



Ministère de l'Environnement

Direction de l'Environnement - Centre

Service de Bassin Loire-Bretagne

---

# ETUDES HYDRAULIQUES D'ÉVALUATION DES TRAVAUX DANS LE LIT DE LA LOIRE

Ousson/Loire - Châtillon/Loire

Le Bec d'Allier - Marseille-lès-Aubigny

=====  
Hydrologie et morphologie comparées des sites  
=====

## SOMMAIRE

---

<b>1. Caractères généraux</b>	<b>1</b>
1.1. Bassins versants et débits	1
1.2. Le matériau alluvial	4
1.3. Pentes de la Loire	8
1.4. Analyse du transport des sédiments	9
1.5. Bilan de transport par charriage	12
<b>2. Morphologie comparée des sites d'étude</b>	<b>15</b>
2.1. Evolution des niveaux de la Loire sur les sites d'étude	15
2.2. Evolution des lits en plan	22
2.3. Conclusions	26

## SOMMAIRE

---

<b>1. Caractères généraux</b>	<b>1</b>
1.1. Bassins versants et débits	1
1.2. Le matériau alluvial	4
1.3. Pentes de la Loire	8
1.4. Analyse du transport des sédiments	9
1.5. Bilan de transport par charriage	12
<b>2. Morphologie comparée des sites d'étude</b>	<b>15</b>
2.1. Evolution des niveaux de la Loire sur les sites d'étude	15
2.2. Evolution des lits en plan	22
2.3. Conclusions	26

## - 1 -

### Caractères généraux

---

Nous nous proposons de dresser un bilan des connaissances générales sur l'hydrologie et la morphologie de la Loire qui permette d'introduire les problèmes particuliers qui font l'objet de la présente étude.

Nous rappellerons donc tout d'abord les données de débits intéressant l'étude, puis nous décrirons de manière très générale la morphologie de la Loire et son évolution autour et dans les zones à étudier, en nous arrêtant sur les paramètres les plus importants de la morphologie : la granulométrie et la pente.

Pour cette description, nous utiliserons les données de l'excellent ouvrage de Y. Babonaux - "Le lit de la Loire - Etude d'hydrodynamique fluviale" (1970) - et aurons aussi recours à une précédente étude de la SOGREAH, "La Loire et l'Allier en Bourgogne" (1983).

#### 1.1. Bassins versants et débits

Le tableau ci après rappelle les données hydrologiques principales qui nous ont été communiquées par la DIREN CENTRE aux quatre stations qui intéressent la présente étude, Nevers , le Guétin, Cours les Barres-Givry et Gien.

Il précise la superficie des bassins versants, le module ou débit moyen annuel et les données de la courbe des débits classés utiles pour le calcul des bilans de transport solide.

Le graphique qui suit représente la courbe des débits classés aux quatre stations et montre bien :

- La similitude des contributions de la Loire et de l'Allier au régime de la Loire en aval du Bec d'Allier, les étiages de l'Allier semblant un peu plus soutenus, tandis que l'apport de la Loire est plus important en hautes eaux.
- Le très faible écart entre les courbes de la Loire à Givry (Cours les Barres) et Gien, la différence de durée dans les échantillons pouvant expliquer le léger avantage aux débits mesurés à Givry.

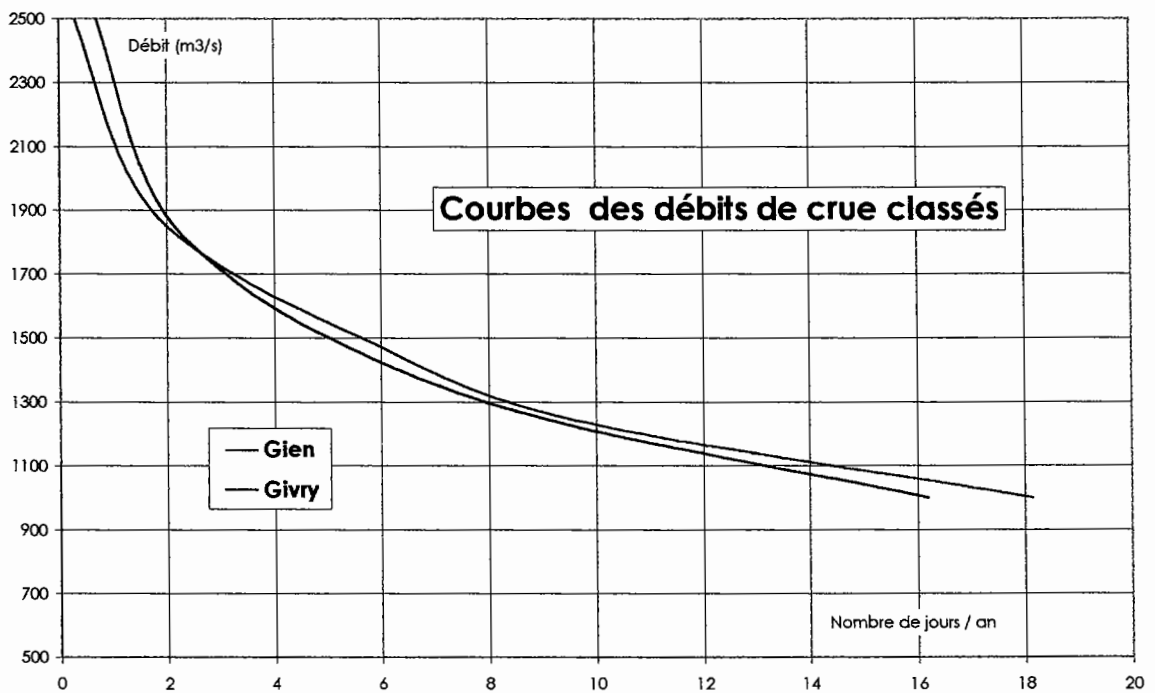
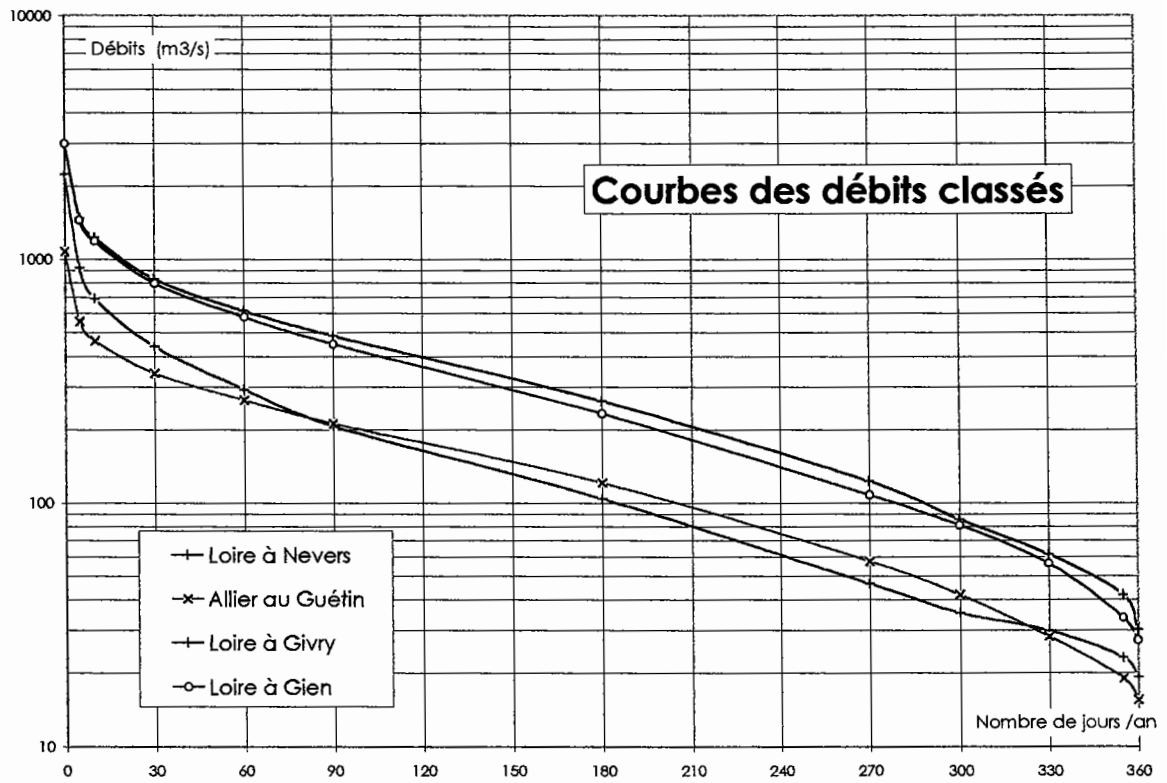
Rivière		Loire	Allier	Loire	Loire
Lieu dit		Nevers	Guétin	Givry	Gien
Surface bassin (km <sup>2</sup> )		17570	14310	32610	35500
Module	m <sup>3</sup> /s	189	152	353	333
Module spécifique	lit/sec/km <sup>2</sup>	10,8	10,6	10,8	9,4
Durée  de dépassement  (Jours par an)	360	19,3	15,5	30,1	27,3
	330	29,9	28,3	61,5	56,5
	300	35,4	42	85,5	81
	270	46,5	57,5	123	108
	180	104	121	262	233
	90	207	212	486	450
	60	292	264	615	580
	30	439	340	830	800
	10	690	463	1230	1190
5	920	555	1480	1450	

Pour préciser la courbe des débits classés dans ses valeurs hautes, nous avons retraité la série des débits journaliers à Gien sur une période de 60 ans de 1936 à 1995. Le tableau de ces débits est donné ci dessous.

Débit (m <sup>3</sup> /s)	NB de jours dépassés Gien	NB de jours dépassés Givry
2500	0.30	0.71
2000	1.33	1.62
1750	2.78	2.75
1500	5.65	5.04
1250	9.42	8.96
1000	18.13	16.2

Les figures ci dessous correspondent aux tableaux qui précèdent et donnent :

- Les courbes de débits classés par la DIREN pour les quatre stations.
- Le détail de ces mêmes courbes pour les hautes eaux aux stations de Cours les Barres - Givry et Gien.



## 1.2. Le matériau alluvial

Trois sources permettent d'apprécier la granulométrie des matériaux :

- L'étude d'Y. Babonaux.
- Les prélèvements effectués par le BRGM.
- Les prélèvements effectués dans le cadre de la présente étude.

### 1.2.1. Etude de Y. Babonaux

Concernant l'ensemble du cours de la Loire, elle fournit les résultats d'un ensemble remarquable de mesures de la granulométrie des matériaux alluvionnaires du fleuve.

Il est intéressant de déborder largement de la zone d'étude : le tableau ci après donne la valeur des diamètres moyens des matériaux de Roanne à Gien.

Pour tenir compte des variations de la section transversale, Y. Babonaux a, à chaque station, localisé trois points de prélèvement :

- Le chenal, ou lit mineur, à une profondeur de 1 à 2 mètres sous l'étiage.
- Les grèves, à 1 mètre au dessus de l'étiage.
- Les buttes colonisées sur grève, à 2 mètres au dessus de l'étiage.

De ces données, nous avons extrait le paramètre diamètre moyen, qui caractérise bien le matériau et s'écrit :

$$d_m = \frac{\sum d \Delta P}{P}$$

**d = diamètre de l'élément de poids  $\Delta P$  (mm)**

**P = poids de l'échantillon**

Station	Localisation		
	Chenal	Grève	Butte
Roanne	44	2.7	0.64
Saint Aubin	55	2.9	0.69
Nevers	20	2.2	0.52
Cosne	8.2	2.1	0.59
Gien	4.2	2.0	0.52

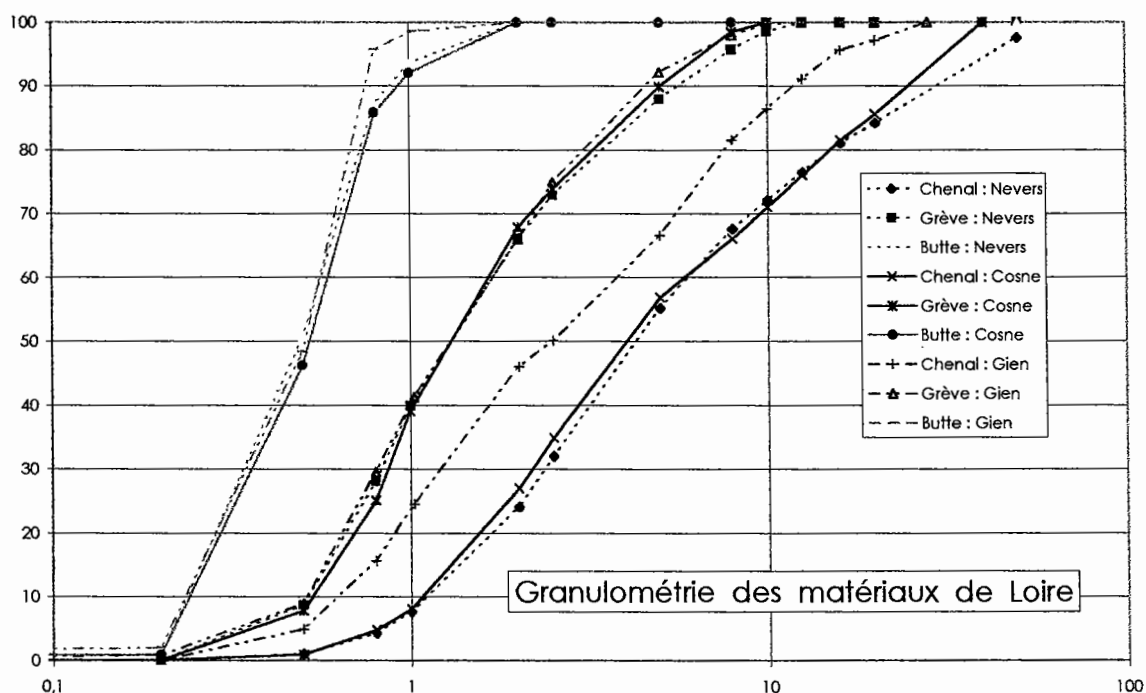
Sur le graphique ci après, nous avons figuré les courbes granulométriques pour les trois stations de Nevers, Cosne et Gien et les trois points de prélèvement à chaque station. Les courbes ci dessous et le tableau des diamètres moyens qui précède confirment l'extrême régularité de la granulométrie des matériaux de butte et des matériaux de grève.

Cette régularité n'est pas surprenante en ce qui concerne les matériaux de butte : facilement transités par la Loire, les sables de butte vont se retrouver en proportion quasi constante sur la Loire moyenne, au moins jusqu'aux gros affluents aval, Cher, Vienne, Maine.

Les matériaux de grève sont sur la Loire moyenne ceux qui déterminent le modelé transversal de la section du fleuve. Leur constance aura pour conséquence une grande régularité des caractères de la morphologie naturelle.

Nous chercherons donc plus loin à préciser dans le contexte de la Loire les modes de transport de l'un et l'autre matériaux.

Il faut dès maintenant souligner la quasi absence des silts, limons et argiles dans la composition des buttes : l'absence de cohésion est le facteur essentiel de l'érodabilité des berges et elle facilite l'ouverture et le maintien des chenaux de la Loire.



### 1.2.2. Données du B.R.G.M.

Nous extrayons ces données, qui concernent le diamètre moyen des matériaux du chenal, de l'étude SOGREAH (1983) déjà citée.

Loire de Marcigny à Diou	18 mm
Loire de Diou à Decize	14 mm
Allier du Veudre au Bec	7 mm (environ)
Loire à l'aval du Bec	< 8 mm

Le diamètre moyen de chenal ou lit mineur est différent de celui obtenu par Y. Babonaux. Il semble que les différences puissent être attribuées au mode de prélèvement. Alors que Y. Babonaux a effectué des prélèvements superficiels, le BRGM a procédé par sondages.

Les matériaux du lit mineur subissent un fort tri granulométrique à chaque décrue : de ce fait le diamètre des matériaux de surface est nettement plus grand que le diamètre moyen d'un échantillon prélevé dans la masse.

Mais aussi la granulométrie des matériaux du lit mineur varie énormément suivant l'implantation, seuil ou mouille du prélèvement.



Enfin, il semble bien que les matériaux du chenal constituent en plusieurs points des seuils difficilement mobiles, soit rocheux, comme l'envisage J.J.Peters, soit constitués de galets grossiers mis en place à un âge géologique antérieur : ce sera le cas du seuil d'Ousson.

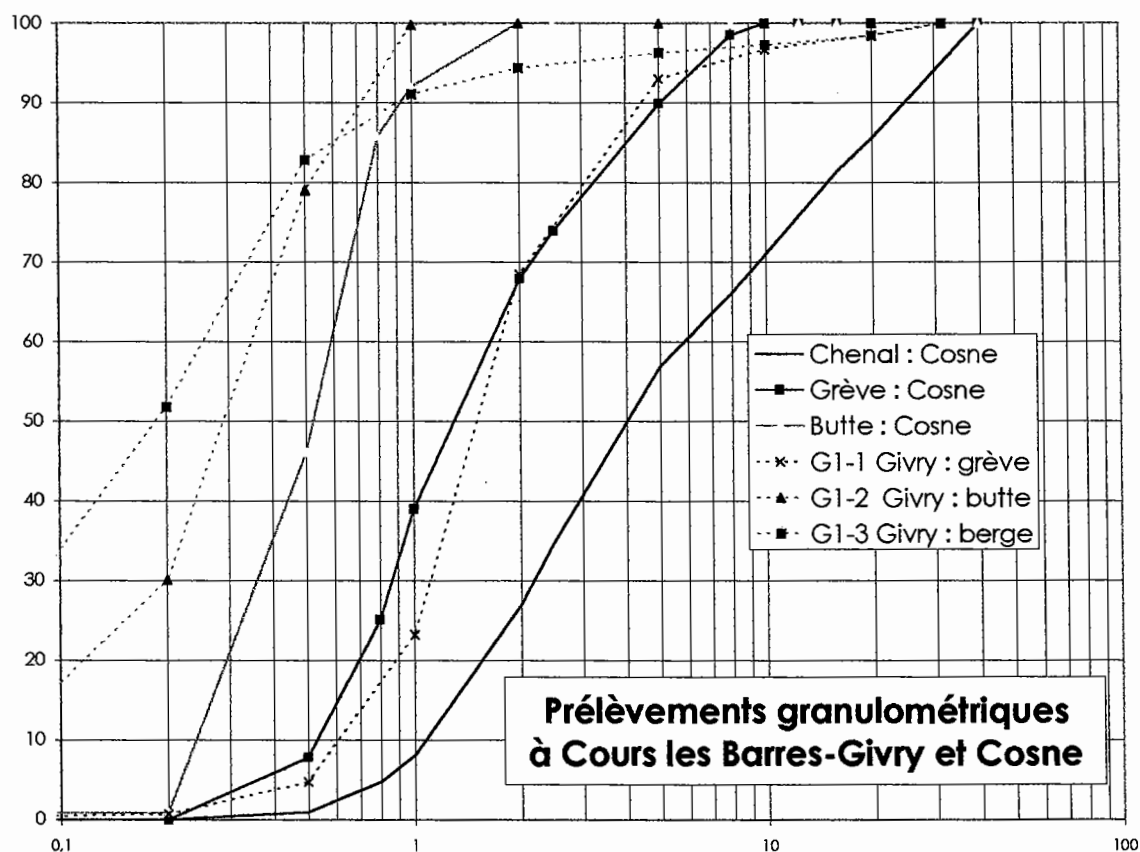
### 1.2.3. Prélèvements effectués dans le cadre de la présente étude

Deux séries de prélèvements ont été effectuées dans le cadre de la présente étude en deux points, sur les sites de chaque étude particulière, en différenciant à chaque point trois échantillons :

- En "bordure" du fleuve,
- Sur une zone "intermédiaire",
- Sur la terrasse alluviale "ancienne".

#### ■ A Cours les Barres, dans le bras rive gauche en aval de Givry

Le graphique ci dessous compare les trois échantillons aux valeurs obtenues à Cosne par Y. Babonaux.



On remarque que l'échantillon de "terrasse" et l'échantillon "intermédiaire" sont tous deux plus fins que l'échantillon de "butte" de Y. Babonaux. Ces matériaux comportent une forte proportion de silts et limons.

Le matériau de "bordure" a une composition comparable à l'échantillon de "grève" de Y. Babonaux. Il nous semble donc que ce matériau est représentatif de la granulométrie des "grèves".

■ **A Ousson, le long de la chevette des Mantelots**

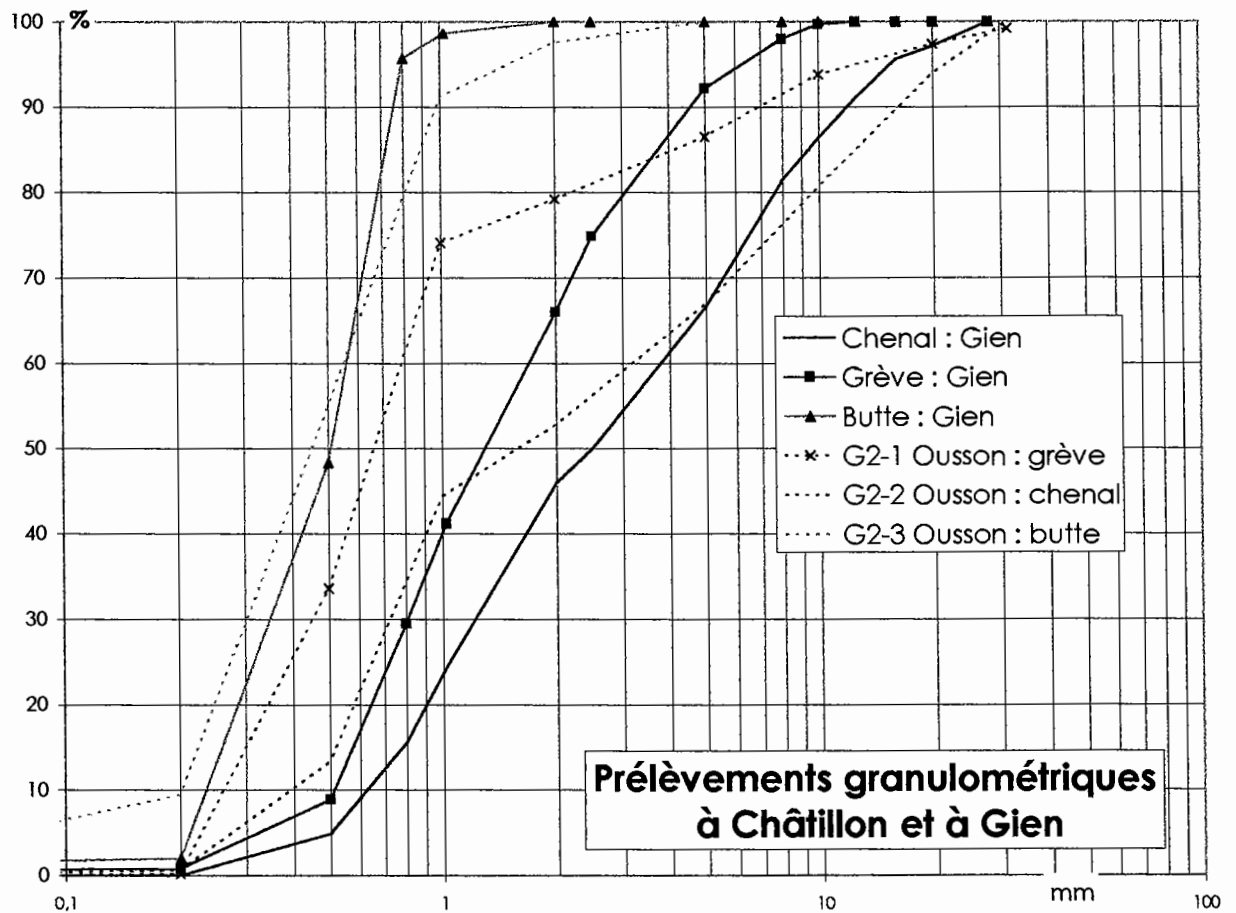
L'échantillon le plus fin est ici bien représentatif du matériau de "butte" prélevé sur la Loire en tous points.

L'échantillon le plus grossier est, dans ses valeurs hautes, comparable à l'échantillon grossier de Gien : nous avons remarqué ce site, qui nous était apparu très caractéristique d'un lit pavé. La présence d'éléments un peu plus fins s'explique par la différence entre le prélèvement de surface de Y. Babonaux et le prélèvement en masse, quoique peu profond, effectué dans le cadre de notre étude.

La granulométrie "intermédiaire" ne ressemble à rien, ce qui est explicable par l'absence de grève sur ce site.

Nous concluons que les résultats des prélèvements complémentaires effectués sur les sites ne sont pas en contradiction avec les résultats d'autres données.

Mais nous observerons l'importance du choix du site par l'opérateur, ce qui est une constatation tout à fait générale, quoique préjudiciable à la qualité des études morphologiques.



### 1.3. Pentes de la Loire

C'est l'addition des débits liquides et solides de la Loire et de l'Allier qui a déterminé les pentes naturelles de la Loire en aval du Bec : l'incidence des affleurements rocheux est en effet secondaire, le transport ayant peu à peu effacé les singularités provoquées par ces seuils.

En amont du Bec, la pente de la Loire est faible par comparaison avec la pente de l'Allier :

- 0.465 /1000 sur 60 km sur la Loire de Gannay au confluent.
- 0.652 /1000 sur 57 km sur l'Allier de Moulins au confluent.

Si les apports liquides de la Loire sont supérieurs à ceux de l'Allier, il est probable que le débit solide de l'Allier est plus important que celui de la Loire. C'est l'Allier qui est le facteur essentiel du développement d'un lit à chenaux multiples en raison de l'importance de son apport solide.

En aval du Bec d'Allier, la pente de la Loire évolue peu jusqu'à Gien. Le tableau suivant donne les valeurs de cette pente par grands tronçons de façon à éliminer le plus possible l'incidence des variations de la pente à l'étiage.

Station	P.K.	Etiage NGF	Pente x 1000
<b>Bec d'Allier</b>	537.30	166.83	0.455
<b>Beffes</b>	519.20	158.59	0.434
<b>Pouilly</b>	495.80	148.44	0.481
<b>Cosne</b>	476.80	139.29	0.441
<b>Neuvy</b>	461.90	132.71	0.497
<b>Châtillon</b>	450.40	126.99	0.447
<b>Gien</b>	436.20	120.64	0.429
<b>Saint Benoît</b>	403.00	106.40	

La pente moyenne est de 0.45 /1000 : les variations de pente sont dues sans doute à l'évolution naturelle provenant de l'usure et du tri granulométrique des matériaux, mais cette tendance est faible et complètement masquée par les fluctuations dues à l'alternance seuils - mouilles et à l'extraction des granulats de 1950 à 1990.

Sur la Loire et l'Allier, les plus forts prélèvements de granulats ont été effectués :

- Sur la Loire amont entre Decize et le Bec d'Allier,
- En aval immédiat du Bec d'Allier,
- Entre Pouilly et Saint Satur.

## 1.4. Analyse théorique du transport des sédiments

Reprenant la classification de Y. Babonaux, nous essaierons de déterminer les modes de transport des échantillons constitutifs des buttes, des grèves et des chenaux.

Pour cela, nous analyserons ci après les critères de transport en suspension, puis les possibilités de transport par charriage

### 1.4.1. Potentialités de transport en suspension

Nous utiliserons le critère de Schmidt Rouse pour déterminer les possibilités de transport en suspension des sables de Loire déposés sur les buttes.

Nous connaissons la courbe granulométrique, dont la constance a été soulignée plus haut ; es paramètres caractéristiques sont donnés ci après.

Classe	d <sub>30</sub>	d <sub>m</sub>	d <sub>90</sub>
Dimension (mm)	0.35	0.60	0.90

Nous calculons la vitesse de chute **W** des grains pour chaque diamètre avec la relation que nous avons paramétrée :

$$\frac{W}{\sqrt{g(S-1)d}} = 1.837 [1 - e^{-(d^*/10.33)}]^{3/2}$$

où :

**S** = densité du matériau

**d** = diamètre du grain

**d\*** = diamètre sédimentologique =  $d \left[ \frac{g(S-1)}{v^2} \right]^{1/3}$

**v** = viscosité cinématique

Pour une densité normale de **2.65** et à la température moyenne de **10°C**, nous aurons les vitesses de chute ci après :

Classe	d <sub>30</sub>	d <sub>m</sub>	d <sub>90</sub>
Dimension (mm)	0.35	0.60	0.90
Vitesse de chute (mm/s)	3.9	8.4	13.3

La formulation de Schmidt Rouse rend compte de la variation de la concentration du sédiment dans la veine liquide. Elle exprime le rapport entre la concentration de sédiment **C(y)** à une hauteur quelconque **y** au dessus du fond et la concentration dite de référence **C(a)** à une hauteur **a** proche du fond. Elle permet donc d'apprécier de manière semi-qualitative l'importance du transport en suspension.

Soit les paramètres :

**h = profondeur d'eau**

**Z = nombre de Schmidt-Rouse =  $\frac{W}{0.4 U^*}$**

**W = vitesse de chute**

**U\* = vitesse de frottement =  $\sqrt{g h l}$**

**l = pente**

La formule de Schmidt Rouse s'écrit :

$$\frac{C_{(y)}}{C_{(a)}} = \left[ \frac{h-y}{a} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^Z$$

Le calcul est effectué pour le diamètre **d30** et le diamètre moyen **dm** en supposant que :  
**a = 0.10 m**

**d30 = 0.35 mm**

**Rapport  $\frac{C_{(y)}}{C_{(a)}}$**

Profondeur (m) Hauteur y (m)	1	2	4	6
0.20	0.301	0.458	0.588	0.651
0.40	0.071	0.196	0.338	0.420
0.60	0.021	0.112	0.240	0.321
1.00	-	0.046	0.150	0.225

**dm = 0.60 mm**

**Rapport  $\frac{C_{(y)}}{C_{(a)}}$**

Profondeur (m) Hauteur y (m)	1	2	4	6
0.20	0.078	0.189	0.322	0.401
0.40	0.004	0.031	0.099	0.157
0.60	0.000	0.009	0.048	0.089
1.00	-	0.001	0.018	0.042

De ces deux tableaux, nous déduisons que le sable des "buttes" de Loire est en majeure partie transporté par charriage ou saltation sur le fond.

Néanmoins, une partie non négligeable des éléments les plus fins est transportée dans les tranches inférieures de la verticale pour les fortes profondeurs d'eau, c'est à dire lors des fortes crues.

#### 1.4.2. Critère de charriage : détermination du frottement adimensionnel

Le frottement adimensionnel  $\theta$  est égal à :

$$\theta = \frac{h l}{(S - 1) d_m}$$

**h** = profondeur d'eau  
**l** = pente de la ligne d'eau  
**S** = densité du matériau  
**d<sub>m</sub>** = diamètre moyen

Pour estimer le régime de transport solide, on le comparera au frottement adimensionnel critique, égal à 0.047 dans la formulation de Meyer Peter.

Une correction sera effectuée en considérant, comme le fait Meyer Peter, le frottement adimensionnel réduit, pour tenir compte de la rugosité de forme :

$$\theta = \left( \frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \frac{h l}{(S - 1) d_m}$$

**k<sub>s</sub>** = coefficient de Strickler du lit = 40

**k<sub>r</sub>** = coefficient de rugosité du grain =  $\frac{21.1}{\sqrt[4]{d_m}}$

Le coefficient de rugosité du lit adopté est celui obtenu lors du réglage des modèles numériques.

Ce calcul est effectué pour la pente moyenne de Loire et pour trois diamètres moyens de matériaux respectivement caractéristiques du "chenal", des "grèves" et des "buttes". On a ajouté à ces diamètres le **d<sub>90</sub>** moyen des courbes de Babonaux, égal au **d<sub>90</sub>** mesuré à la chevette des Mantelots.

Profondeur (m) Diamètre moyen (mm)	$\left( \frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2}$	1	2	4	6
0.6	0.408	0.185	0.370	0.740	1.11
2.1	0.559	0.073	0.145	0.290	0.435
6.0	0.726	0.033	0.066	0.132	0.198
18.0	0.956	0.014	0.028	0.056	0.084

Ce calcul est indicatif, car il n'est effectué que pour la pente moyenne de la Loire supposée uniforme. On voit néanmoins que le sable de Loire est transporté à tout débit dès lors que l'écoulement s'effectue suivant la pente moyenne.

Le début de transport pour les plus gros matériaux de grève se situe autour d'une hauteur de 1.50 m, mais pour une hauteur de 0.70 m seulement pour le diamètre moyen.

C'est ce même seuil que l'on retrouve pour les matériaux moyens du chenal, mais le début de mouvement pour les surfaces pavées du chenal ne se produit que pour une hauteur de 4 m.

## 1.5. Bilan de transport par charriage

Le bureau d'étude Hydratec a rapporté les observations faites par EDF à la centrale de Belleville, lors du remplissage de fosses d'extraction à l'amont d'un seuil. Il a cherché à recalculer les coefficients de la formule de Meyer Peter, de façon à obtenir les volumes de dépôt mesurés au cours d'une période s'étendant de 1980 à 1984.

Cinq relevés de fonds durant la période ont permis de contrôler la variation du volume déposé.

Nous référons cette analyse en utilisant pour cela la section d'écoulement rectiligne de Loire comportant un seul bras et comprise entre les Loups et Ousson : on note que la distance à Belleville est peu importante.

Il faut remarquer que nous trouvons ici à la limite du domaine d'application de la formule de Meyer Peter, tant en ce qui concerne le diamètre des éléments les plus fins, assez facilement transportés en suspension, qu'en ce qui concerne les contraintes de cisaillement : celles-ci atteignent 10 fois la contrainte de cisaillement critique, là où les expériences de Meyer Peter ne dépassent pas 5 fois cette valeur.

L'analyse comporte deux étapes :

- Calage du bilan de transport sur les données observées à Belleville.
- Bilan de transport en année moyenne.

### 1.5.1. Calage sur les données observées

Le calcul utilise le volume apparent, c'est à dire vides inclus, en admettant une densité du matériau de 2.65.

$$q_s = 19,8 \left[ \left( \frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} h l - 0,0775 d_m \right]^{3/2}$$

$q_s$  = débit solide m<sup>3</sup> / s par mètre

$d_m$  = diamètre moyen = 2.1 mm

$k_s$  = coefficient de rugosité de Strickler du lit = 40

$k_r$  = coefficient de rugosité du grain =  $\frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}}$

$l$  = pente de la ligne d'énergie =  $\frac{Q^2}{D^2}$

$D$  = débitance totale

$Q$  = débit total

Pour effectuer le calcul, nous nous sommes basés sur les lignes d'eau observées et interpolées entre les Loups et Ousson sur un profil réel à mi-distance, et avons admis à ce profil un coefficient de Strickler égal à 40, pris en compte dans le modèle TELEMAC.

Le calage a été effectué uniquement en appliquant rigoureusement la formule de Meyer Peter, sans ajustement sur un coefficient proportionnel.

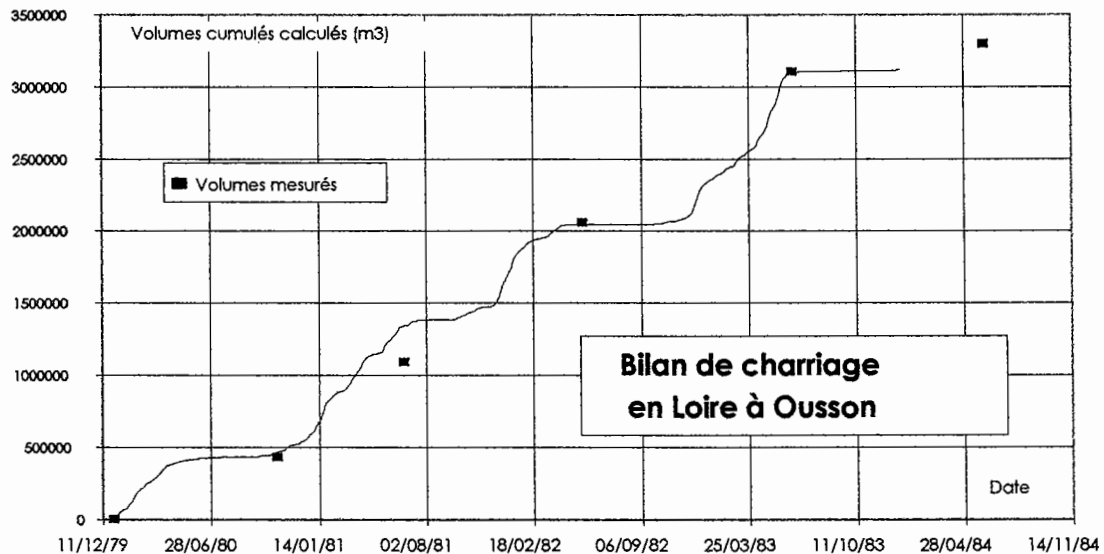
Le paramètre d'ajustement utilisé est le diamètre  $d_{90}$  et par là le coefficient de rugosité du grain  $k_r$ .

En effet, le choix de ce diamètre est relativement arbitraire, car il a été établi par Meyer Peter pour des matériaux de granulométrie étroite, très différente de la granulométrie très étendue des matériaux de Loire : c'est donc ce paramètre qui autorise la plus large variation.

Le meilleur ajustement a été obtenu en adoptant un diamètre  $d_{90} = 17$  mm, soit une valeur intermédiaire entre le  $d_{90}$  du chenal et le  $d_{90}$  des grèves.

Le graphique suivant compare les volumes cumulés du dépôt mesurés par EDF et les volumes calculés. La progression des volumes calculés au long des 4 années de mesure suit assez bien la progression des valeurs mesurées.

L'ajustement du calcul aux observations est meilleur que nous l'annonçons. Il faudrait néanmoins beaucoup plus de mesures et une critique plus approfondie des conditions de l'expérimentation pour valider la méthode de calcul.



### 1.5.2. Bilan de transport en année moyenne

En reprenant le calage effectué sur l'échantillon précédent, il est facile de paramétrer la relation débit solide - débit liquide. La courbe débit solide - débit liquide est représentée page suivante.

Le débit journalier ainsi obtenu est appliqué à la courbe des débits classés à Givry que nous avons présentée au § 1.1.

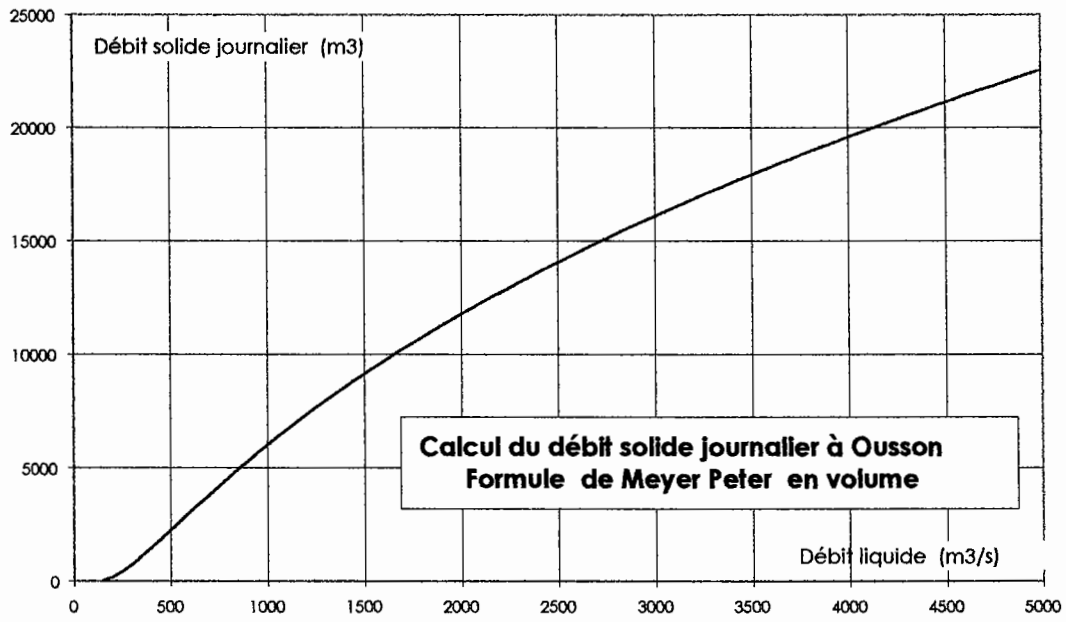
On obtient alors le débit solide  $W$  en année moyenne :

$$W = 550\,000 \text{ m}^3$$

Ce chiffre est notablement inférieur au volume annuel moyen des quatre années 1980 à 1983, ces années ayant eu un régime notablement supérieur à la moyenne.

On peut ainsi évaluer le tonnage annuel de matériaux transportés à environ 1 million de tonnes.





## - 2 -

### **Morphologie comparée des sites d'étude**

#### **2.1. Evolution des niveaux de la Loire sur les sites d'étude**

Pour analyser l'évolution des niveaux en Loire, nous disposons de levés de niveaux effectués à diverses époques et de différents débits aux stations et repères de la Loire.

Parmi ces données, le profil IGN des Forces Hydrauliques, levé en 1933, présente l'intérêt d'un levé continu à des dates pour lesquelles peut être déterminé le débit à Gien.

Les autres données datant des 20 dernières années permettent de reconstituer en de nombreux points des courbes de tarage, dont la qualité est bonne, même si on la compare à celles de stations de jaugeage suivies régulièrement.

Ces données ont été exploitées sous la forme de profils en long de la Loire localisés à la zone d'étude et d'un faisceau de courbes hauteur-débit. Ces graphiques ont été utilisés également pour le réglage des modèles : nous les reproduisons ici pour la facilité de la lecture, mais n'évoquons pas le réglage qui est traité par ailleurs.

Trois démarches ont été utilisées pour cette description quantitative :

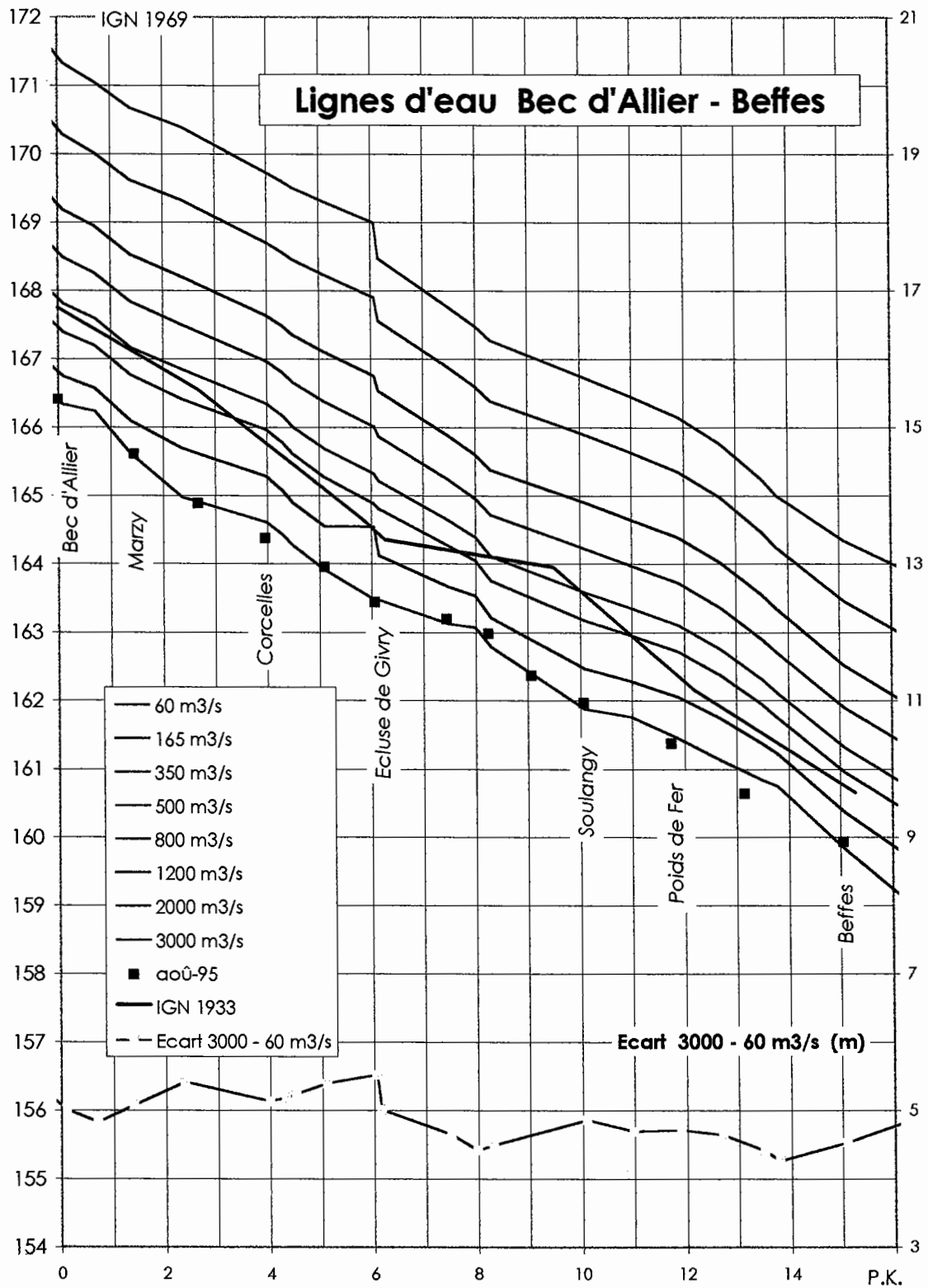
- Evolution temporelle de l'étiage de 1933 à 1995 : nous comparons ici le profil IGN à une ligne d'eau levée à 60 m<sup>3</sup>/s en Août 1995.
- Evolution spatiale de la pente des lignes d'eau dans chaque tronçon différencié de la zone d'étude.
- Variation hauteur-débit aux échelles et points repères.

##### **2.1.1. Site du Bec d'Allier à Beffes**

###### **Comparaison 1995-1933**

La ligne d'eau de 1933 a été représentée sur le graphique en "altitudes normales", comme les autres données, ce qui majore de 25 cm les chiffres relevés alors.

Le levé de 1933 a été effectué pour un débit à Gien variable de 20 à 50 m<sup>3</sup>/s, ce qui conduit à des corrections de niveau de 5 à 25 cm, non figurées sur le graphique ci après, pour comparer cette ligne d'eau à l'étiage d'août 1995.



Le tableau suivant donne l'abaissement du niveau d'étiage à 60 m<sup>3</sup>/s entre 1933 et 1995 :

Bec d'Allier	1.33 m
Corcelles	1.35
Givry	1.15
Soulangy	1.70
Poids de fer	1.25
Beffes	1.15

La valeur à Soulangy apparaît aberrante sur le profil IGN, mais l'anomalie peut être due au tracé des bras à l'époque.

Au total, on voit que le lit mineur de la Loire se serait encaissé de 1.15 à 1.35 m au cours des 60 dernières années, ce qui est considérable.

### **Evolution spatiale de la pente des lignes d'eau**

L'examen de la ligne d'eau d'étiage à 60 m<sup>3</sup>/s d'Août 1995 ne fait pas apparaître de variations significatives de la pente entre le Bec d'Allier et Marseille les Aubigny. Les seules variations constatées correspondent à l'alternance seuils-mouilles classique sur les fleuves et rivières.

Un oeil averti (par le sujet même de l'étude) décèle cependant un allongement un peu plus important de la mouille en aval de l'écluse de Givry : cet allongement est évidemment lié à la présence des chevrettes et au surcreusement des fonds qu'elles ont causé. Il semble d'ailleurs que l'allongement ait été beaucoup plus important en 1933.

Deux seuils marquent cette ligne d'étiage : le premier se situe en aval immédiat du Bec d'Allier, le second en aval des chevrettes de Givry.

A ces seuils correspond très nettement le maintien de deux bras majeurs, ce qui est facile à expliquer des deux points de vue : la présence des deux bras diminue la capacité d'érosion des seuils et permet une dénivelée accrue; le maintien des seuils facilite en retour l'alimentation et la pérennité des deux bras.

### **Variation hauteur- débit aux échelles**

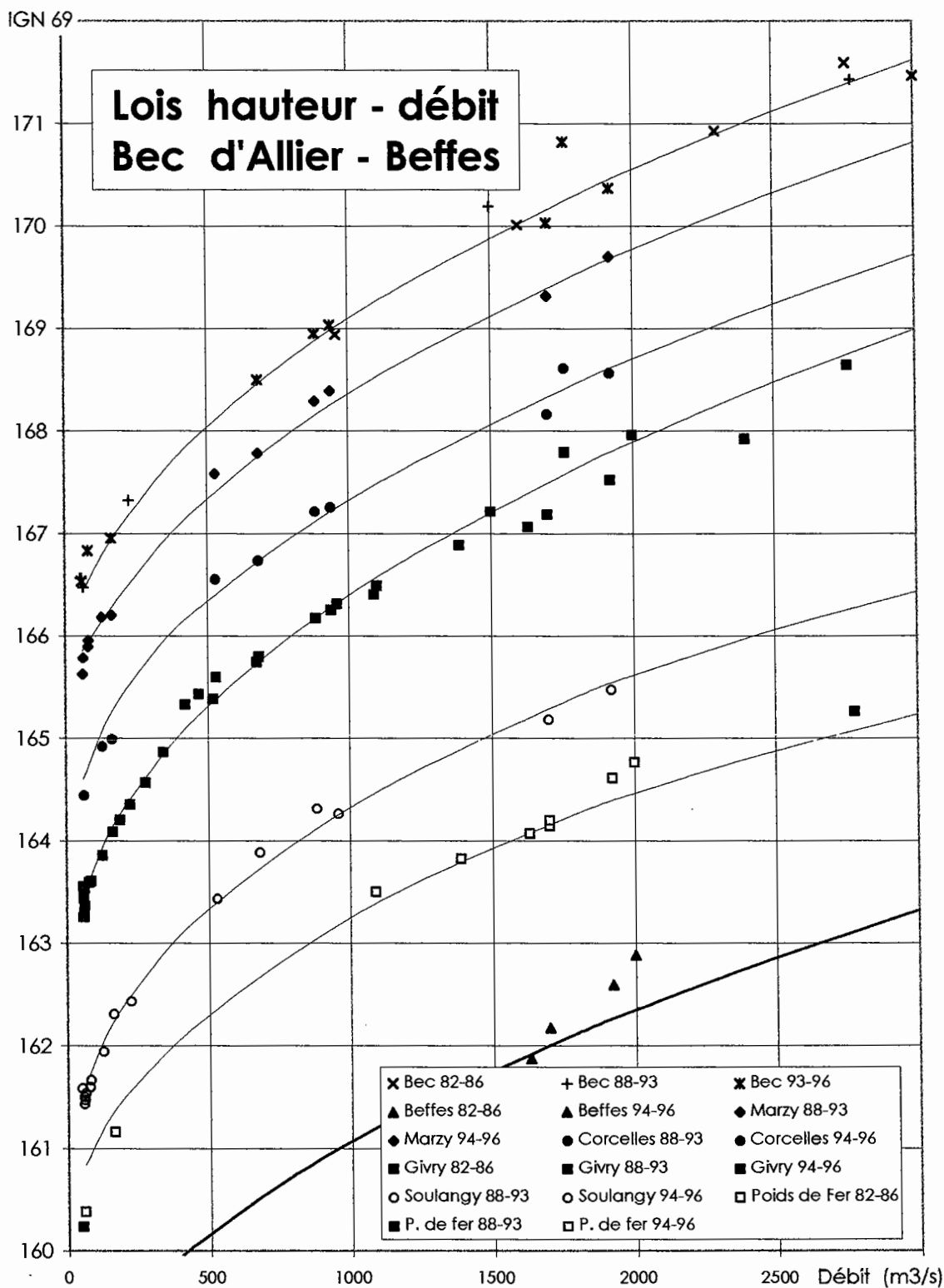
Cette variation est représentée sur le graphique de la page suivante. Nous avons donné sur ce graphique :

- Les points observés en différenciant les dates de l'observation.
- Les lignes d'eau calculées avec le programme CARIMA.

Pour donner une traduction plus explicite à ces graphiques, nous avons tracé, sur le profil en long qui précède, la variation de hauteur entre l'étiage d'Août 1995 et la ligne d'eau calculée à 3000 m<sup>3</sup>/s.

On voit que la variation de hauteur, qui est de 5 m en aval du Bec Allier augmente jusqu'à 5.50 m à Givry, diminue brutalement à 4.40 m pour se stabiliser ensuite entre 4.50 m et 4.80 m.

Ce graphique montre clairement l'effet des chevrettes de Givry-Fourchambault : abaissement de l'étiage au droit de la chevette aval et accroissement de la variation de hauteur en crue.

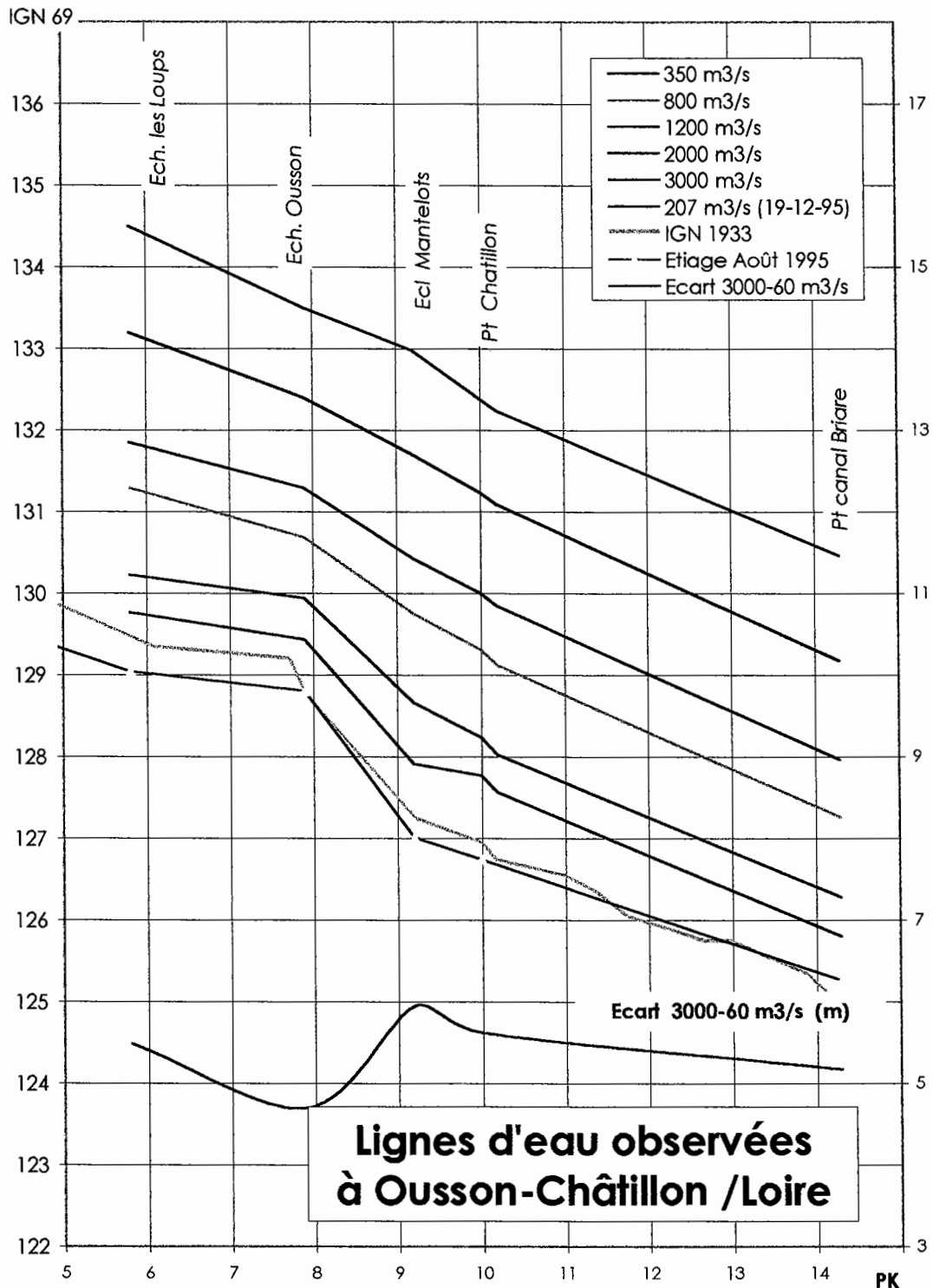


### 2.1.2. Site d'Ousson à Châtillon

Le profil en long ci dessous est établi à partir des valeurs observées.

Le levé de 1933 a été réalisé en amont du pont de Châtillon pour un débit de 32 m<sup>3</sup>/s en amont du pont. La valeur au pont-canal de Briare, levée plusieurs mois auparavant, a été corrigée pour être comparée à ce même débit.

Pour la comparaison, nous avons figuré le levé de la ligne d'eau du 8 Août 1995, déjà utilisé à Givry, qui correspond à un débit de 60 m<sup>3</sup>/s.



Bien qu'elle ait été levée à un débit inférieur, la ligne d'eau de 1933 se cale au dessus de l'étiage d'Août 1995. La correction à faire est de l'ordre de 20 cm.

En amont de la chevette d'Ousson, l'abaissement en 1995 est donc de 60 cm et correspond de toute évidence à la présence d'une brèche dans la chevette.

En aval, l'écart est seulement de 40 cm et ne peut correspondre qu'à un abaissement du lit à l'aval du pont de Châtillon.

### ***Evolution spatiale de la pente des lignes d'eau***

La zone d'Ousson - Châtillon présente un profil en long très irrégulier et variable avec le débit. Cette irrégularité est due à la présence d'un seuil d'étiage associé à la chevette d'Ousson et à l'influence des deux autres chevrettes : chevette des Mantelots et chevette de l'Escargot.

Aussi, alors que les deux chevrettes aval provoquent un approfondissement du lit mineur de la Loire de 2 à 3 mètres, l'ouverture laissée libre par la chevette d'Ousson forme un seuil de 1.50 m de chute à l'étiage. Cette chute devait en 1933 atteindre 2 mètres, la crête de la chevette étant alors plus élevée.

L'influence du seuil de la chevette d'Ousson s'atténue lorsque croît le débit, le seuil se noyant de plus en plus par l'aval.

Mais on constate que la pente augmente avec le débit entre le pont de Châtillon et l'écluse des Mantelots. Cet effet est dû au rétrécissement du lit vif au droit de la chevette aval de l'Escargot. Il apparaît que pour les crues de 2000 à 3000 m<sup>3</sup>/s, c'est la chevette de l'Escargot qui crée le plus gros obstacle à l'écoulement.

### ***Variation hauteur-débit aux échelles***

Les lois hauteur - débit aux échelles sont représentées sur le graphique page suivante. Nous donnons sur ce graphique :

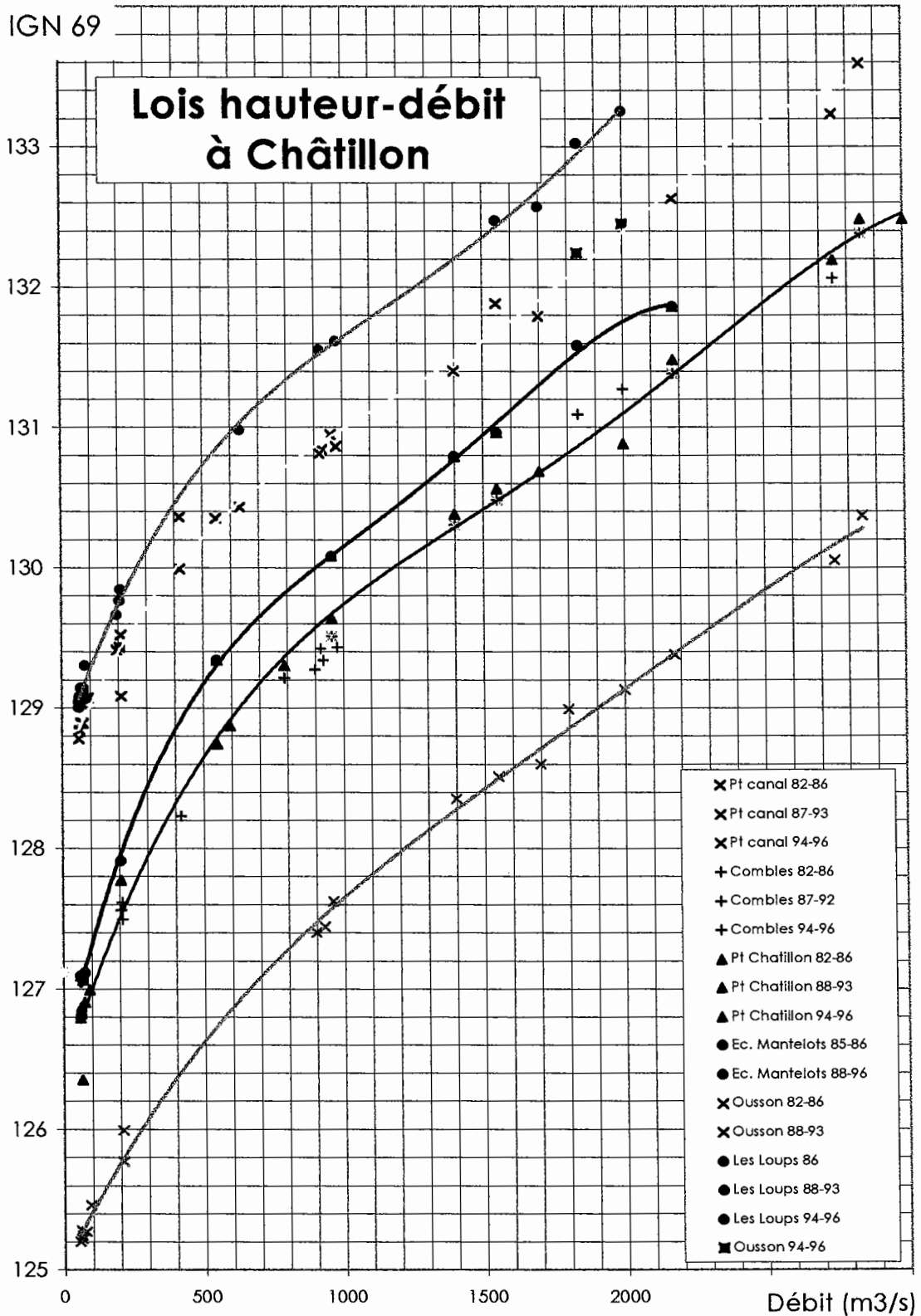
- Les points observés différenciés en fonction de la date.
- Les courbes de tarage résultantes lissées à partir des courbes de tendance.

Comme pour la section Bec d'Allier - Givry et pour donner une traduction plus explicite à ces graphiques, nous avons représenté sur le profil en long qui précède la variation de hauteur entre l'étiage d'Août 1995 et la ligne d'eau à 3000 m<sup>3</sup>/s.

La variation de hauteur est la suivante :

- 5.48 m aux Loups.
- 4.70 m au port d'Ousson.
- 5.95 m à l'écluse des Mantelots.
- 5.62 m au pont de Châtillon.
- 5.21 m au pont canal de Briare.

On retrouve l'effet des chevrettes aval déjà observé à Givry : abaissement de la ligne d'eau d'étiage par suite du rétrécissement et élévation de la ligne d'eau en crue.  
 Mais à cet effet se surajoute l'effet du seuil naturel et de la chevette d'Ousson : fort relèvement de l'étiage et écoulement noyé par l'aval avec la montée du débit.





## 2.2. Evolution des lits en plan

Pour comparer l'évolution des bras de Loire sur les deux sites d'étude, nous avons disposé de plans anciens et de quelques photos aériennes. Ces documents suffisent à décrire les caractéristiques essentielles de l'évolution.

### 2.2.1. Givry

Sur les deux planches ci après, nous avons pu établir les tracés des contours des bras en 1931, 1969 et 1993 : ces tracés correspondent certes à des débits différents, mais on peut malgré tout dégager quelques évolutions bien caractéristiques.

Contrainte de tout temps entre la digue du Bec d'Allier et le promontoire de Marzy, la Loire s'élargissait en plusieurs bras en 1931. Cette morphologie subsiste encore aujourd'hui, avec deux bras d'importance comparable. L'emprise totale est même un peu supérieure au droit des atterrissements de Presle. Mais l'emprise des îles a fortement augmenté, si bien que la largeur des chenaux et grèves a notablement diminué.

En cours d'asphyxie en 1969, le bras encore large en 1931 ceinturant à l'ouest l'île de Marzy et quelques petites îles n'est plus aujourd'hui alimenté qu'en crue importante. L'île de Marzy a "annexé" ses petites voisines pour former une forêt alluviale d'une longueur de 2 km et ne laisser à la Loire qu'un lit étroit, rectiligne et profond.

L'attaque de la Loire sur la digue des Joigneaux a favorisé le maintien en amont d'un bras secondaire encore bien alimenté lors des crues.

Rétréci par la digue des Joigneaux et par le pont de Fourchambault, l'écoulement naturel de la Loire se redresse naturellement au contact de la berge rive gauche où apparaissent en étiage des affleurements rocheux . Mais l'écoulement d'étiage est brutalement dévié vers l'écluse de Givry par la chevette de Fourchambault, ce qui provoque des bancs immergés de sable autour du pont en eaux moyennes. En 1931, aucun atterrissement n'est noté sur la carte en aval de la chevette, ce qui signifie qu'il n'y avait pas d'île et que les grèves étaient peu développées.

En 1969, apparaît l'île sur la partie terminale de la chevette face à l'écluse de Givry.  
En 1993, une deuxième rangée d'îles sépare la grève largement étendue en arrière de la chevette et le bras étroit et profond longeant la berge rive droite depuis l'aval du pont.

Derrière la chevette de Givry, le plan de 1931 ne note pas non plus d'atterrissement; il n'y avait pas eu encore de brèche dans la chevette. De 1969 à 1993, les différences entre les deux situations sont faibles : il est probable que l'engraissement s'est développé sur les atterrissements existants, mais ne s'est pas étendu.

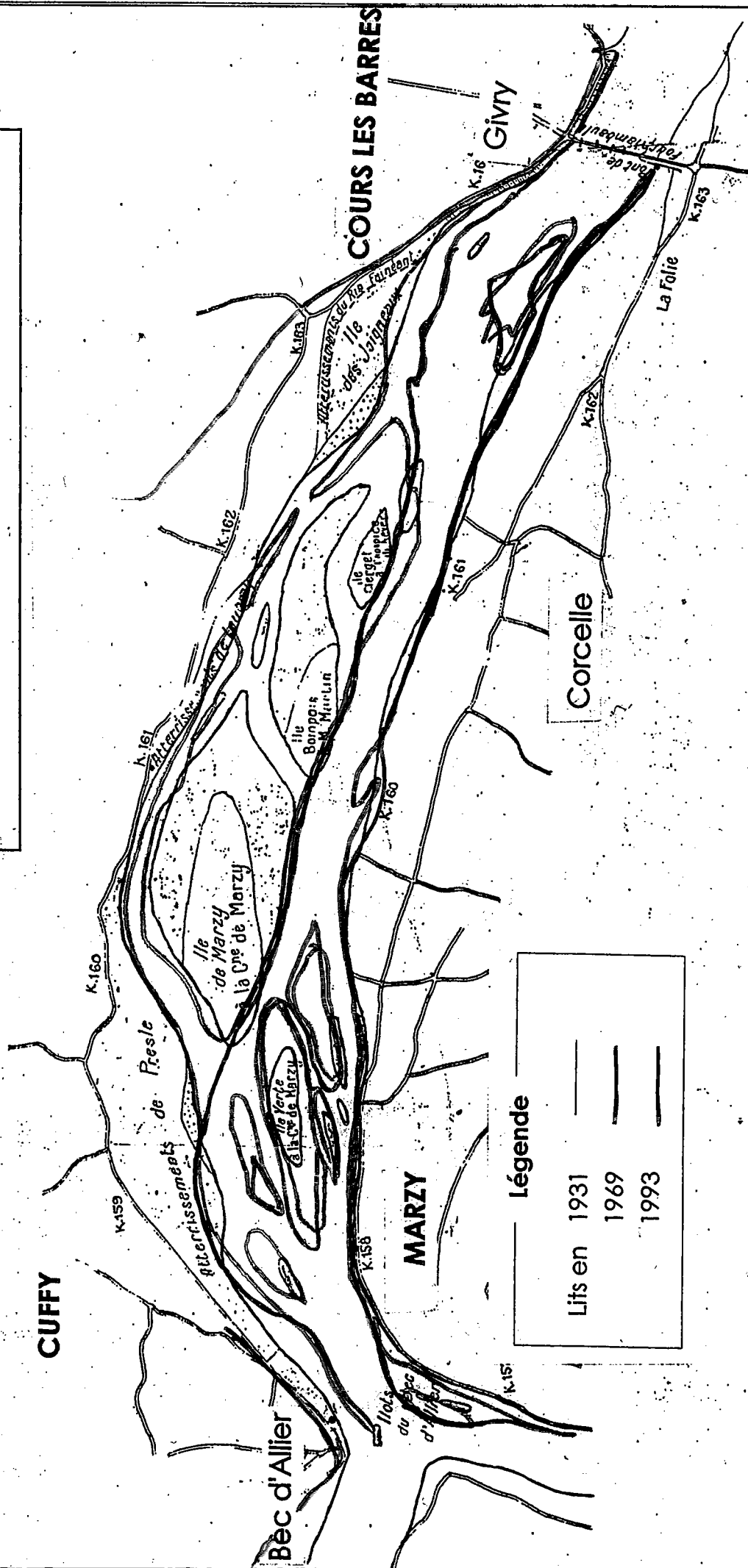
Notons le développement lent et continu de l'île de Garchizy de 1931 à 1993.

L'île de Soulangy était divisée en deux îles en 1931 et séparait deux bras d'inégale importance. Déjà fermé en 1969, le bras secondaire isolant l'île de Soulangy n'est aujourd'hui alimenté que rarement. Le niveau d'étiage dans le lit large et à chenaux multiples observé en 1931 peut expliquer la valeur très élevée du niveau d'étiage observé dans ce secteur sur le profil IGN de 1933.

# Bec d'Allier à Givry (Cours les Barres)

## Evolution en plan

Echelle : 1 / 25 000

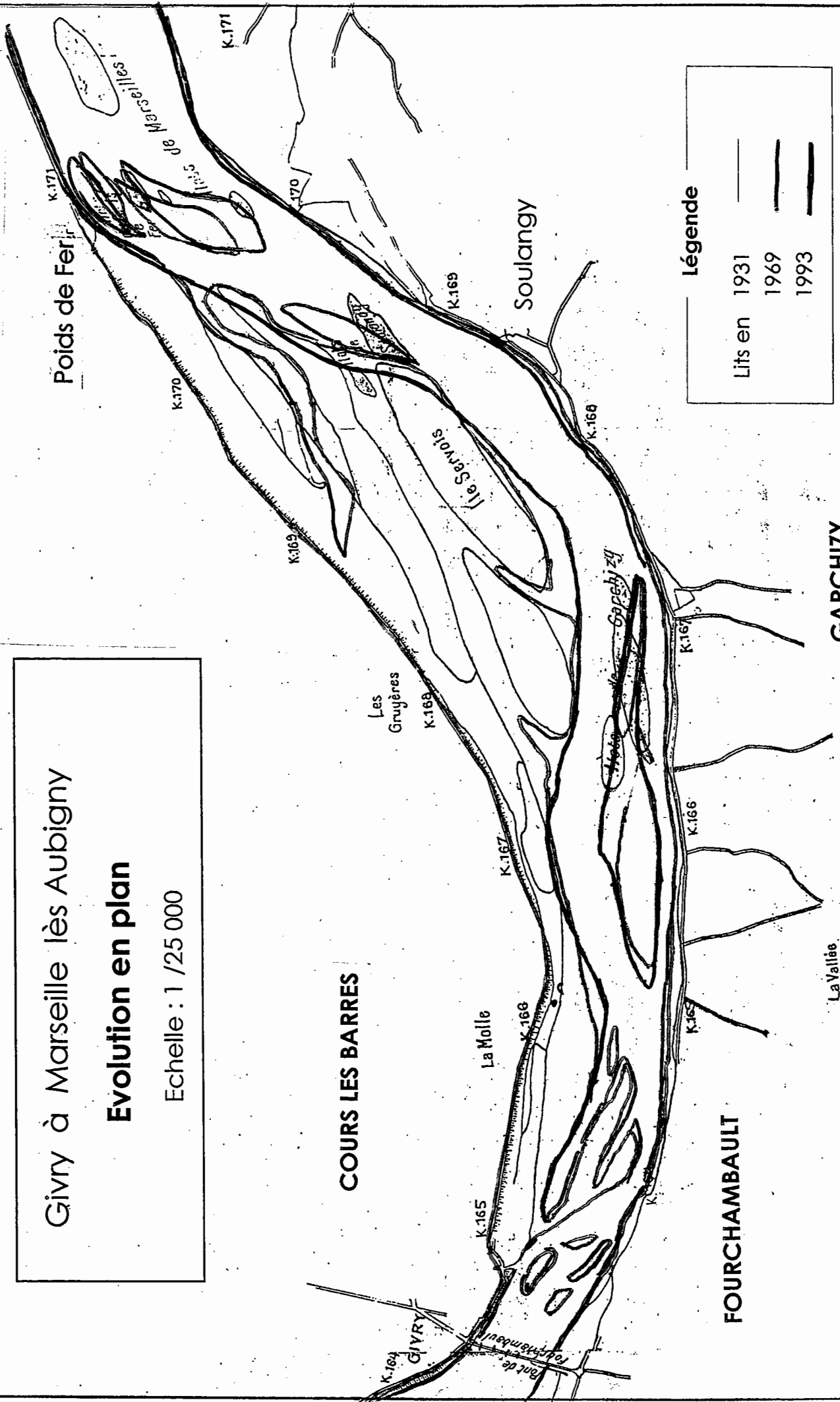


MARSEILLE lès Aubigny

Givry à Marseille lès Aubigny

Evolution en plan

Echelle : 1 / 25 000



Légende

Lits en 1931  
Lits en 1969  
Lits en 1993

COURS LES BARRES

FOURCHAMBAULT

GARCHIZY

Au total, le rétrécissement du lit dans le secteur du Bec d'Allier à Marseille lés Aubigny est important. Les bras secondaires sont morts ou atrophiés. Mais on remarque une bonne tenue des chenaux naissant à l'ancrage des chevrettes le long des rives naturelles, surtout en rive droite à Fourchambault, un peu moins en rive gauche, sans que l'on puisse dire si cette moindre tenue est due au coude amont ou à la brèche ouverte dans la chevette à proximité de son ancrage.

### 2.2.2. Ousson

Le plan de 1846 révèle déjà un lit très corseté du fait de la présence des trois chevrettes et d'un ensemble de digues limitant la largeur à moins de 400 mètres.

Ce plan ne montre que peu d'atterrissements. On note toutefois une grève en bord de Loire en rive droite à l'aval de la chevette des Mantelots, qui correspond à l'effet du coude de la Loire et qui existait probablement avant la construction des chevrettes. Cet atterrissement est maximum à 1 km seulement en amont du pont de Châtillon, mais il n'est pas observé en aval immédiat de l'ancrage de la chevette.

En revanche, un banc est dessiné en 1846 en aval de la partie médiane de la chevette; c'est là que les dépôts sont aujourd'hui les plus élevés.

La situation est complexe aujourd'hui sur la chevette des Mantelots. On distingue trois parties :

- Le tiers amont qui déverse sur un bras remblayé mais sur une faible hauteur.
- Le tiers central qui débouche sur un îlot très élevé.
- Le tiers aval, où s'est ouverte une brèche, semble-t-il par suite de l'étranglement trop accentué du Duit en aval, mais peut être aussi par suite du boisement de la chevette et du développement de l'îlot central.

La chevette de l'Escargot se caractérise par une cote relativement élevée et par une orientation par rapport aux courants incidents très favorable au maintien d'un chenal, malgré la faible fréquence de son alimentation. Aucun dépôt n'était noté en 1846 à son aval.

En revanche une île puissante et longue s'est aujourd'hui formée, à partir du deuxième tiers aval et jusqu'à peu de distance de la pile du pont de Châtillon. Sur les derniers mètres de la chevette, le déversement se maintient sur un peu moins de 100 m de longueur.

Mais on doit remarquer la présence de forts et longs atterrissements au débouché du bras de rive gauche, que nous appellerons bras de l'Escargot, dans le lit de la Loire en aval.

Ces dépôts se sont formés à partir des forts courants existants sous le pont de Châtillon lorsque le déversement sur la chevette de l'Escargot est nul ou faible : la vitesse dans le bras rive gauche ne permet pas alors la chasse de ces dépôts.

A l'inverse, les courants de fond ont un rayon de courbure inférieur au rayon de courbure moyen, leur vitesse étant inférieure à la vitesse moyenne.

Les vitesses de surface très peu déviées à l'ancrage alimentent en eau claire ou peu chargée la partie amont de la chevette.

Les courants de fond sont beaucoup plus chargés. Ils présentent une orientation centripète par rapport à la courbure moyenne et sont donc déviés vers le milieu du lit.

## 2.3. Conclusions

### 2.3.1. L'effet des extractions

En aval du Bec d'Allier, la cause majeure de l'enfoncement du lit est l'exploitation des granulats réalisée principalement de 1947 à 1985. Il faut rappeler que, sur le secteur Bec d'Allier - Soulangy, le volume de granulats était estimé en 1979 par la Commission Départementale des Carrières à 170 000 m<sup>3</sup>. En appliquant cette estimation à une largeur de 300 m et une longueur de 13 km, on obtient un enfoncement annuel de 4.4 cm. L'abaissement constaté représente donc 28 années d'exploitation, ce qui est tout à fait plausible.

Il n'en a pas fallu davantage pour permettre la mise à sec sur de longues périodes d'importantes superficies de grève, ce qui a favorisé la végétation et par là le dépôt des sables.

Il est important de noter que cet abaissement était déjà observé il y a une dizaine d'années, les mesures effectuées aux échelles et repères de 1982 à 1996 ne révélant pas de variations significatives. La situation actuelle résulte de la recherche d'un nouvel équilibre, ce qui ne veut pas dire que les paramètres déterminants de la morphologie naturelle du lit de la Loire sont ceux des siècles passés :

- Les digues de Loire créent des points de rétrécissement ponctuels ou continus. Les ponts créent des rétrécissements ponctuels.
- Les abaissements du lit vif ont permis l'élévation des bancs et leur boisement. L'état des îles de Loire est tel aujourd'hui que leur surface ne peut plus que s'exhausser et donc leur capacité d'écoulement décroître. L'abandon des prairies est évidemment une cause d'accentuation de ce phénomène.

Les prélèvements et rétentions de matériaux dans les zones anciennement extraites diminuent les apports. Le prélèvement sur le stock alluvial se fait de préférence sur la tranche la plus fine et le lit tend à se paver.

La granulométrie en place augmente de ce fait, ce qui conduit à diminuer la tendance au "tressage" ou si l'on préfère favorise la création d'un lit unique plus profond et moins large que la somme des bras antérieurs.

Il n'y a guère de remède à cette situation dans les zones où n'existe aucun ouvrage. Là, seul l'entretien de la végétation ou le maintien artificiel de certains bras peut favoriser la reprise des déplacements des lits vifs et permettre un certain rajeunissement des milieux.

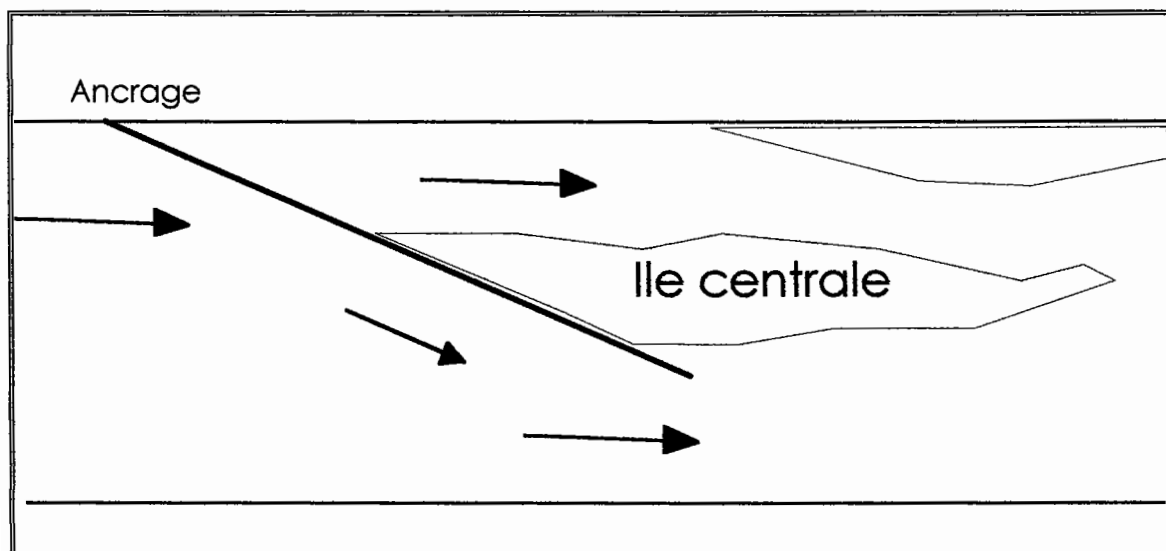
Là où existent des ouvrages, il faudra chercher à réduire les pertes de charge qu'ils occasionnent de façon à augmenter les pentes d'écoulement dans les zones influencées à l'amont. L'accroissement des pentes de l'écoulement peut ainsi accroître la mise en mouvement des matériaux et par là la mobilité des lits qui lui est associée.

### 2.3.2. Morphologie des atterrissements autour des chevrettes

L'organisation des atterrissements autour des chevrettes présente des analogies tout à fait remarquables : la compréhension des causes de ces analogies peut permettre de proposer des aménagements stables et répondant aux objectifs recherchés.

Les chevrettes provoquent des atterrissements de sédiments démesurés en regard de la perturbation somme toute assez faible apportée aux lignes d'eau.

Le schéma général est représenté ci après.



Un bras secondaire tend à se maintenir à proximité de l'ancrage, même si l'orientation générale du lit est défavorable : chevrette des Mantelots. Des dégradations ont été observées à l'amont là où la chute est forte : chevrette d'Ousson.

L'île centrale est observée partout : chevrettes de Fourchambault, de Givry, d'Ousson, des Mantelots, de l'Escargot.

Le déversement reprend en partie terminale si le rétrécissement provoqué par la chevrette est très important. Il pourra alors dégrader la partie terminale de la chevrette : chevrette des Mantelots et chevrette de l'Escargot.

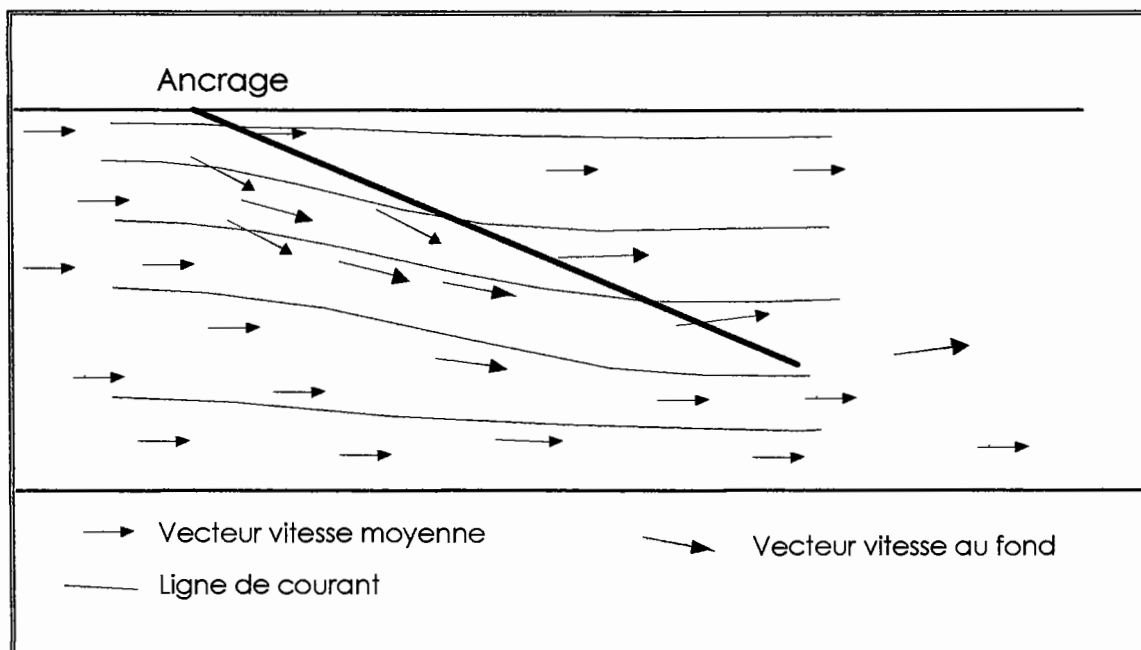
Le caractère permanent de l'île centrale mérite que l'on élucide le mécanisme de sa formation. Le croquis de la page suivante éclaire le processus.

La chevrette dévie les courants vers le goulet de sortie. Les lignes de courant sont donc déviées vers ce goulet, ce qui donne un champ des vitesses moyennes subissant sur le dessin une courbure à gauche, puis une courbure à droite avec un point d'inflexion entre les deux.

Or la courbure en plan des lignes d'eau génère un phénomène de circulation transversale : dans une courbe, les courants de surface ont un rayon de courbure supérieur au rayon de courbure moyen, leur vitesse étant supérieure à la vitesse moyenne. A l'inverse, les courants de fond ont un rayon de courbure inférieur au rayon de courbure moyen, leur vitesse étant inférieure à la vitesse moyenne.

Les vitesses de surface très peu déviées à l'ancrage alimentent en eau claire ou peu chargée la partie amont de la chevrette.

Les courants de fond sont beaucoup plus chargés. Ils présentent une orientation centripète par rapport à la courbure moyenne et sont donc déviés vers le milieu du lit.



A partir du point d'inflexion, le courant de fond va s'inverser et basculer en direction de la chevrette, la courbure des lignes de courant ayant changé de sens. La charge en sédiments des eaux franchissant la chevrette sera alors maximum. La vitesse en aval de la chevrette étant faible, on aura des dépôts concentrés dans cette partie à des niveaux élevés. L'élévation des niveaux favorisera une croissance irréversible de la végétation.

Le développement des atterrissements et la croissance végétale vont peu à peu neutraliser une partie de la longueur déversante. Le courant va se concentrer de plus en plus dans le goulet terminal où seront observées des vitesses de plus en plus fortes. La situation des chevrettes de l'Escargot à Châtillon sur Loire et de la chevrette de Givry à Cours les Barres offriront sur le modèle numérique des analogies remarquables.

La diminution des pertes de charge sur ces deux chevrettes sera alors le premier objectif de l'aménagement.

De plus les caractères morphologiques qui viennent d'être décrits devront être respectés. On devra éviter de favoriser des déversements dans les zones où l'inflexion des courants favorise les dépôts en retrait de la chevrette : le maintien de îles centrales sur les chevrettes sera donc la règle à suivre.

Mais l'alimentation des bras secondaires devra se faire au maximum avec des eaux de surface. La chevrette de Givry qui présente une brèche profonde près de son ancrage devra être exhaussée. Les chevrettes offrant une cote trop élevée ne devront pas être exagérément abaissées.