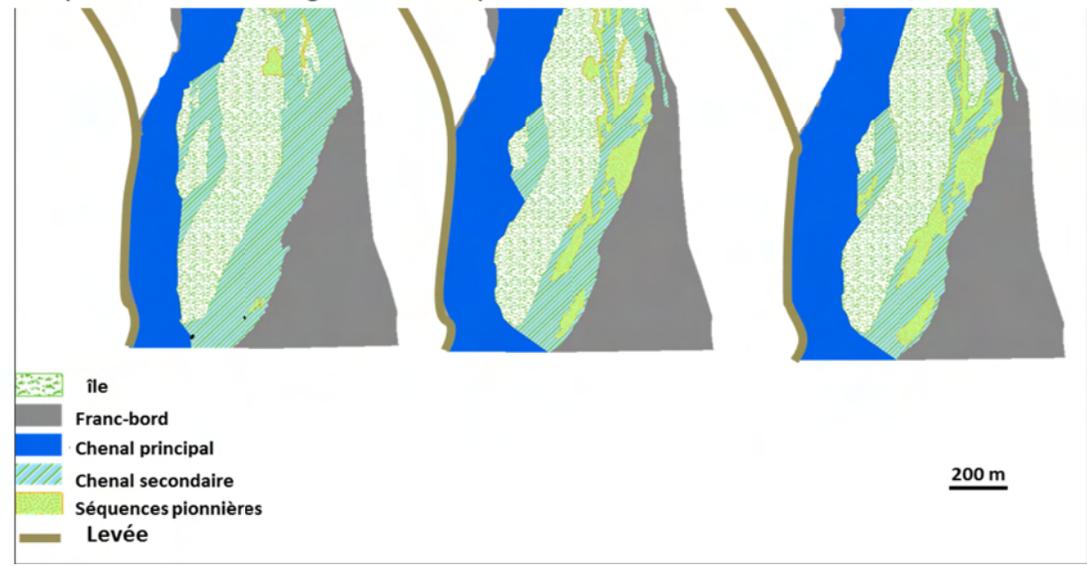


Évolution des surfaces des unités fluviales calculées (en pourcentage) pour la période 1850 - 2005



Année	1850	1957	1969	1984	2002	2005
île		0,11	0,19	0,26	0,26	0,27
franc-bord	0,16	0,2	0,34	0,34	0,34	0,35
chenal principal	1,22	0,5	0,53	0,44	0,49	0,48
chenal secondaire		0,29	0,21	0,3	0,17	0,14
séquences pionnière		0,23	0,08	0,01	0,09	0,11

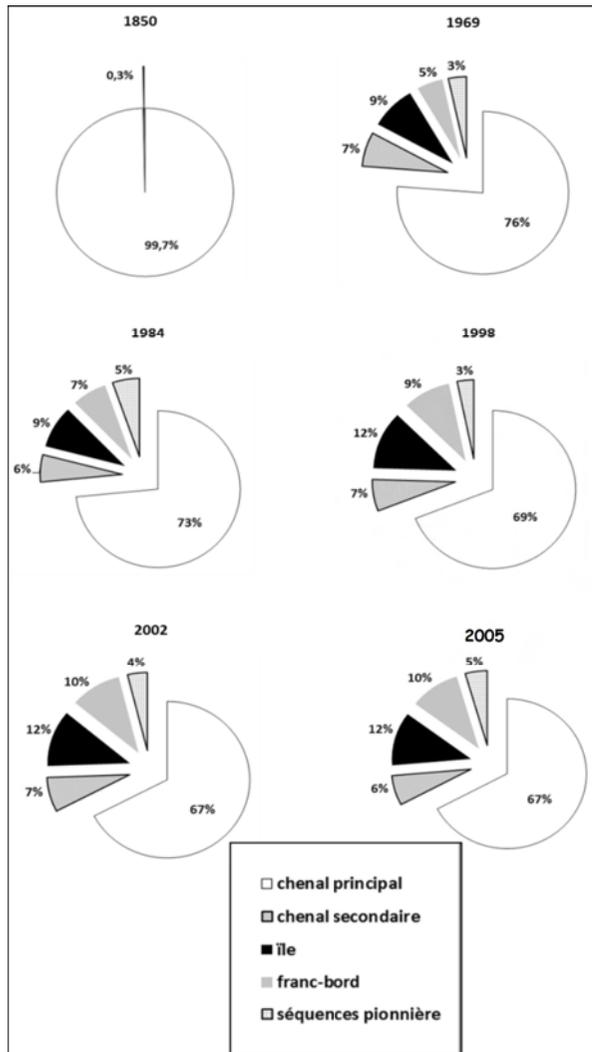
Évolution des surfaces des différentes formes fluviales au sein du lit mineur et détermination des pas de temps relatifs au changement du style fluvial (site atelier de Mesves).



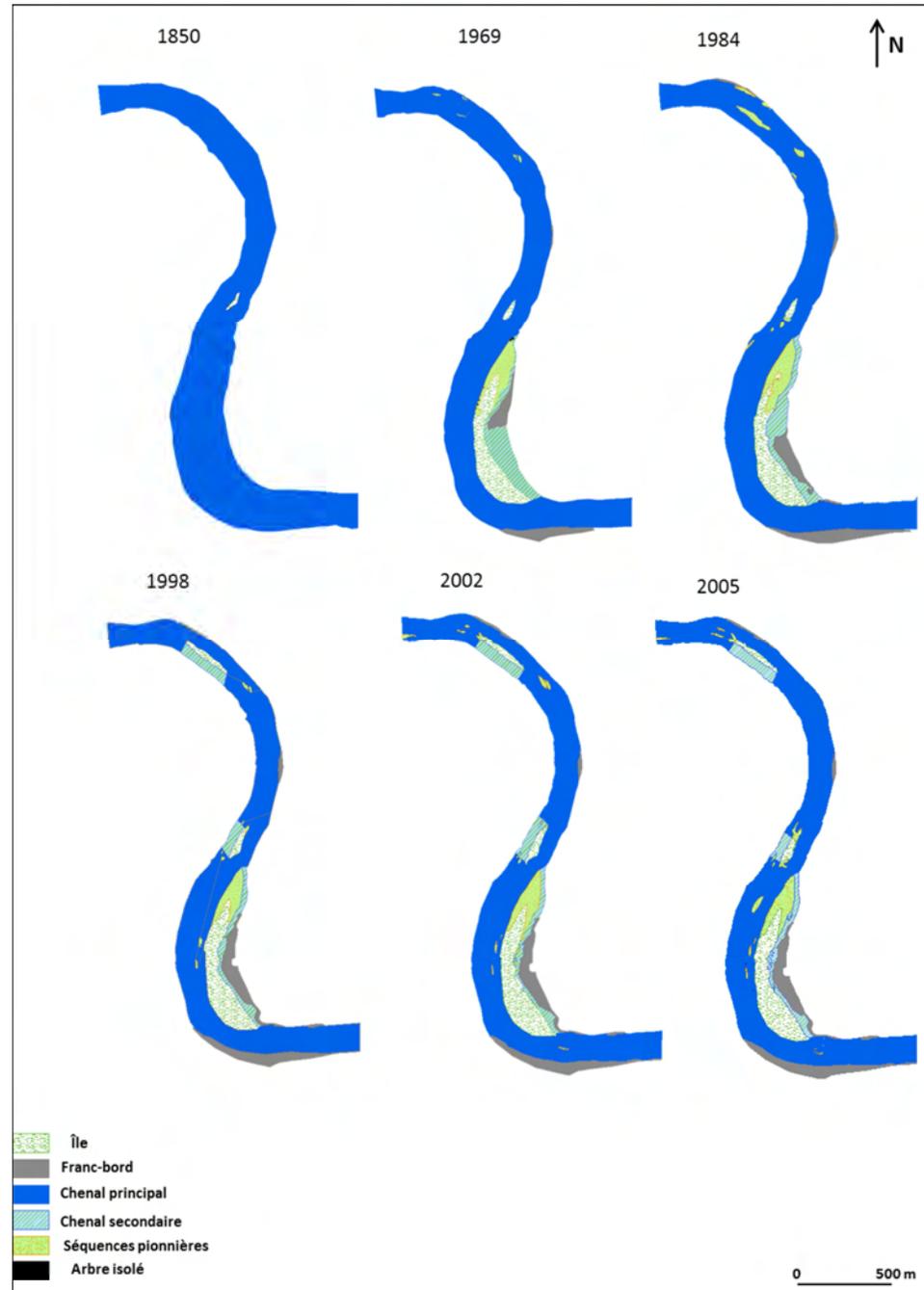
■ île  
 ■ Franc-bord  
 ■ Chenal principal  
 ■ Chenal secondaire  
 ■ Séquences pionnières  
 ■ Levée

# Le site de Guilly

Une tendance à la réduction de la bande active  
« à un rythme plus faible que les sites de  
Mesves et La Charité-sur-Loire »

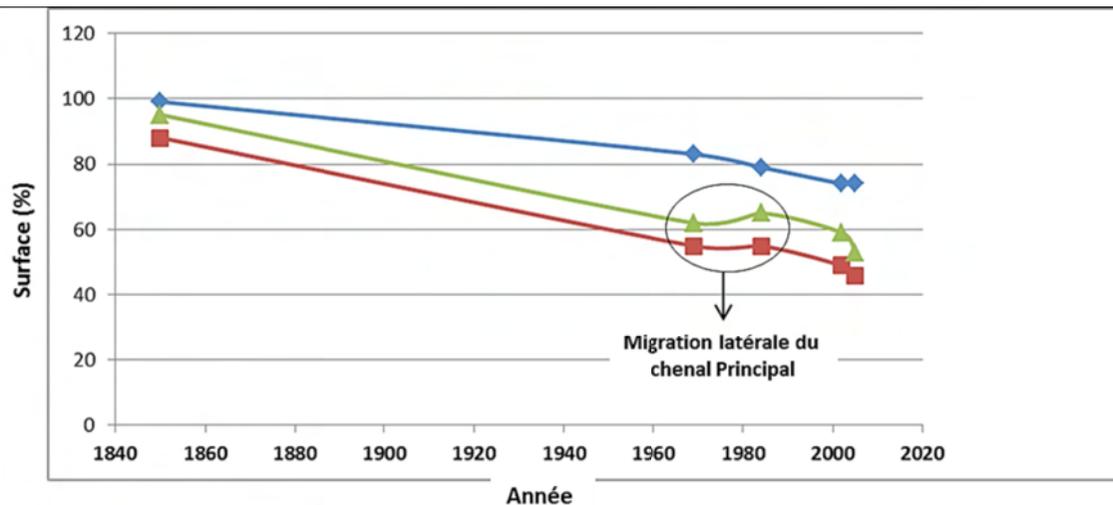


Évolution des surfaces des unités fluviales  
calculées (en pourcentage) pour la période  
1850 - 2005



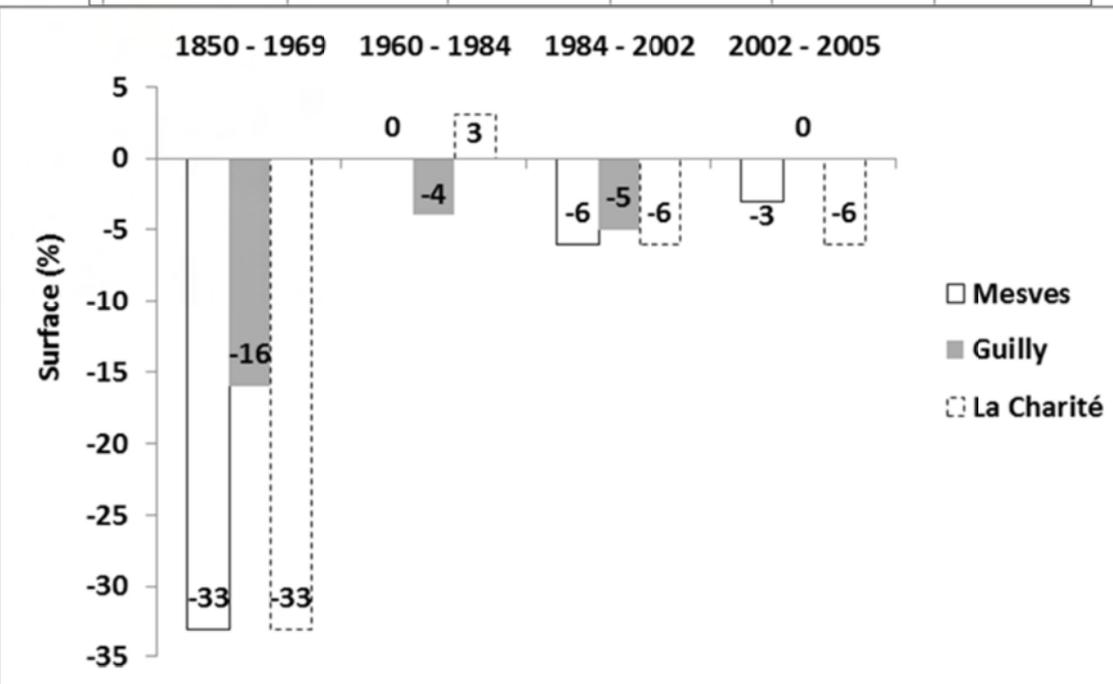
# Synthèse des résultats des trois sites : La Charité-sur-Loire, Mesves et Guilly

Évolution spatiale de la bande active dans les trois sites ateliers : Mesves, Guilly et La Charité-sur-Loire (1850 - 2005).



Année	1850	1969	1984	2002	2005
Guilly	99	83	79	74	74
Mesves	88	55	55	49	46
La Charité	95	62	65	59	53

Rythme d'évolution de la surface occupée par la bande active dans les trois sites ateliers, cette évolution est influencée par la migration du chenal principal et dans une moindre mesure par les actions de dévégétalisation (augmentation de la surface de la bande active).



## Des îles qui se développent en longueur

Guilly			
Années	île n°1	île n°2	île n°3
1850	5,72	-	-
1969	4,03	8,44	-
1984	3,46	8	-
2002	4,91	7,72	9,34
2005	5,08	6,63	9,52

La Charité								
Années	île n°1	île n°2	île n°3	île n°4	île n°5	île n°6	île n°7	île n°8
1850								
1969	5,87	3,66	4,7	4,69	2,64			
1984	5,9	4,32	4,53	4,22	3,29	6,41		
		île n°2 + île n°3						
2002	5,75	5,47		4,1	2,82	4,3	3,4	3,69
2005	6,35	5,22		4,19	3	4,52	3,54	3,13

↓  
Fusion de deux îles

Mesves						
Années	île n°1	île n°2	île n°3	île n°4	île n°5	île n°6
1850						
1969	4,98	4,76	3,59			
1984	6,24	3,12	5,95			
2002		2,7	5,98	4,22	3,13	3,05
				île n°4 + île n°5		
2005		3,25	6,2	4,98		2,28

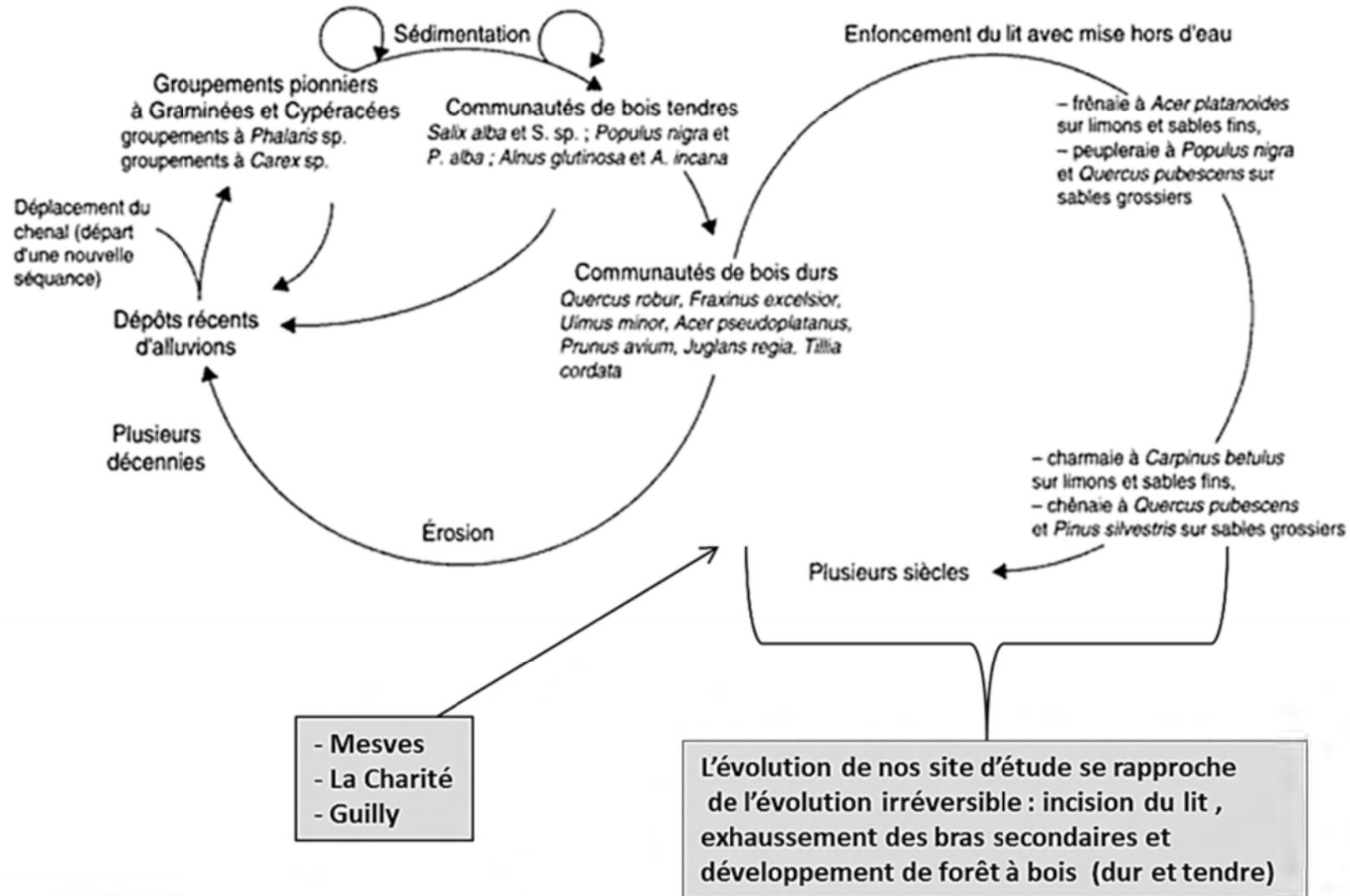
↓  
Disparition de l'île n°1

→ Fusion de deux îles

Évolution du rapport « longueur/ largeur » des îles dans les trois sites ateliers. Les îles ont une forme allongée et se développent essentiellement par fusion avec des séquences pionnières formées au niveau de leurs extrémités. Un seul cas d'évolution par fusion de deux îles est enregistré dans le site de Mesves et dans La Charité.

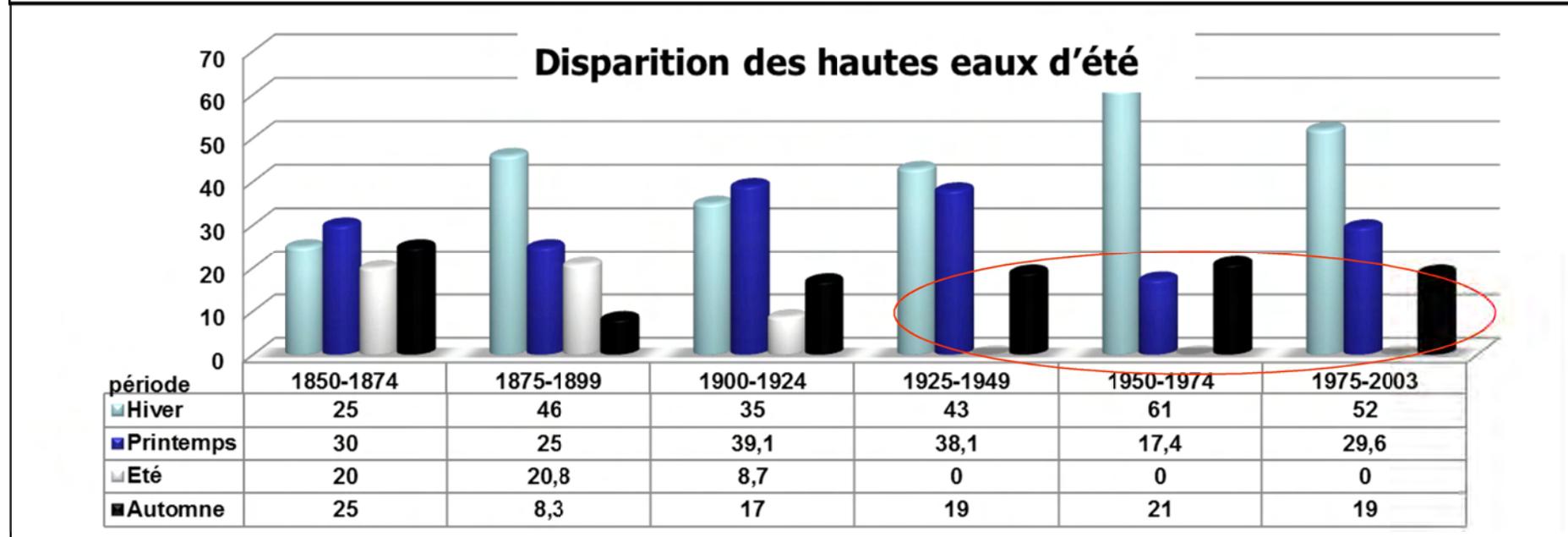
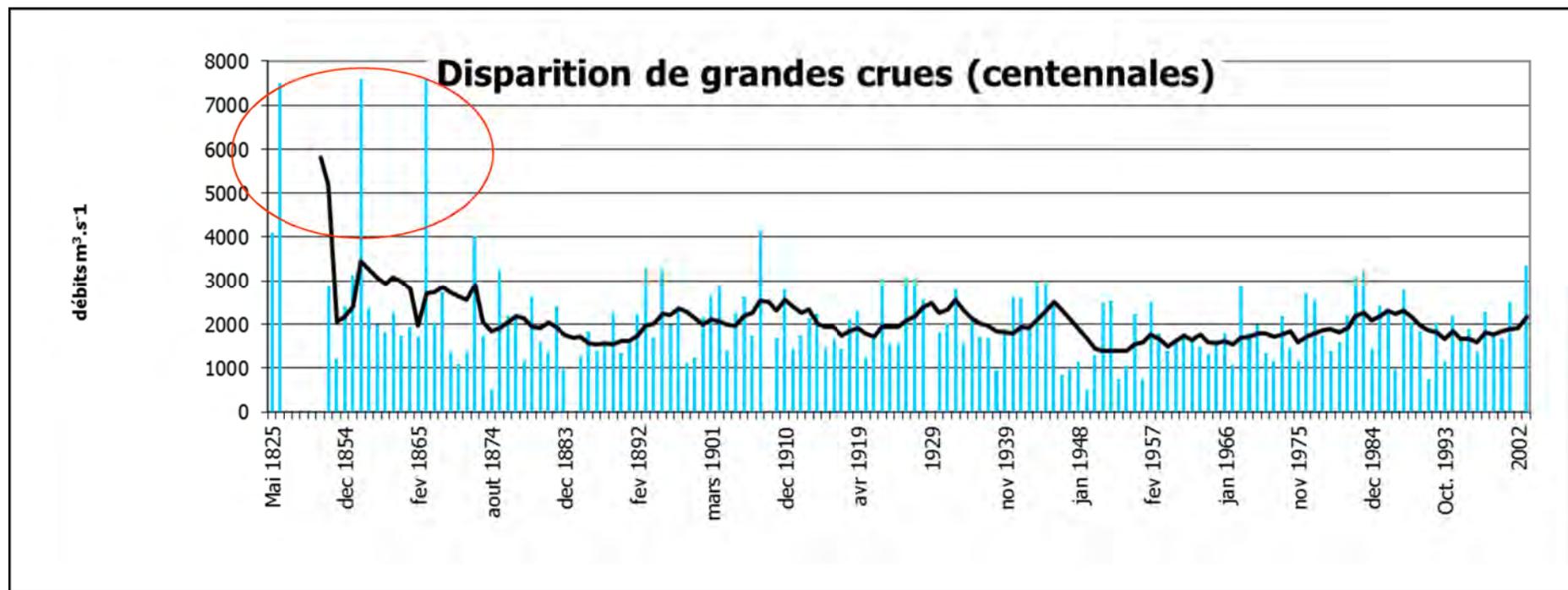
## ÉVOLUTION RÉVERSIBLE Forêts de bois tendres

## ÉVOLUTION IRRÉVERSIBLE Forêts de bois durs



Rapprochement du mode d'évolution des sites ateliers avec le modèle de Pautou et Ruffinoni (1996).

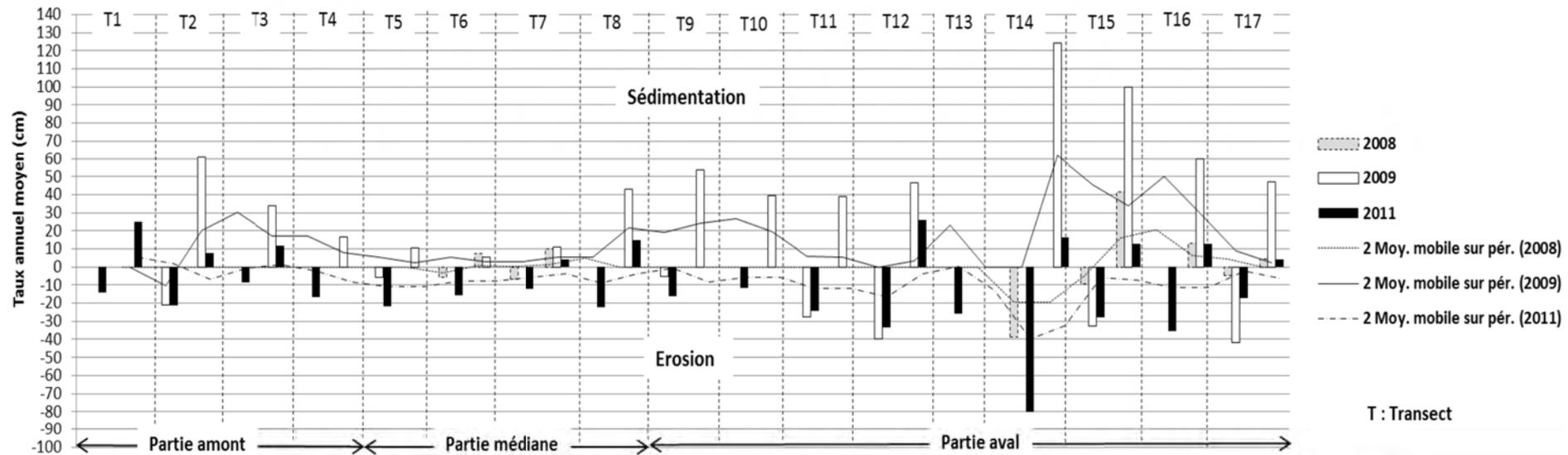
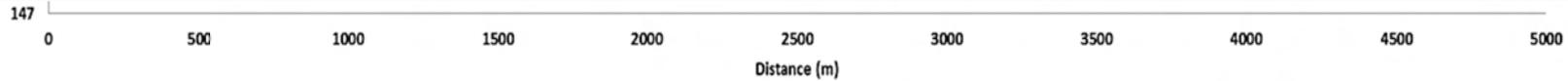
# L'influence des conditions hydrologiques



**□ L'analyse à grande échelle spatiale**

# Synthèse de l'évolution topographique des profils transversaux (2005 - 2011), site atelier de La Charité-sur-Loire)

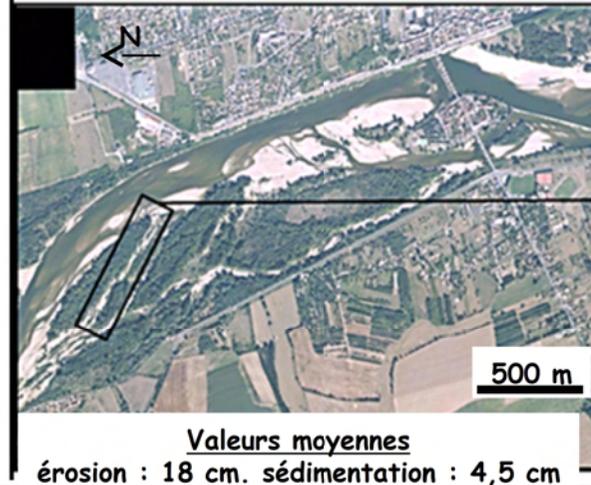
Caractéristiques du transect	année		
	2008	2009	2011
Longueur totale des zones de sédimentation (m)	236	1461	338
Longueur totale des zones d'érosion (m)	379	149	1638
Taux moyen annuel de sédimentation (m)	0,15	0,46	0,13
Taux moyen annuel d'érosion (m)	0,13	0,24	0,23
LTZS / LTZE	0,62	9,8	0,2
TMAS / TMAE	1,15	1,9	0,5
(LTZS / LTZE) . (TMAS / TMAE)	0,7	18,6	0,1
La tendance	érosion	sédimentation	érosion



Évolution des taux annuels moyen d'érosion et de sédimentation entre (2008 et 2011)

# Exemple de l'évolution topographique d'un chenal secondaire ayant fait l'objet de travaux de dévégétalisation en 2010

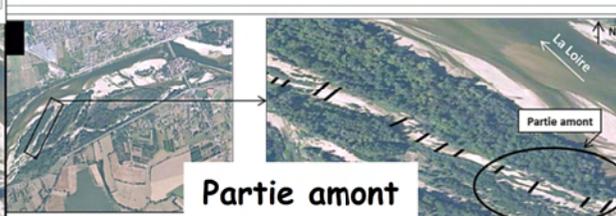
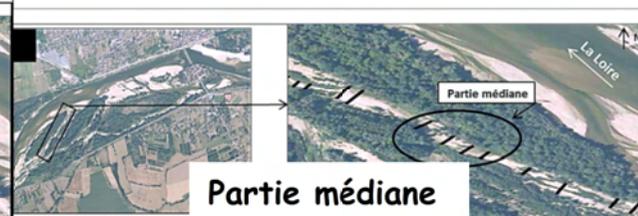
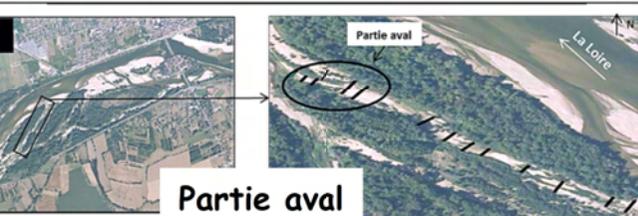
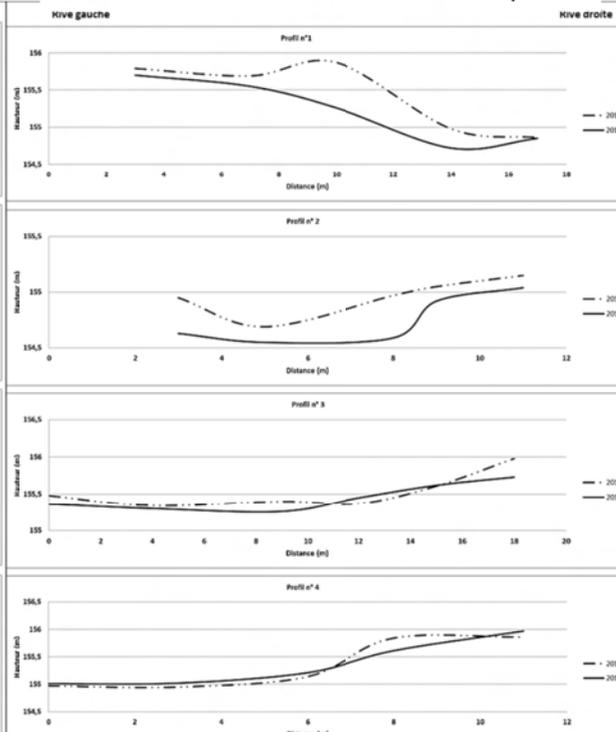
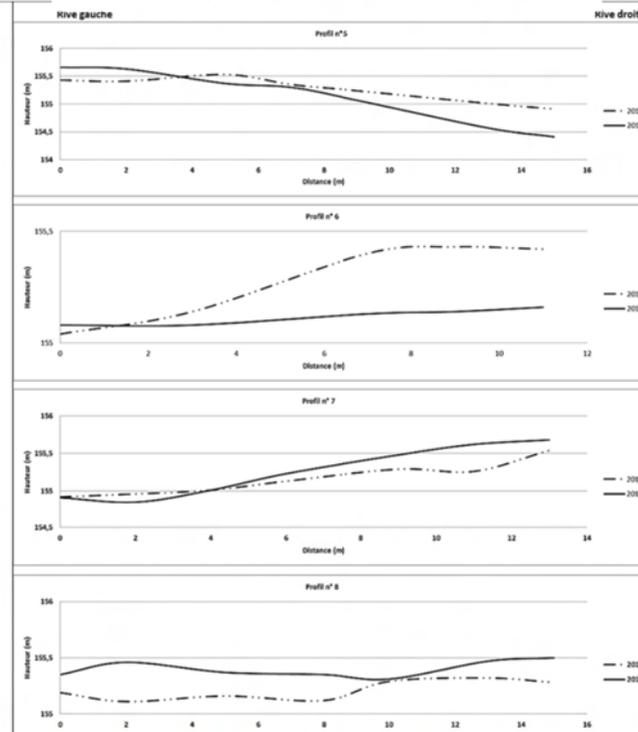
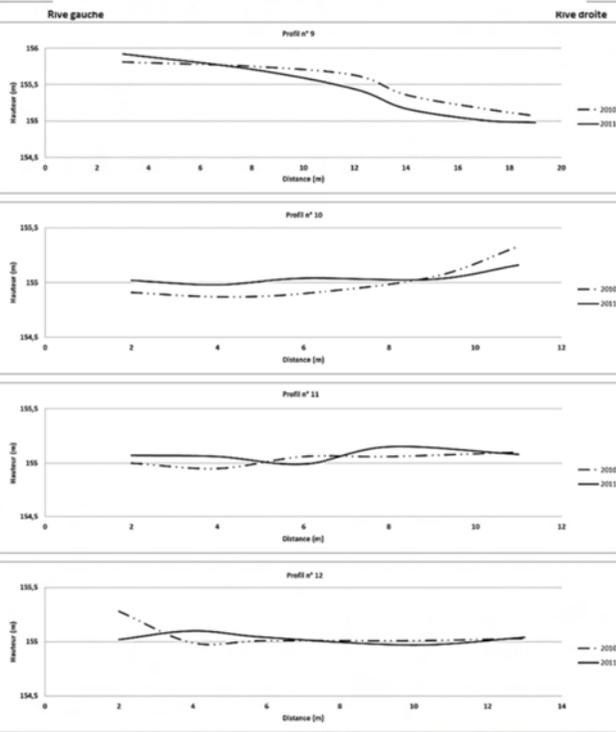
« déplacement du stock sédimentaire vers l'aval »  
(2010 -2011)



Valeurs moyennes  
érosion : 10 cm. sédimentation : 7 cm

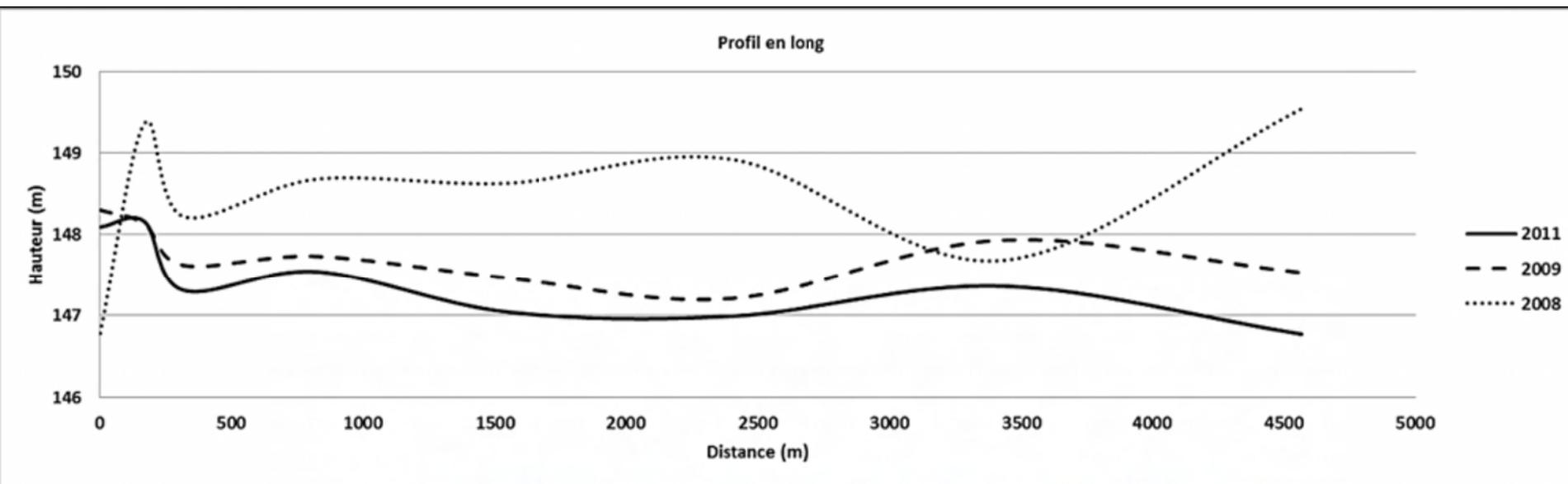
Valeurs moyennes  
érosion : 24 cm. sédimentation : 19 cm

Valeurs moyennes  
érosion : 18 cm. sédimentation : 4,5 cm



# Site atelier de Mesves

## « Une incision permanente du plancher alluvial »



Caractéristiques du transect	Année	
	2009	2011
Longueur totale des zones de sédimentation (m)	216	569
Longueur totale des zones d'érosion (m)	1032	707
Taux moyen annuel de sédimentation (m)	0,25	0,18
Taux moyen annuel d'érosion (m)	1,03	0,26
LTZS / LTZE	0,2	0,8
TMAS / TMAE	0,24	0,69
(LTZS / LTZE) . (TMAS / TMAE)	0,04	0,55
La tendance	érosion	érosion

Synthèse de l'évolution topographique des profils transversaux (2005 - 2011), site atelier de Mesves.



## Site atelier de Guilly

Une omniprésence de seuils durs susceptibles d'influencer le transport solide

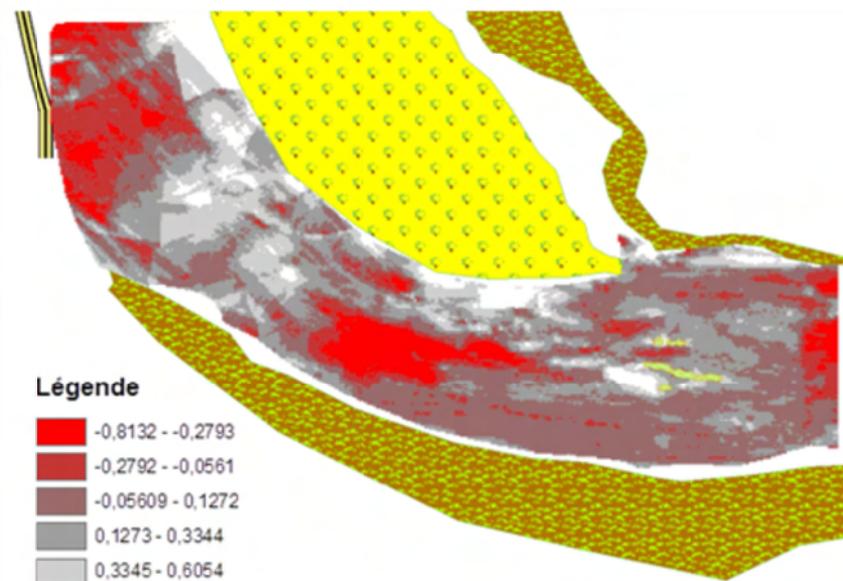
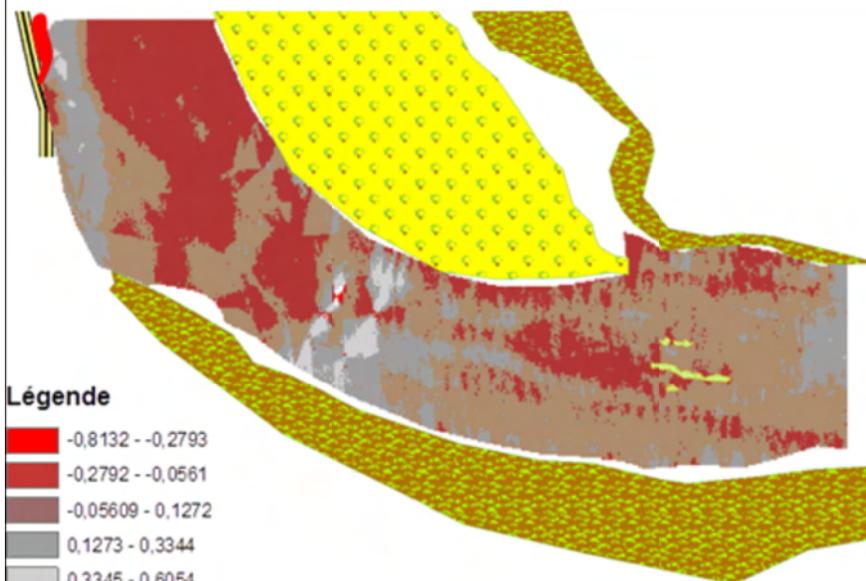


# Bilan sédimentaire : « une tendance permanente à la sédimentation »

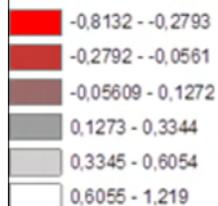


2008 - 2009

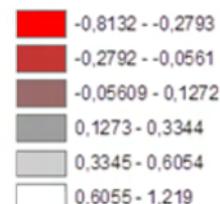
2009 - 2010



Légende



Légende



- île
- franc-bord
- séquences pionnières

Volume sédimenté : 69 100 m<sup>3</sup>

Volume sédimenté : 35827 m<sup>3</sup>

0 200 m

Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 - 2009 et 2009 - 2010 dans la partie amont

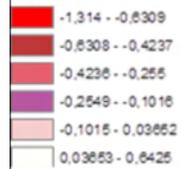
Bilan sédimentaire : « une tendance permanente à l'érosion »



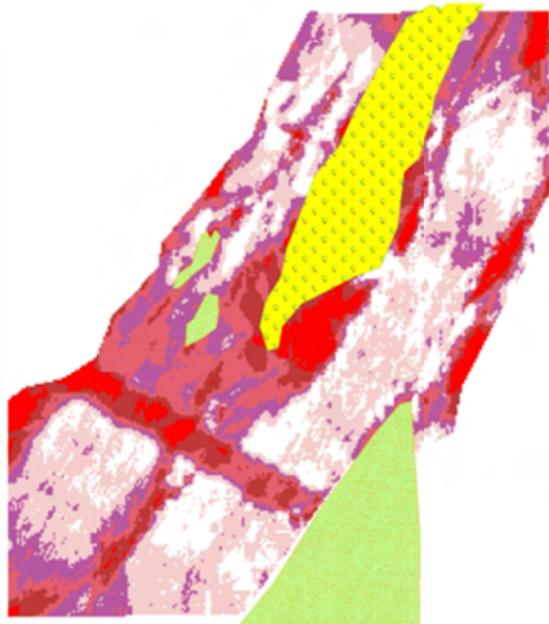
2008 - 2009

2009 - 2010

Légende

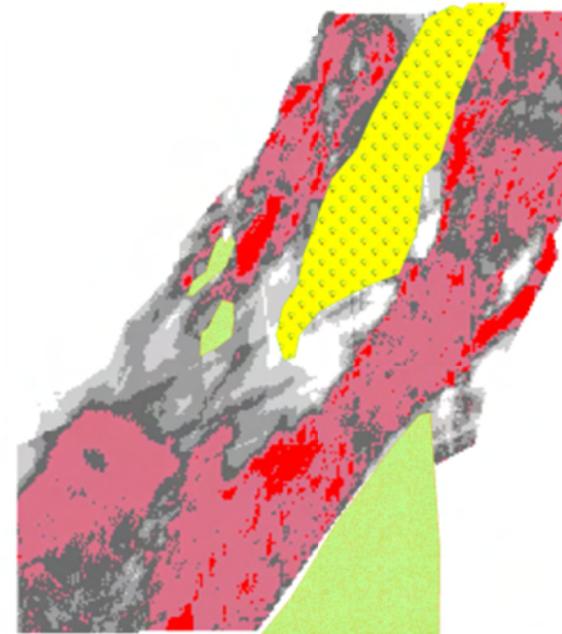


- Yellow: île
- Dark Green: franc-bord
- Light Green: séquences pionnières



**Volume érodé: 55 400 m<sup>3</sup>**

Légende



**Volume érodé: 13329 m<sup>3</sup>**

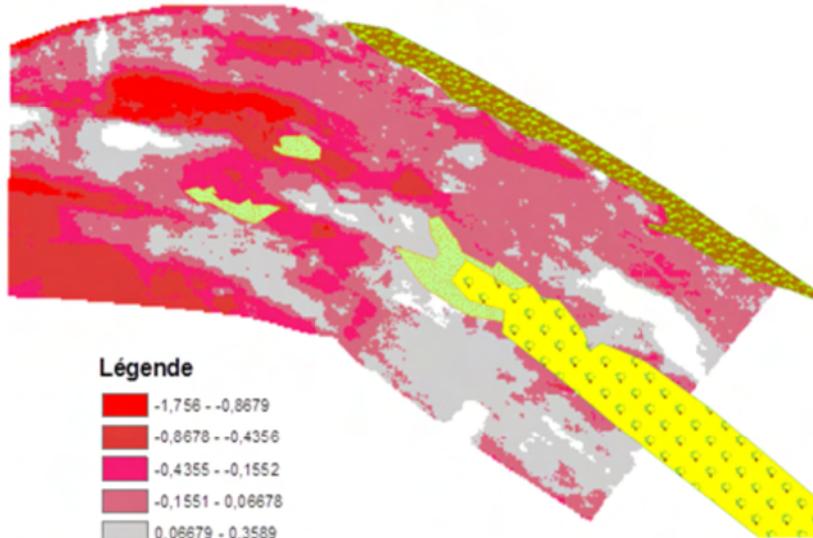
0 200 m

Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 - 2009 et 2009 - 2010 dans la partie médiane

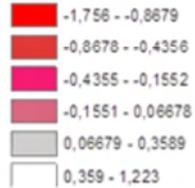
Bilan sédimentaire : « une tendance permanente à l'érosion »



2008 - 2009

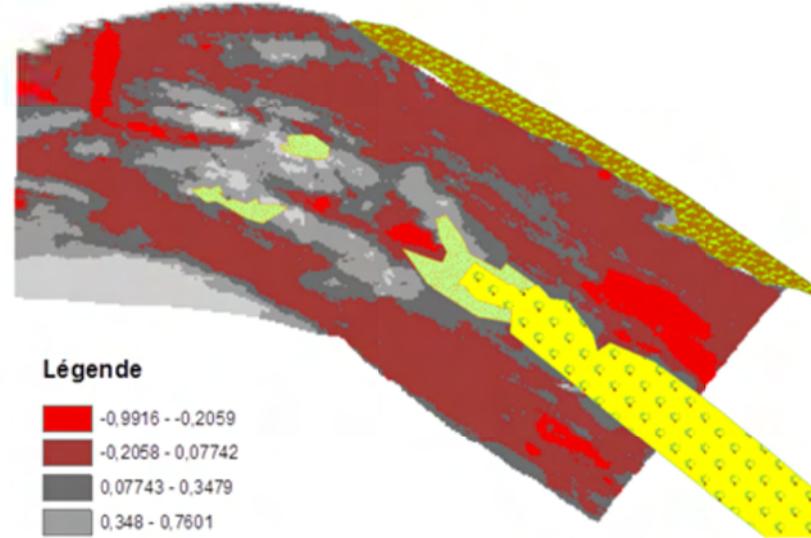


Légende

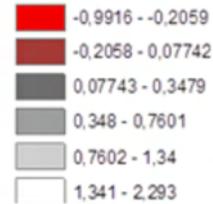


Volume érodé : 24 000 m<sup>3</sup>

2009 - 2010



Légende



Volume érodé : 5453 m<sup>3</sup>

- île
- franc-bord
- séquences pionnières

0 200 m

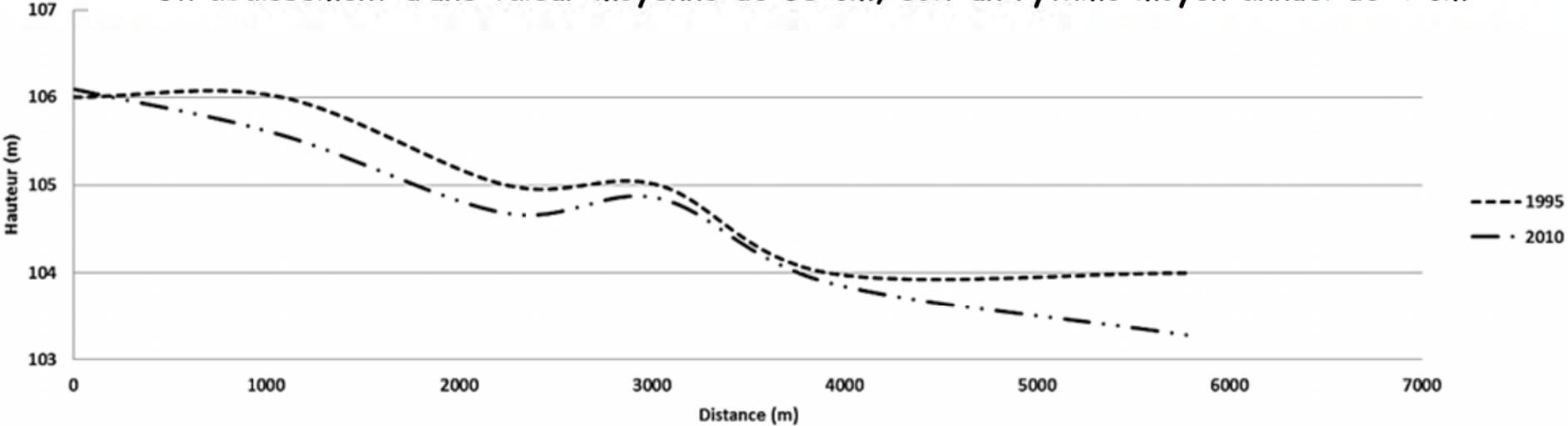
Budget sédimentaire calculé pour les années 2008 - 2009 et 2009 - 2010 dans la partie amont

# Évolution topographique du profil en long (1995 – 2010)

Site atelier de Guilly, chenal principal

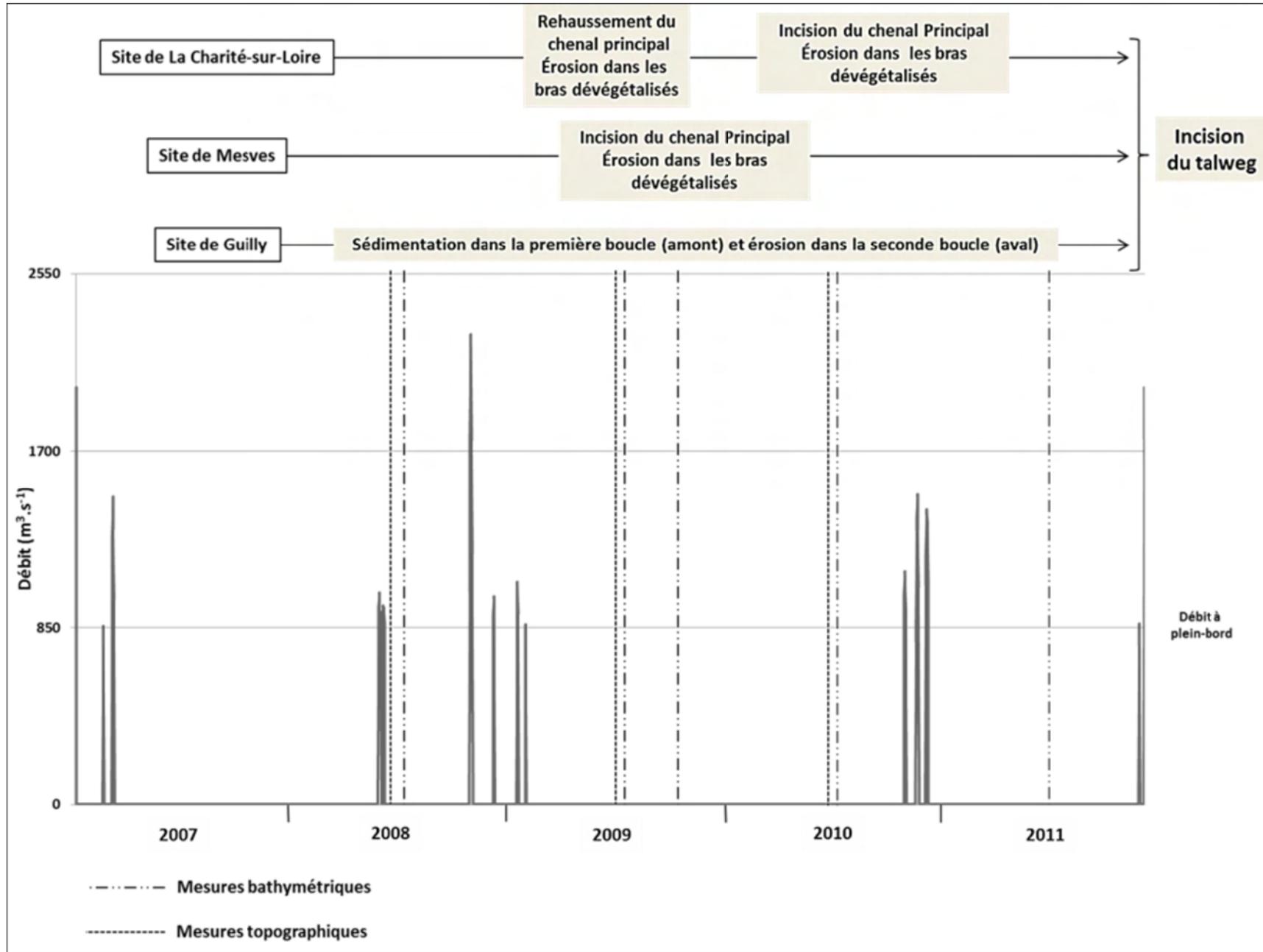


« Un abaissement d'une valeur moyenne de 58 cm, soit un rythme moyen annuel de 4 cm »

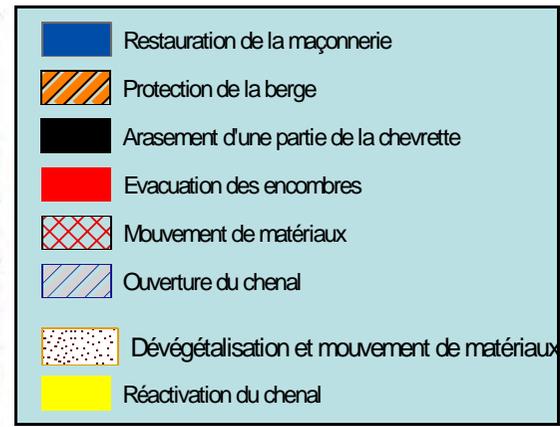
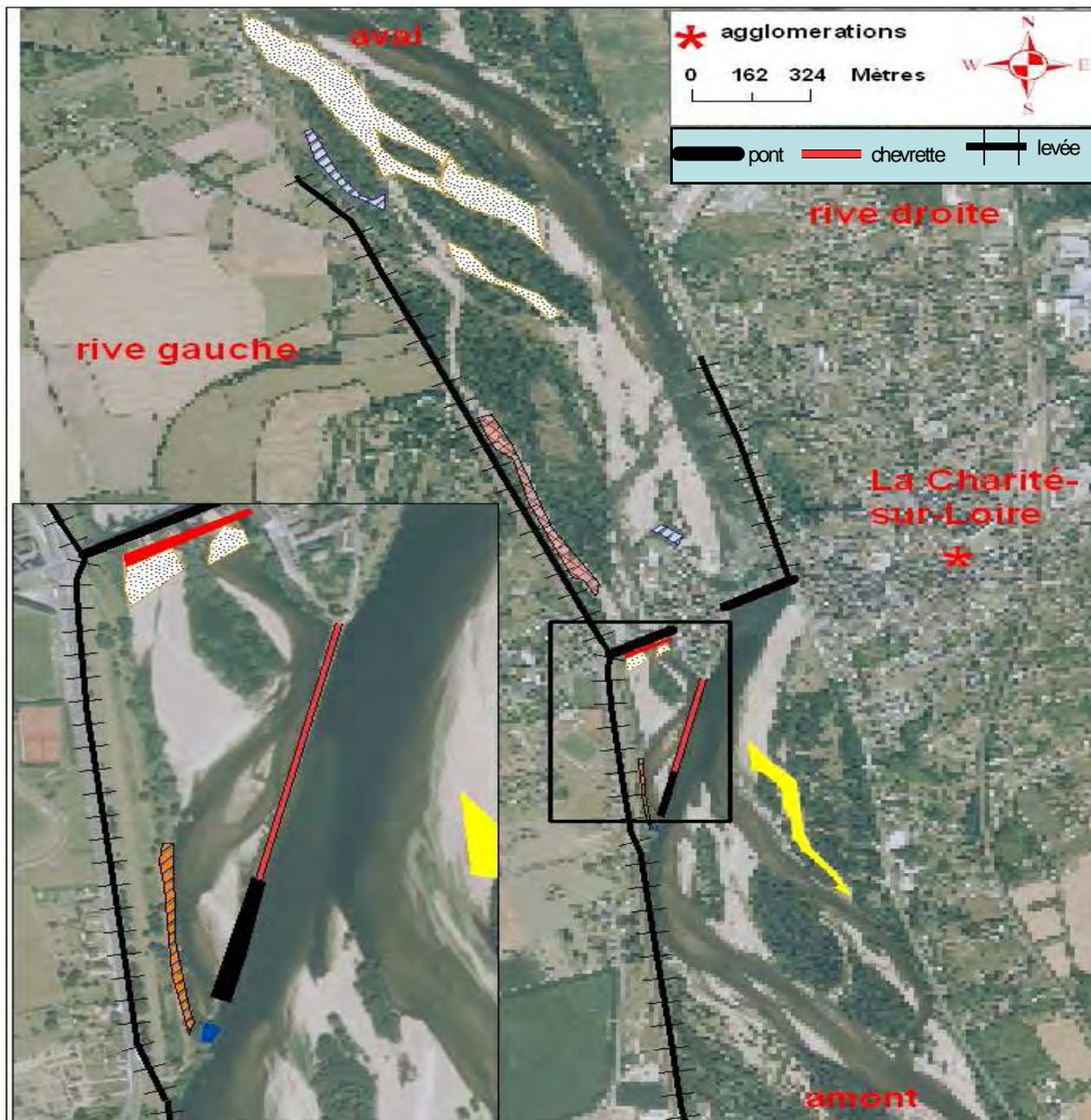


Les valeurs relevées au niveau des berges concaves (mouilles) varient entre 1 m et 2 m, soit un rythme variant de 7 à 12 cm/an.

# Synthèse des résultats



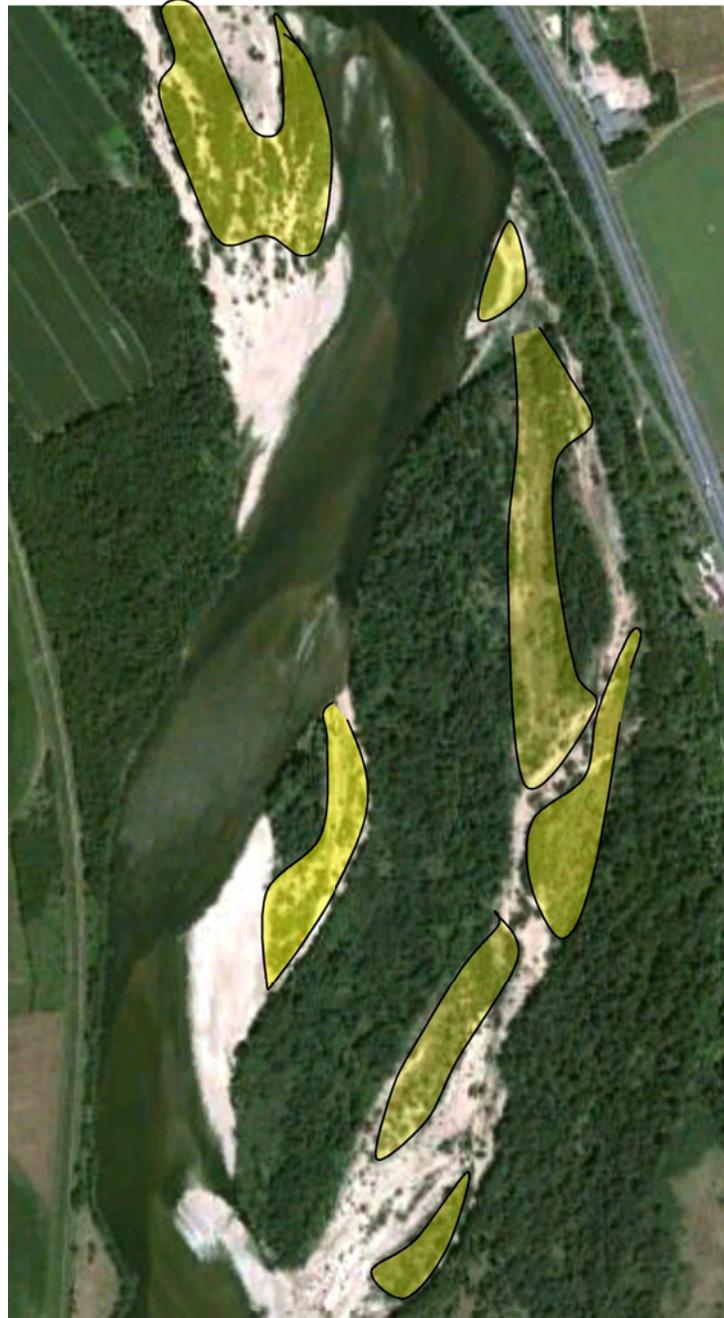
**□ Optimisation des travaux de restauration**



Le but de cette opération :

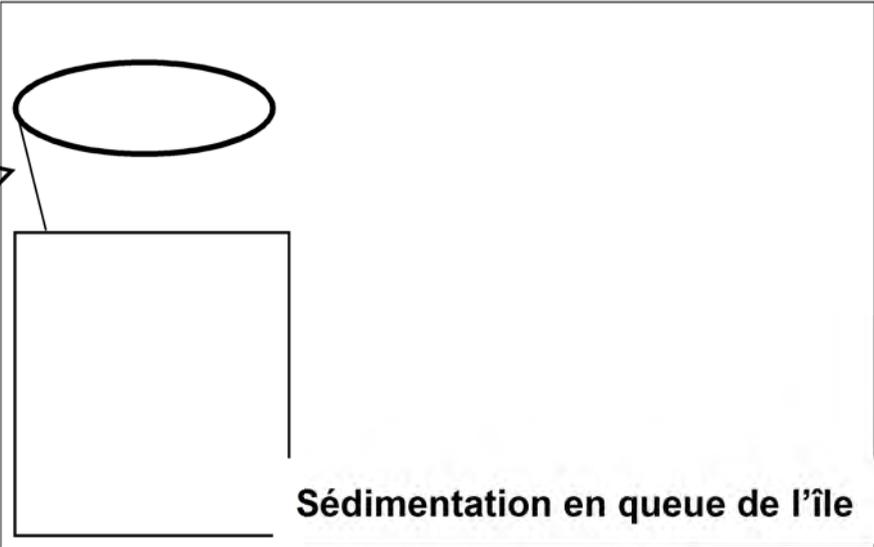
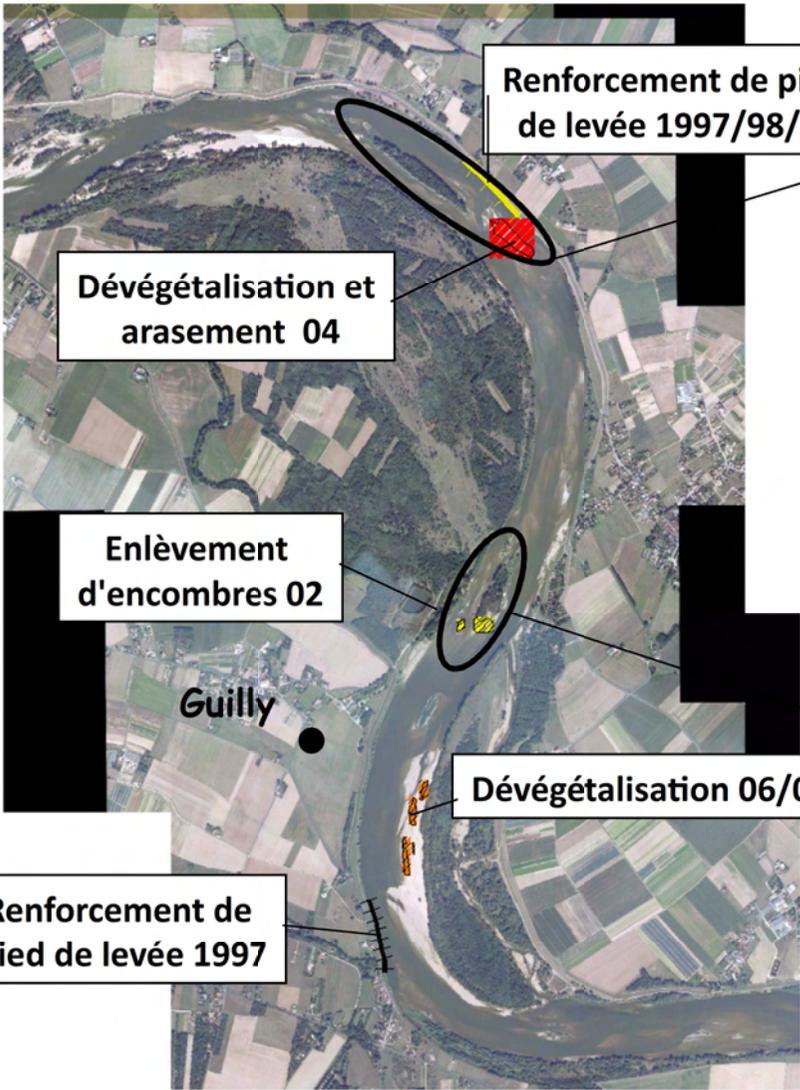
- favoriser l'écoulement sous le pont de la Charité.
- protéger les berges et les ouvrages
- réduire la lame d'eau en cas d'inondation

 Suppression de la végétation

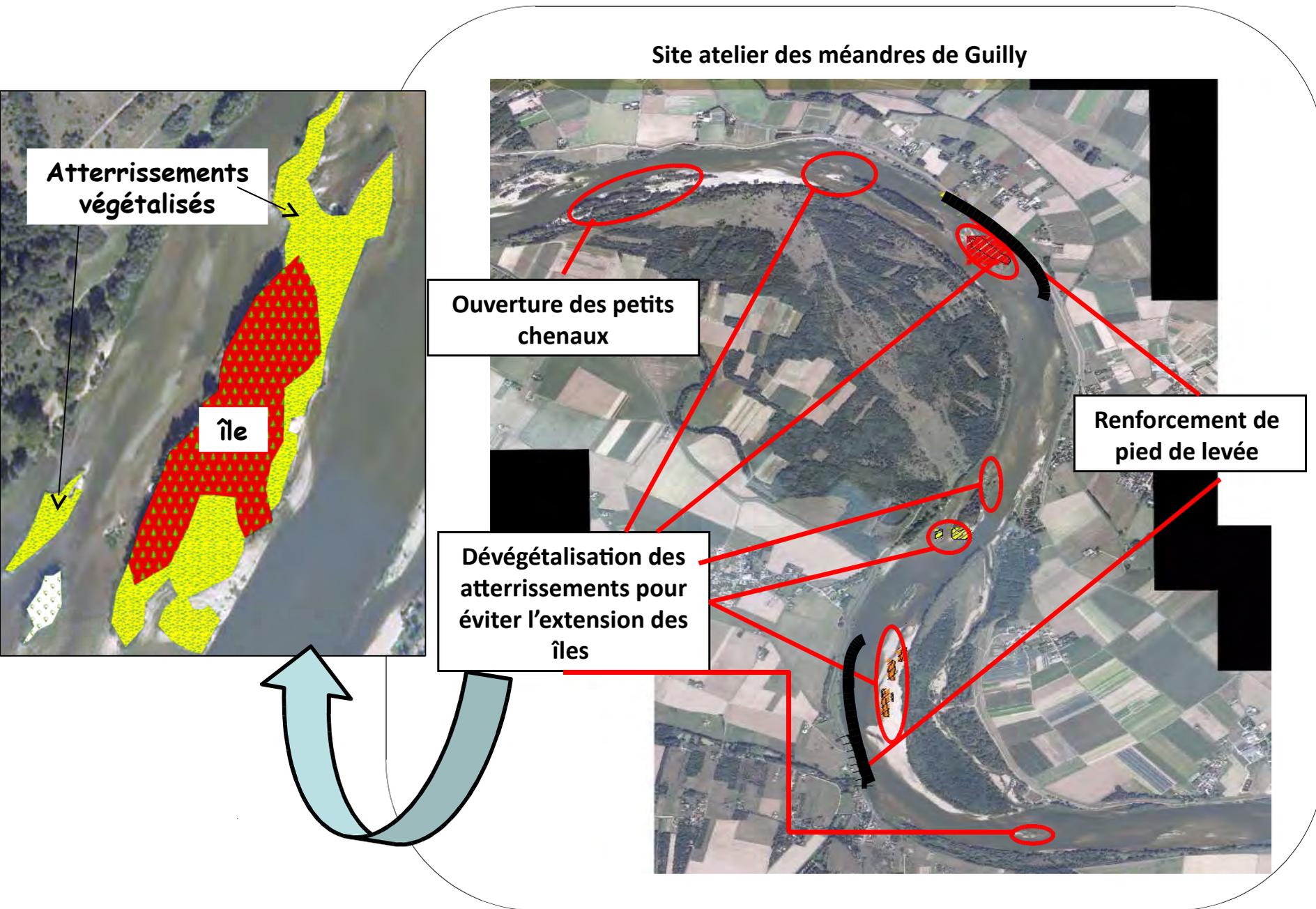


Des unités végétalisées qui favorisent la formation des atterrissements par réduction de la vitesse d'écoulement

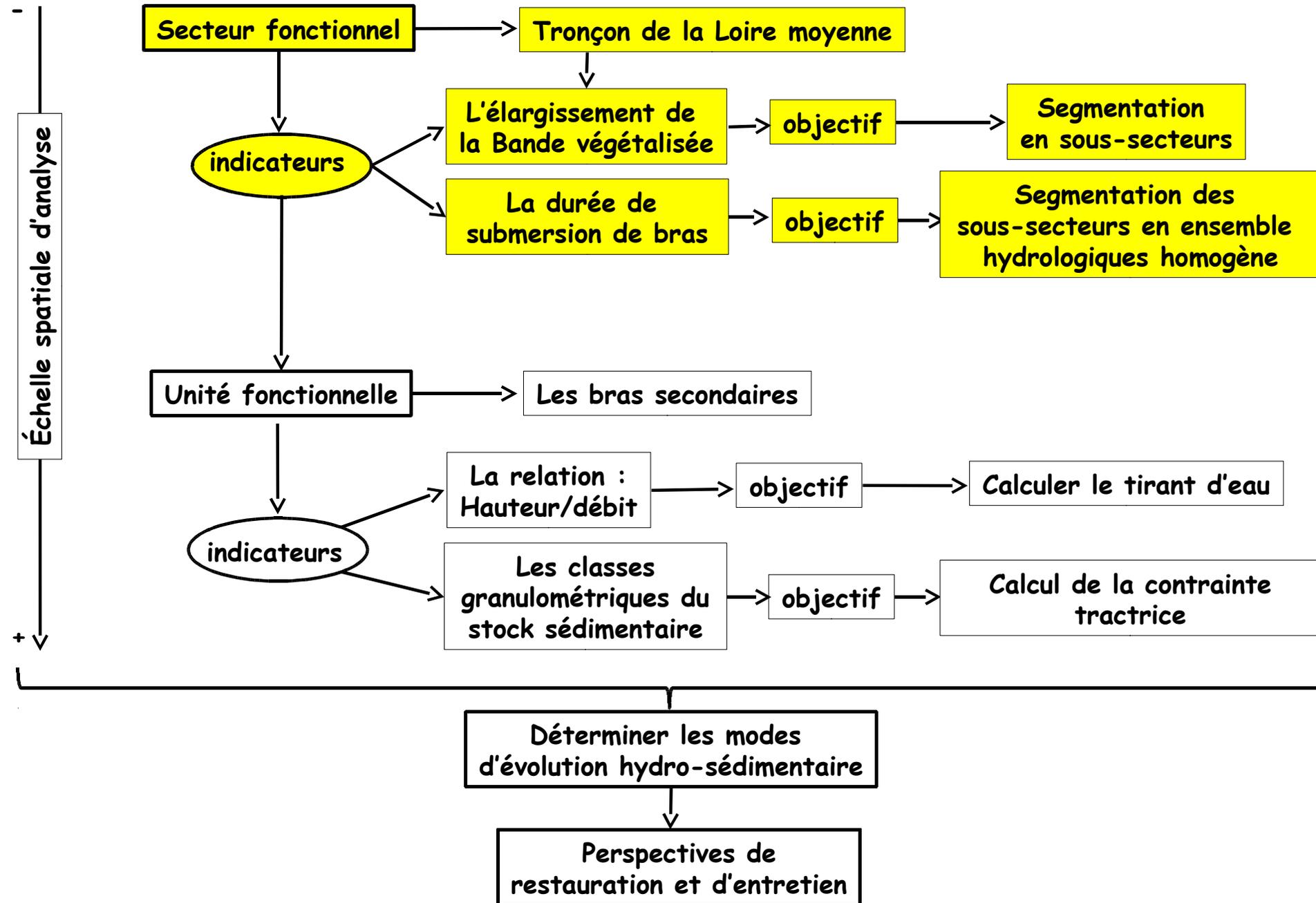
Typologie et fréquence des travaux de restauration



# Perspectives de restauration

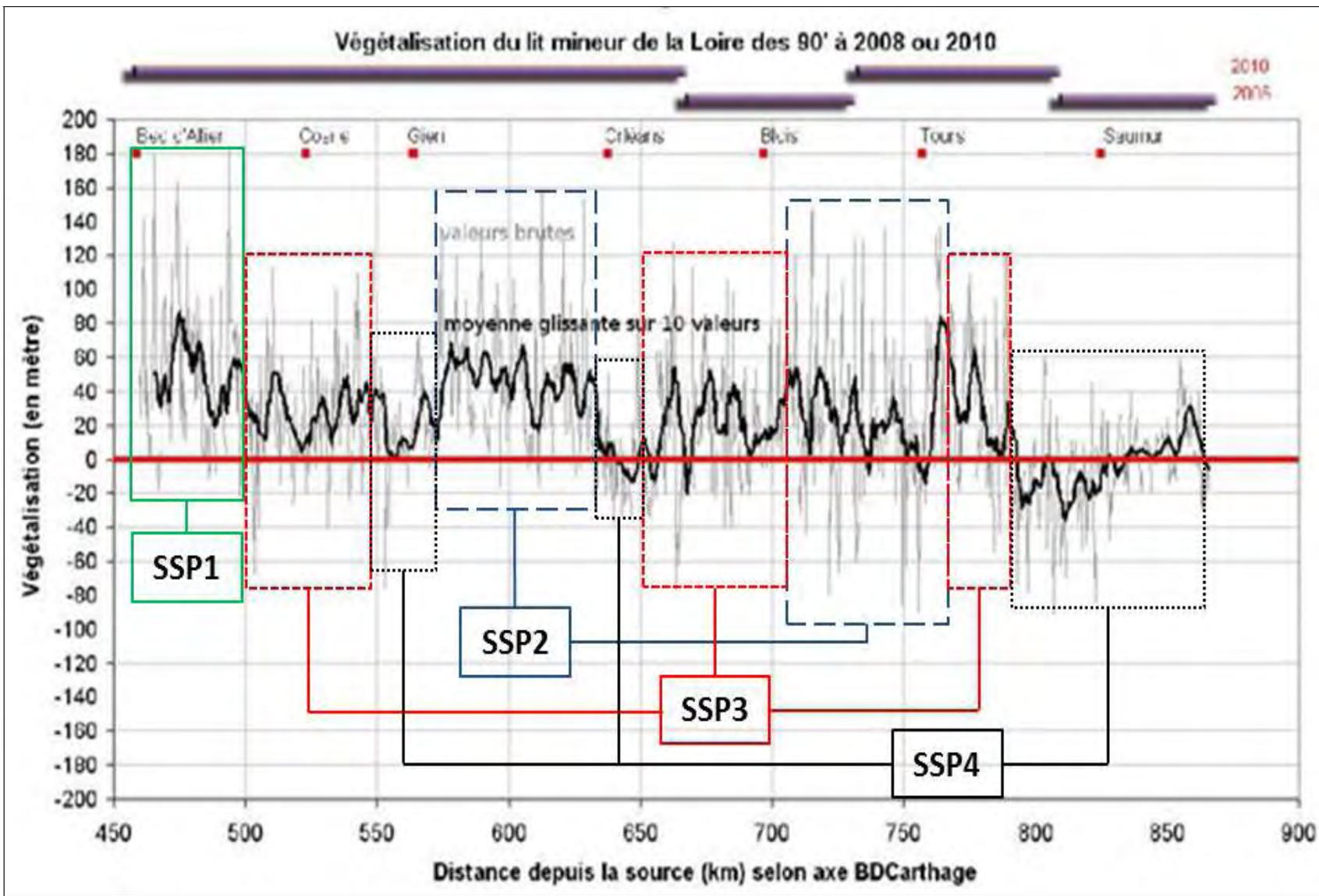


# Protocole d'analyse pour améliorer les travaux de restauration du lit



# Délimiter les sous-secteurs en fonction du rythme d'évolution du couvert végétal

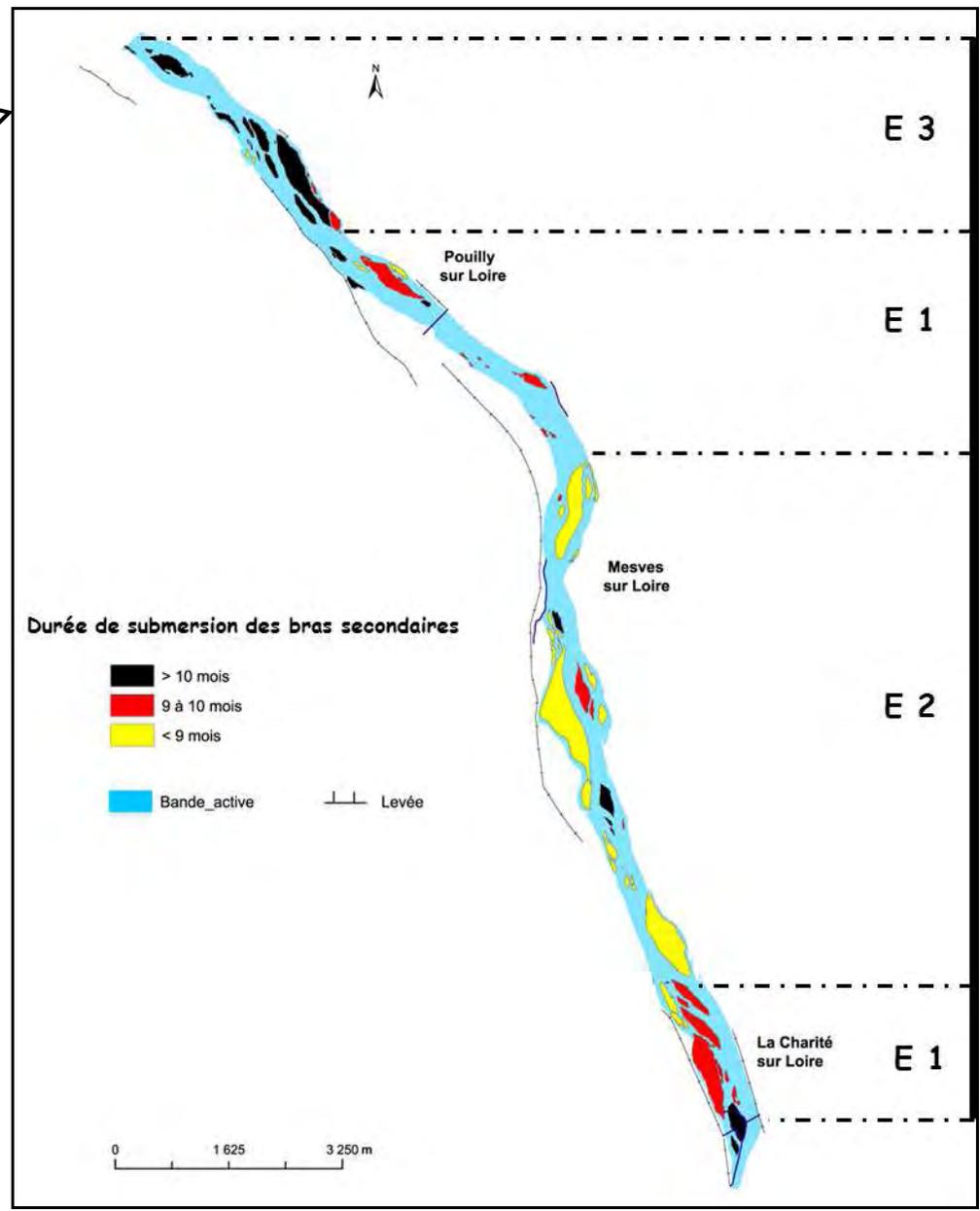
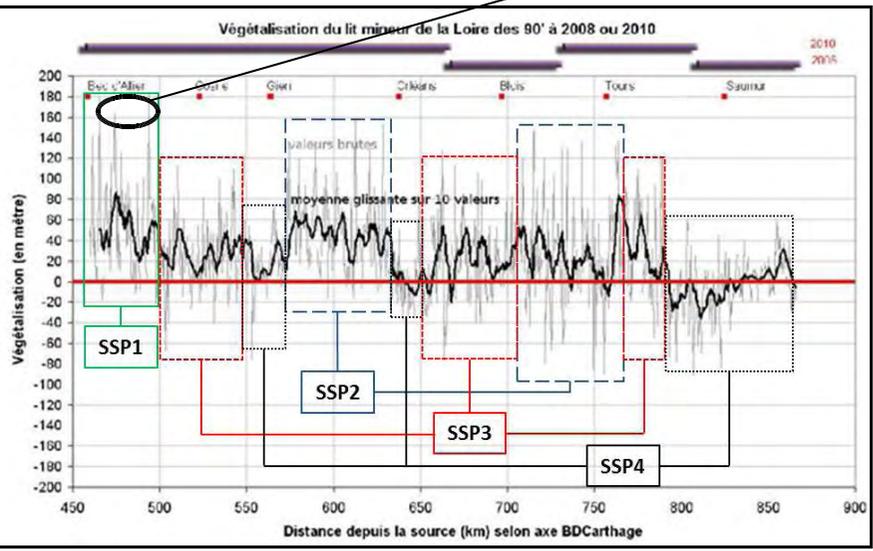
« Établir une hiérarchie des sous-secteur prioritaire et adapter la fréquence des travaux »



SSP1 : Sous-secteur prioritaire d'ordre 1

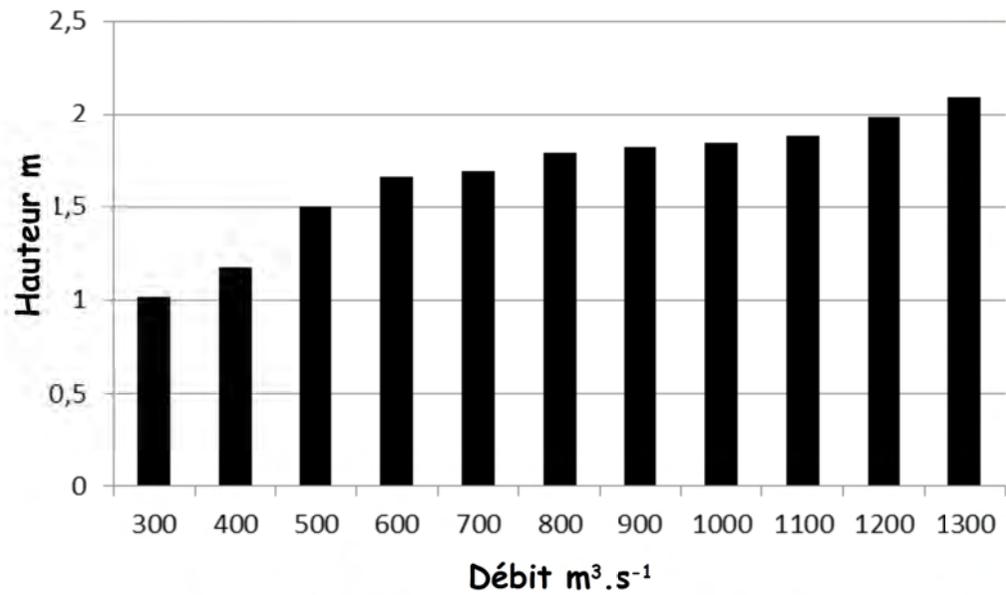
# Délimiter les ensembles hydrologiques homogènes en fonction des durées de submersion des bras secondaire.

« Localiser les secteur à faible activité hydrologiques et adapter la fréquence et le type des travaux »

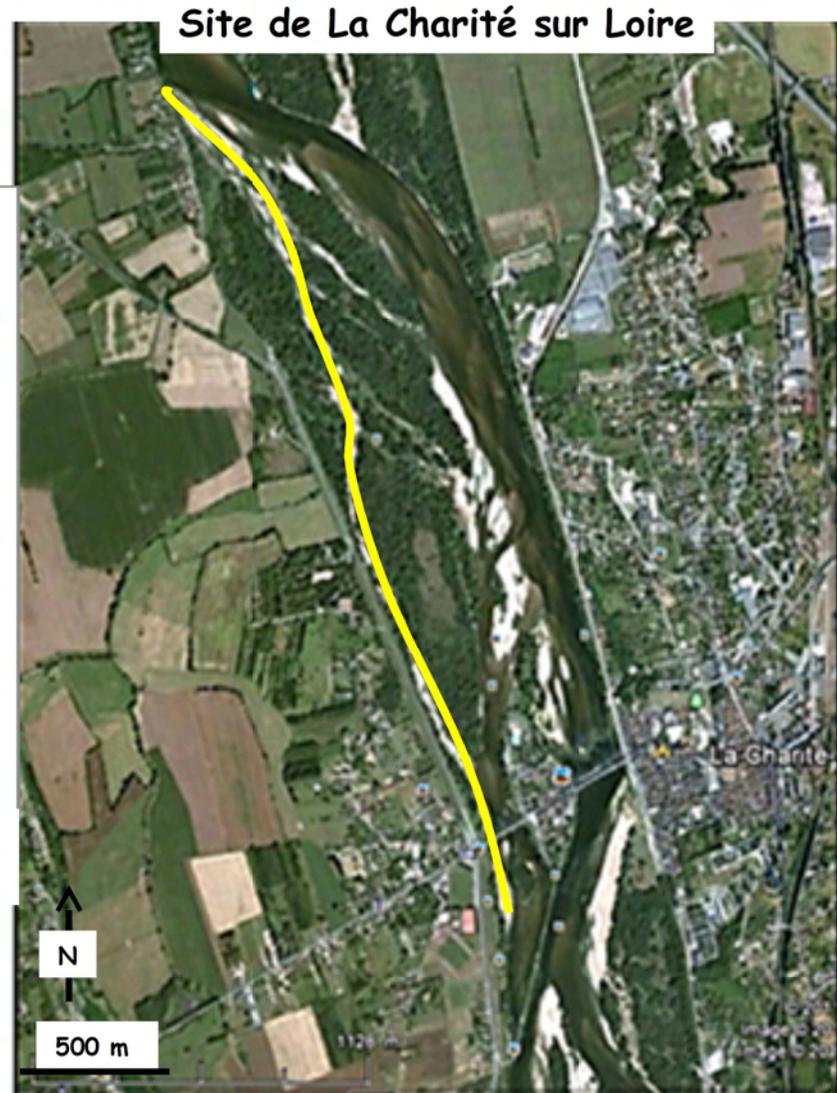


## La relation : Hauteur/débit, *calculer le tirant d'eau*

Comparer l'activité hydrologique des bras secondaires « la compétence »



Relation « hauteur/débit », exemple d'un bras secondaire au sein du site de La Charité-sur-Loire



## Définir les classes granulométriques du stock sédimentaire

### « Calcul de la contrainte tractrice »

#### Paramètre de Shields

$$\tau^* = \frac{\gamma_w \cdot R \cdot i}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}}$$

Selon Parker (1982)

Granulométrie	Critère de départ d'un grain du fond	Critère de dépôt d'un grain en mouvement
uniforme	$\tau^* \geq 0,047$	$\tau^* \leq 0,047$
étalée	$\tau^* \geq 0,138$	$\tau^* \leq 0,047$

Une classification pratique est proposée par Ramette

- pour $\tau^* < 0,027$ .....	le grain de diamètre $d$ est au repos ; le fond est plat ;
- pour $0,027 < \tau^* < 0,047$ .....	il y a apparition des tous premiers mouvements, mais pas assez pour générer un débit solide ;
- pour $0,047 < \tau^* < 0,062$ .....	le grain est charrié sur fond plat ;
- pour $0,062 < \tau^* < 0,25$ .....	le grain est charrié par dunes ;
- pour $0,25 < \tau^* < 2,5$ .....	le grain est transporté par dunes en suspension ;
- pour $\tau^* > 2,5$ environ .....	le grain est transporté en suspension sur fond plat.

- Avec :
- $R$  = rayon hydraulique ;
  - $i$  = pente de l'écoulement ;
  - $\gamma_s$  = poids volumique spécifique des grains solides  $\gamma_s \approx 26$  à  $27 \text{ kN/m}^3$  ;
  - $\gamma_w$  = poids volumique de l'eau ( $\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$ ) ;
  - $d$  = diamètre du grain.

# Conclusion

- **La poursuite de l'incision du chenal principal**
- **L'impact des seuils artificiels sur l'évolution topographique du chenal principal**
- **La compréhension des processus hydrologiques et sédimentaires comme clé pour mieux guider les travaux de restauration**
- **Des résultats de travaux de recherche au service des gestionnaires de l'Etat impliqués dans les enjeux de lutte contre les risques hydrologiques**
- **Nécessité de poursuivre ces collaborations scientifiques-gestionnaires : mise en place de protocoles de suivi et d'expérimentation**
- **Aider à de nouvelles interventions de restauration d'une dynamique hydro-sédimentaire en Loire moyenne**



**MERCI**

