UNIVERSITÉ FRANÇOIS - RABELAIS TOURS

M2 pro Géo-hydrosystèmes et Environnement

Géo-hydrosystèmes continentaux en Europe

Option transferts

Synthèse bibliographique sur l'influence des épis de navigation sur le stockage et la rétention des sédiments au sein des rivières de taille importante

Etudiant : Guillaume DENIS	**Session :** 2006 - 2007
Tuteur de recherche : Stéphane Rodrigues	Projet personnel / Mars 2007

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Stéphane Rodrigues pour l'ensemble des conseils qu'il a pu me dispenser afin de réaliser ce projet, ainsi que pour m'avoir fourni les pistes nécessaires à l'obtention d'une bibliographie intéressante.

Je tiens également à remercier la personne ayant rédigé le document d'aide à la rédaction de ce mémoire, pour les nombreuses recommandations d'ordre rédactionnel.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 2

SOMMAIRE 3

RESUME 4

ABSTRACT 4

LISTE DES FIGURES 5

INTRODUCTION 6

1 - LES GRANDS COURS D'EAU, LEURS AMENAGEMENTS ET LES SEDIMENTS QU'ILS TRANSPORTENT 7

2 - L'INFLUENCE DES EPIS DE NAVIGATION SUR LES PROCESSUS SEDIMENTAIRES 12

CONCLUSION 22

BIBLIOGRAPHIE ET OUVRAGES CONSULTES 23

TABLE DES MATIERES 25

RESUME

Les épis de navigation ont été créés pour améliorer la navigabilité des grands fleuves. Ils permettaient, par l'accélération du courant du au rétrécissement de la section d'écoulement d'évacuer plus de sédiments et ainsi garantir une bonne profondeur de chenal pour la circulation des bateaux.

Cependant on peut constater sur l'ensemble des grands fleuves ou de telles mesures on été prises l'enfoncement général du lit des cours d'eau. Ce qui pose des problèmes de stabilité des berges, d'ouvrages, ainsi que la déconnection de bras secondaires.

Les phénomènes de rétention de sédiments au sein des champs d'épis sont désormais problématiques et les épis représentent actuellement une problématique importante dans la gestion des cours d'eau de grande taille.

Mots clés

Epis de navigation, fleuves, sédiments, creusement du lit, morphologie sédimentaire, champs d'épis, gestion de cours d'eau

ABSTRACT

Groynes have been created in order to improve the quality of navigation in the rivers. However the groynes cause problems of digging of the channels. This digging is dangerous for the banks of the rivers and the structures along the river. Phenomenons of capture of sediments in groynes are now problems that are most important in rivers management.

Key Words

Groynes, rivers, sediments, channel digging, morphology, river management

LISTE DES FIGURES

Figure n° 1 : Photo d'un épi transversal en pierre 8

Figure n°2 : Graphique de Hjulstrom vitesse de sédimentation / granulométrie 9

Figure n°3 : Différents modes de transport des sédiments (F. Boulvain) 10

Figure n°4 : Charge de sédiments transportés selon le débit (Webb & Walling 1982).....11

Figure n°5 : Différences entre charriage naturel et actuel (EPTB Rhône).....12

Figure n°6 : Différences entre transport en suspension naturel et actuel (EPTB Rhône) 13

Figure n°7 : Répartition des vitesses découlement au passage d'une échancrure (Byron 2005).....15

Figure n°8 : Représentation des turbulences autour d'une échancrure (Byron 2005) 16

Figure n°9 : Zones de dépôt/érosion au passage de l'échancrure (Byron 2005).....17

Figure n°10 : Cellules d'écoulement dans le champ d'épis (Yossef 2006).....18

Figure n°11 : Photo infrarouge d'un banc d'épis (Ten Brinke 2004).....19

Figure n° 12 : modélisation des champs de vitesses dans le voisinage d'un champ d'épis (Kadota 2006).....20

INTRODUCTION

Dans le contexte de gestion actuel de gestion des grands cours d'eau en Europe et dans le monde, de nombreuses questions se posent quant aux bénéfices tirés des aménagements historiquement réalisés au sein de ces cours d'eau.

Les cours d'eau comme la Loire, le Rhin ou encore la Waal ou le Danube sont aujourd'hui dans certaines zones fortement anthropisés, et des phénomènes d'incision du lit, de rétention de sédiments dans certaines zones de ces fleuves, représentent des problèmes, et sont actuellement reliés aux impacts des aménagements fluviaux comme les épis de navigation.

Cette synthèse bibliographique va présenter l'état d'avancement présent des recherches dans ce domaine, en présentant tout d'abord la nécessité à l'origine de ses aménagements, leur caractéristiques principales, et ensuite leur influence sur le cours d'eau, au niveau des flux liquides et des flux solides transitant dans le cours d'eau.

1 - LES GRANDS COURS D'EAU, LEURS AMENAGEMENTS ET LES SEDIMENTS QU'ILS TRANSPORTENT

1.1 - Les aménagements des cours d'eau de grande taille

Historiquement, les grands cours d'eau ont toujours représentés des axes stratégiques et commerciaux importants pour les pays. En France la Loire était massivement employée pour la navigation, principalement marchande. La communauté des marchand de la Loire a été crée par l'état afin d'organiser la gestion des différents usages fluviaux et prévoir des aménagements pour une meilleure navigabilité. Elle était également chargée de l'entretien ainsi que du balisage du cours d'eau. Le premier duits du port d'Orléans date de 1360, il servait à rediriger les écoulements de la Loire afin d'offrir une meilleure navigation dans la zone du port. Ensuite, sur l'ensemble du linéaire de nombreux aménagements sont réalisés, tous dans le but d'améliorer la navigabilité du cours d'eau en redirigeant les écoulements et en augmentant la capacité de curage du cours d'eau. Dans cet optique, un projet national d'amélioration de la navigation sur la Loire a vu le jour en 1825, approuvé par les ponts et chaussées. Au XIX ème siècle 5000 bateaux empruntaient régulièrement la Loire entre Nantes et Orléans.

1.2 - Les épis :

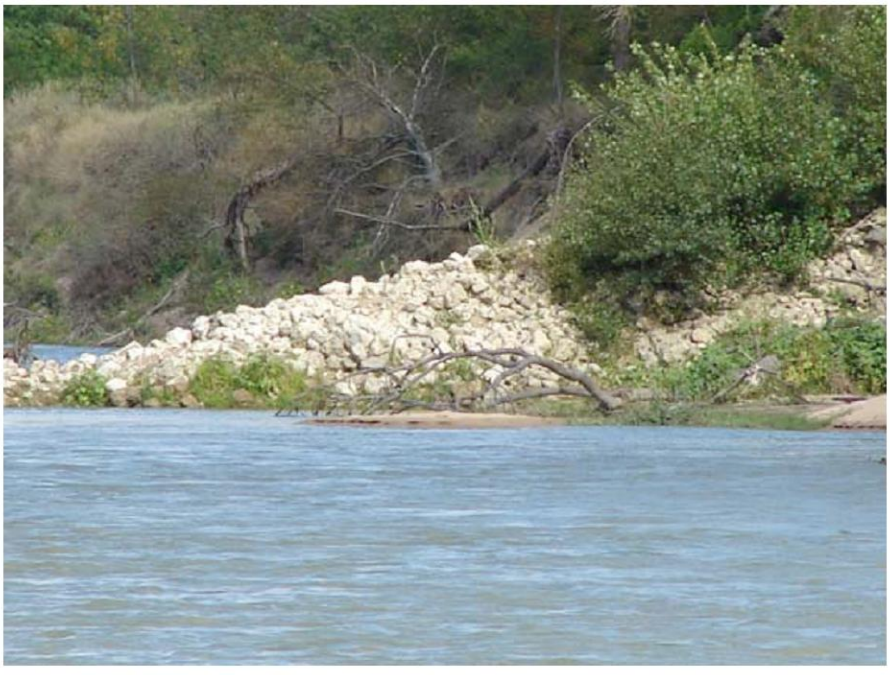

Figure n° 1 : Photo d'un épi transversal en pierre

Les épis sont des sortes de bourrelets transversaux à l'écoulement du chenal (voir figure n°1). Ils sont formés en pierre, béton, palplanches ou d'autres matériaux et sont immergés ou émergés en leur pointe. Leur action est de réduire la section d'écoulement du chenal, pour ainsi augmenter la vitesse de l'eau dans celui-ci, et ainsi faire croître la capacité tractrice du cours d'eau. Ce qui permet une remobilisation des sédiments au fond du chenal à l'aval des épis.

1.3 - Les sédiments :

Le cycle des sédiments débute par le processus d'*érosion*, par lequel des particules ou fragments sont arrachés aux matériaux rocheux sous l'action des agents d'érosion. L'action de l'eau, du vent et des glaciers ainsi que les activités des plantes et animaux contribuent à l'érosion de la surface terrestre. On parle de *sédiments fluviaux* dans le cas où l'eau constitue le principal agent. L'érosion naturelle, ou

géologique, est un processus lent, qui s'étend parfois sur des siècles ou des millénaires. L'érosion résultant de l'activité humaine, dite anthropique, peut se produire beaucoup plus rapidement.

Le processus de *transport* débute grâce aux évènements pluviaux. Les ravins, ruisseaux et rivières servent ensuite de couloir pour évacuer ces sédiments. Plus le débit est important, plus la capacité de transport des sédiments est élevée.

Lorsque l'énergie ne suffit plus pour déplacer les sédiments, ceux-ci se déposent au sein du lit de la rivière (Voir figure n°2).

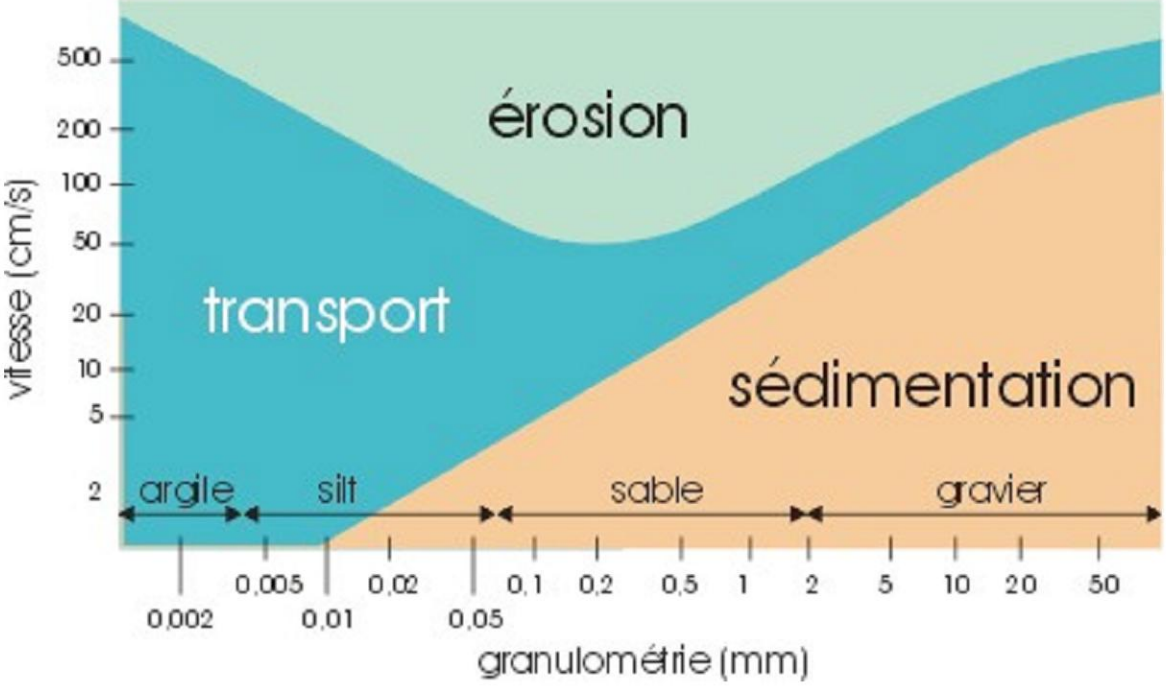

Figure n°2 : Graphique de Hjulstrom vitesse de sédimentation / granulométrie

Donc lorsqu'un fluide s'écoule il peut se charger de particules en suspension. La vitesse de sédimentation est la vitesse minimale qu'un flot doit avoir pour transporter, plutôt que déposer, des sédiments, et est donnée par la loi de Stokes :

$$\boxed{w = \frac{(\rho_p - \rho_f) g r^2}{4.5\mu}}$$

Où w est la vitesse de **sédimentation**, ρ est la masse volumique (les indices p et f indiquent particule et fluide respectivement), g est l'accélération due à la gravité, r est le rayon de la particule et μ est la viscosité dynamique du fluide.

Si la vitesse de l'écoulement est plus grande que celle de dépôt, le granulat continue vers l'aval. Comme il y a toujours des diamètres différents dans le flot de sédiments, les plus gros se déposent en premier (décantation). Les particules sédimentaires sont transportées vers l'aval par des mécanismes comme la saltation, la suspension et le charriage (Voir figure n° 3). Dans les cours d'eau plus la pente est importante plus des sédiments grossier peuvent être transportés.

En montagne, le diamètre de plus grosses particules rocheuses transportées peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Lorsque que ce transport de sédiment se cumule avec une crue, on assiste à un événement de charriage.

En plaine le transport sédimentaire est très peu influencé par la pente, mais le débit d'eau produit une force s'appliquant sur les particules et permet leur mouvement.

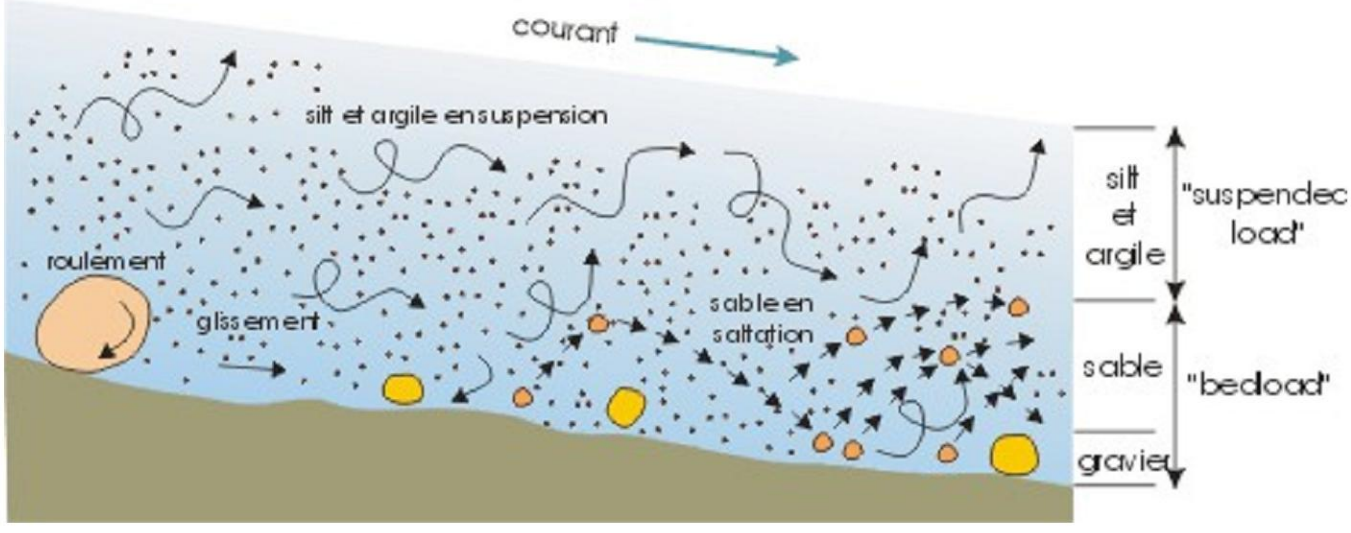

Figure n°3 : Différents modes de transport des sédiments (F. Boulvain)

Cependant une étude montre que la charge en sédiments totale transportée est supérieure pour des débits inférieurs aux débits extrêmes (voir figure n°4).
En effet le débit de plein bord, lorsque la rivière commence une crue, avant que le lit majeur ne soit inondé, permet une plus grande mobilisation de la charge solide.

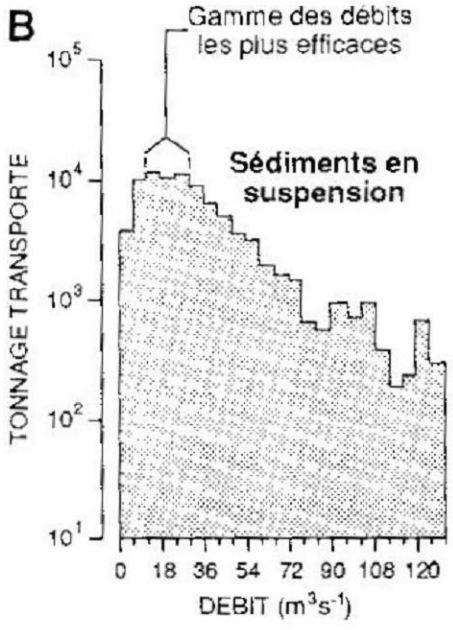

Figure n°4 : Charge de sédiments transportés selon le débit (Webb & Walling 1982)

2 - L'INFLUENCE DES EPIS DE NAVIGATION SUR LES PROCESSUS SEDIMENTAIRES

2.1 - Introduction

L'influence des aménagements sur le linéaire des cours d'eau est facilement quantifiable, et des études menées sur le Rhône par le bureau d'études EPTB Rhône montre la perte de sédiments, piégés dans les retenues, les champs d'épis et lors des extractions de granulats. On observe une nette différence entre le volume de sédiments qui devraient naturellement transiter dans le Rhône et le volume réellement observé (voir figures 5 et 6)

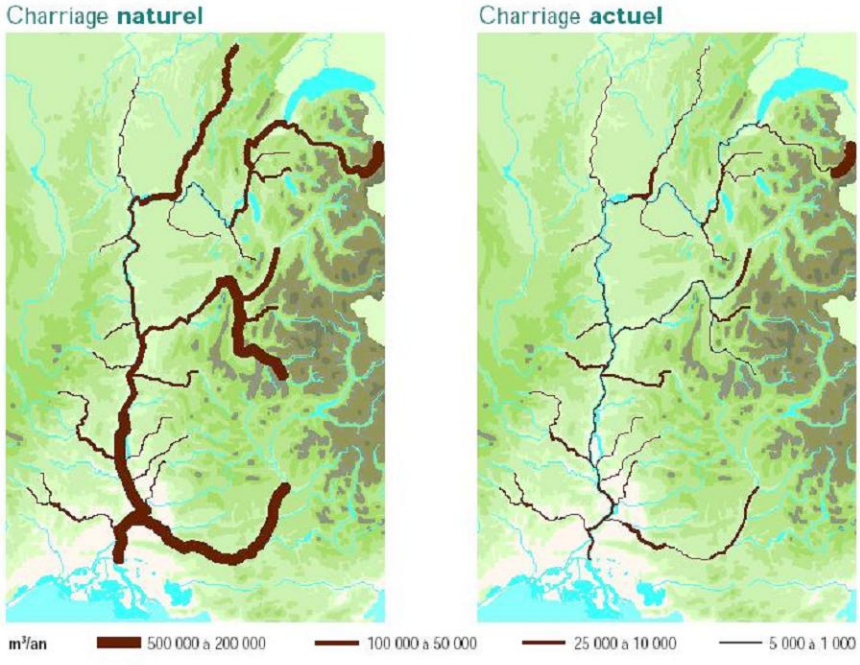

Figure n°5 : Différences entre charriage naturel et actuel (EPTB Rhône)

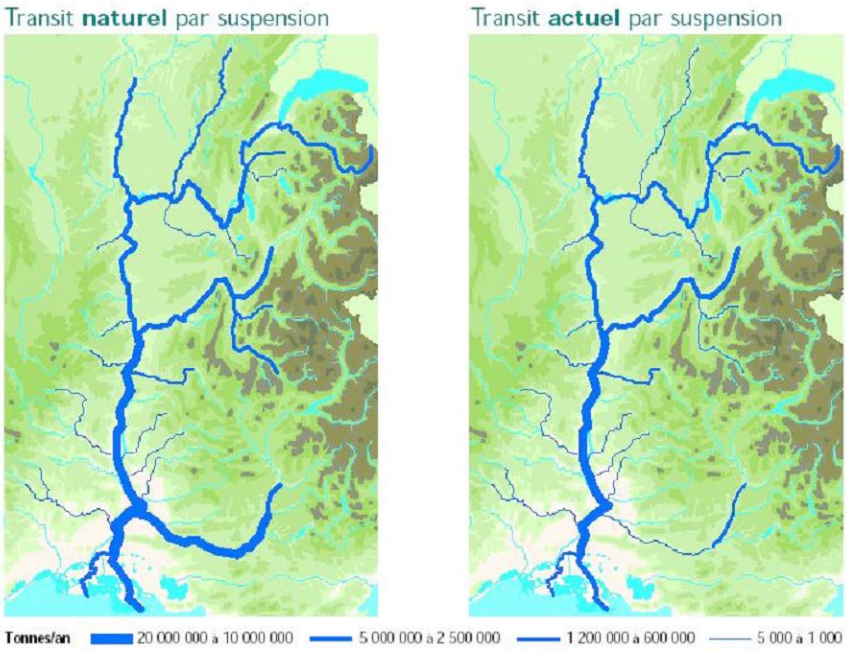

Figure n°6 : Différences entre transport en suspension naturel et actuel (EPTB Rhône)

2.2 - Effets bénéfiques/maléfiques

Les effets bénéfiques de l'aménagement des cours d'eau comme les épis sont ceux qui ont motivé leur mise en place : la redirection des écoulements ainsi que le curage de chenaux. Cependant, l'utilisation des cours d'eau comme voies navigables à des fins commerciales est de moins en moins importante, et la politique de re-naturalisation des grands cours d'eau Européens rend ces effets bénéfiques moins grandioses. D'où des programmes d'entretien et de gestion des cours d'eau qui programment l'arrassement des épis ou leur réduction partielle afin de réduire leur impact.

La conséquence néfaste majeure des épis dans les cours d'eau de grande taille est l'enfoncement du lit. Ses effets sont importants et multiples :

- ✓ L'abaissement du niveau de l'eau à l'étiage peut être de un à plusieurs mètres en dessous de celui qui était par exemple observé au début du siècle sur la Loire, cela bien que le débit soit artificiellement maintenu grâce aux lâchés des barrages réservoirs situés à l'amont;

- ✓ Cet abaissement c'est poursuivi dans les années récentes malgré l'arrêt des extractions dans le lit mineur.

- ✓ De plus, l'abaissement de la ligne d'eau a mis à nu la plupart des fondations des ponts

- ✓ Il s'ensuit une baisse des nappes alluviales en basse eaux qui peut aller jusqu'à mettre à sec certains captages d'eau potable l'été

- ✓ Une augmentation du risque de destruction des digues de protection contre les crues par érosion est présente lorsque le lit est en contact direct

Une autre conséquence des épis peut être la déconnection des chenaux secondaires due à l'approfondissement des chenaux principaux.
Parfois situés plusieurs mètres au dessus du bras actif, ces bras secondaires connaissent une évolution de comblement qui paraît naturellement irréversible, d'où leur incidence sur les conditions d'écoulement des crues. Ces chenaux secondaires se végétalisent rapidement d'espèces pionnières et l'ancrage des sédiments se fait plus intense. Ils ne sont plus mobilisables et l'espace d'expansion du cours d'eau est réduit, ce qui augmente la gravité des épisodes de crue.

2.3 - Influence sur les flux liquides

Une étude menée par P.M. Biron, C. Robson, M.F. Lapointe et S.J. Gaskin sur le dynamique des fluides autours de déflecteurs montre la manière dont les débits liquides sont influencés par, par exemple, toutes sortes de seuils et épis transversaux disposés dans le canal d'écoulement (voir figure n°7).

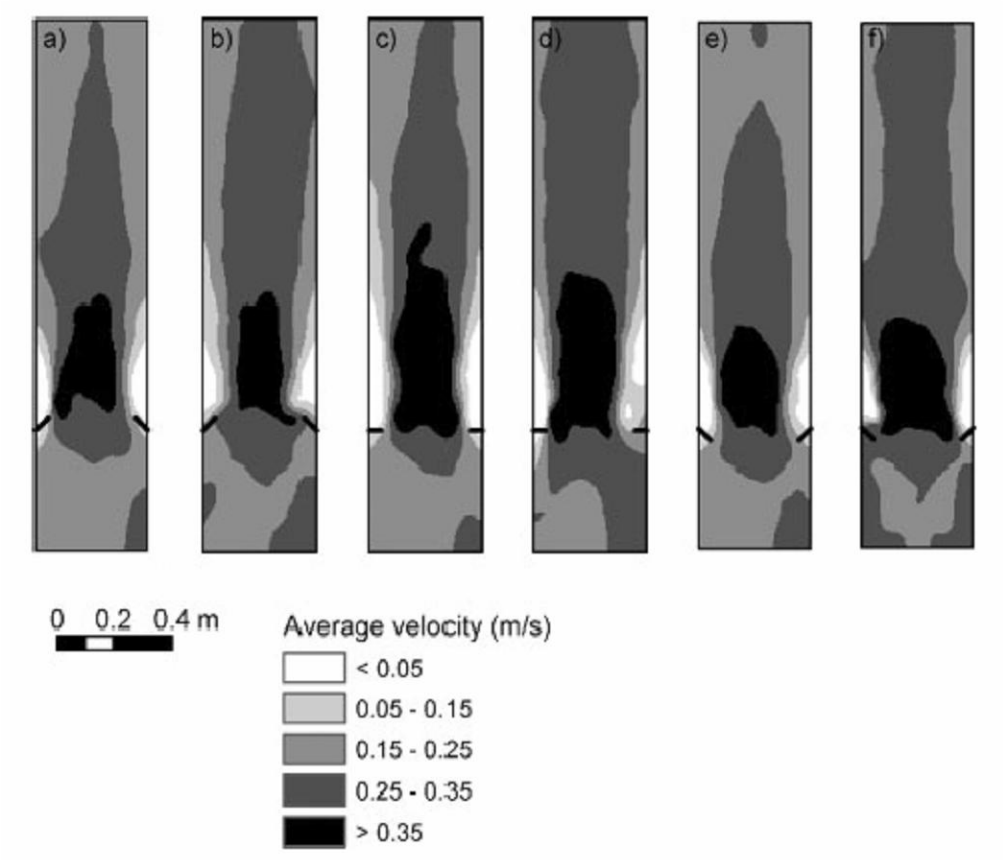

Figure n°7 : Répartition des vitesses découlement au passage d'une échancrure (Byron 2005)

On peut remarquer que les vitesses d'écoulement sont peu influencées en amont de l'échancrure, à part au centre de l'écoulement ou une légère accélération intervient. Par contre, au niveau du passage des épis, et en aval de ceux-ci, on note une très forte augmentation des vitesses d'écoulement dans le chenal, sur un linéaire très important (plusieurs fois la largeur du chenal). Dans tous les cas on remarque que l'accélération concerne la partie centrale de l'écoulement et un gradient de vitesses

existe transversalement dans l'écoulement avec une diminution de ce gradient vers l'aval.

Cette étude a aussi permi de déterminer les zones ou la perturbation de l'écoulement est la plus forte, en modélisant les turbulences provoquées (Voir figure n°8)

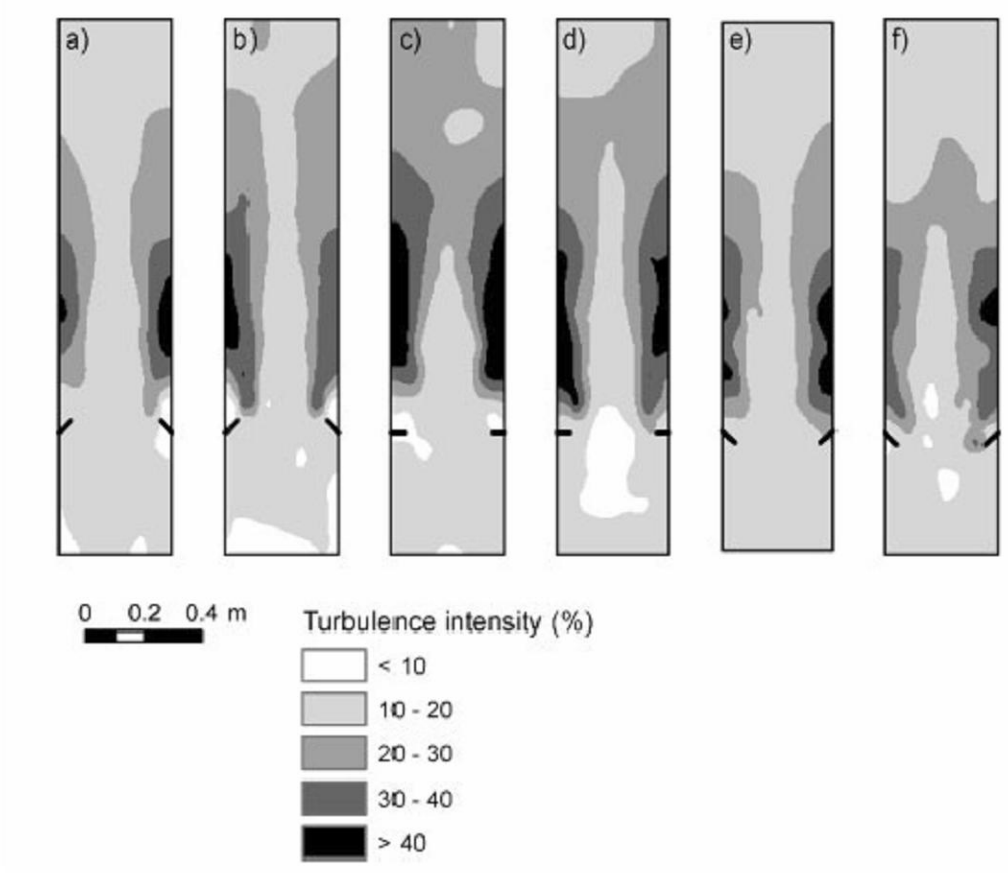

Figure n°8 : Représentation des turbulences autour d'une échancrure (Byron 2005)

Ces turbulences, créés par la perturbation de l'écoulement en un point apparaissent plus marquées sur les berges que dans le centre de l'écoulement. On peut dire que des tourbillons se forment au passage de l'échancrure et qu'ils sont dirigés de la pointe des épis vers les berges, car l'écoulement est accéléré vers l'aval en ligne droite.

2.4 - Influence sur les flux solides

Les flux solides sont évidemment liés aux flux liquides. On l'a vu sur les figures précédentes, la présence d'un objet au sein de l'écoulement modifie grandement les vitesses découlement, et de fait la capacité tractrice du cours d'eau. Les augmentations de vitesses vont être synonymes de zones d'érosion du lit, de plus forte mobilisation des sédiments, tandis que les zones plus calmes, générées derrières les épis, le long des berges vont être des zones de dépôt, ou la vitesse d'écoulement sera inférieure à la vitesse de sédimentation (voir figure n°9 et n°10).

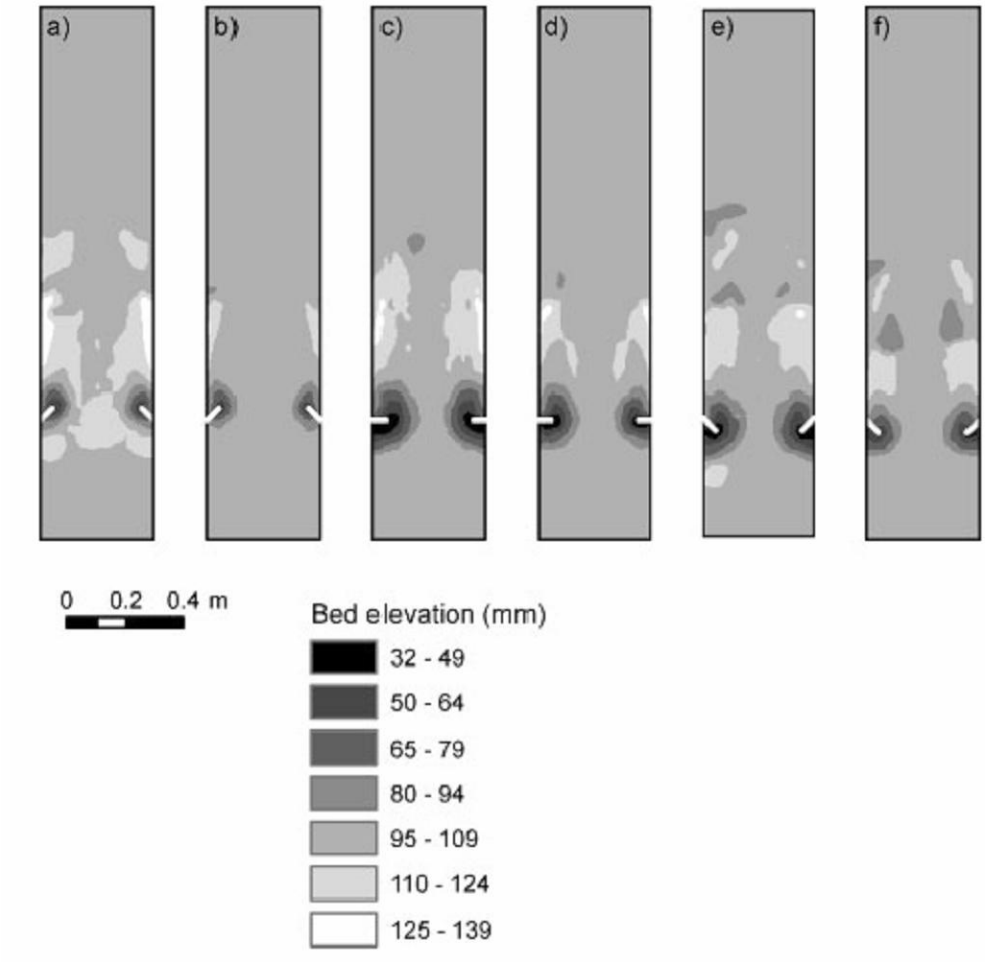

Figure n°9 : Zones de dépôt/érosion au passage de l'échancrure (Byron 2005)

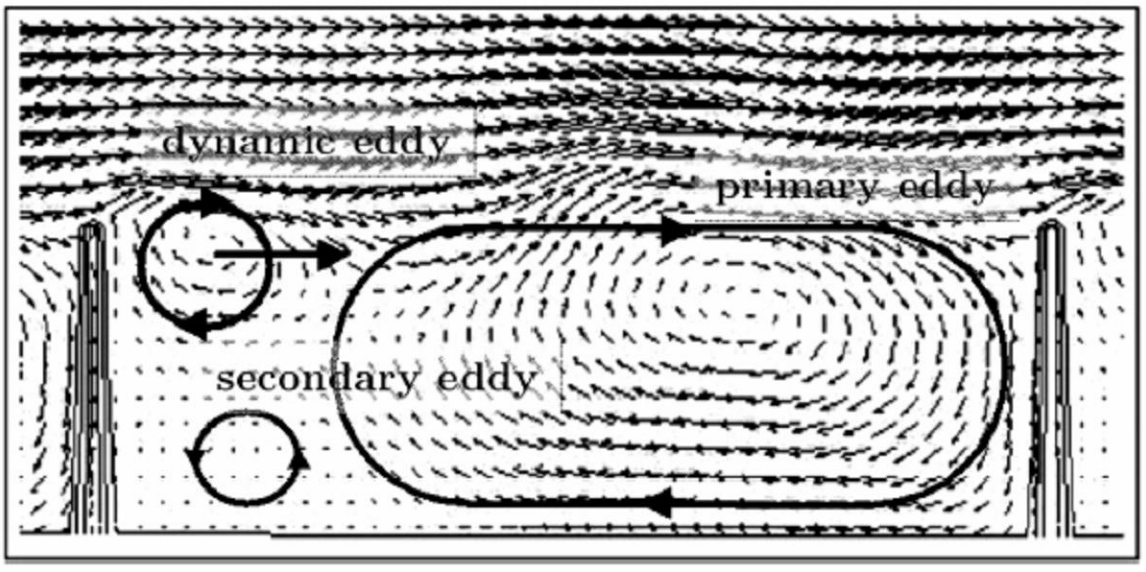

Figure n°10 : Cellules d'écoulement dans le champ d'épis (Yossef 2006)

On peut voir sur ces deux figures que l'écoulement n'est pas modifié uniformément. La figure n°9 montre qu'en général, les zones non centrales de l'écoulement à l'aval des ouvrages sont des zones de dépôt. La figure n°10 présente la manière dont les écoulements sont régis au sein d'un champ d'épis. On remarque la formation de cellules de vitesses, ayant un sens de rotation propre. A la pointe de l'épi, une cellule de petite taille, tourne avec une vitesse importante, due à l'étranglement du flux au niveau de l'épi. La cellule principale, de taille importante, occupe l'ensemble de la surface entre les deux épis, mais sans empiéter sur la partie gauche de l'écoulement, accélérée par le premier épi. Les champs de vitesses symbolisés par des flèches au sein de cette cellule montrent que lorsque l'écoulement a fait demi tour par rapport à l'écoulement naturel du chenal, les vitesses sont faibles, et cette zone présente donc les caractéristiques d'une zone de dépôt de sédiments (voir figure n°11).

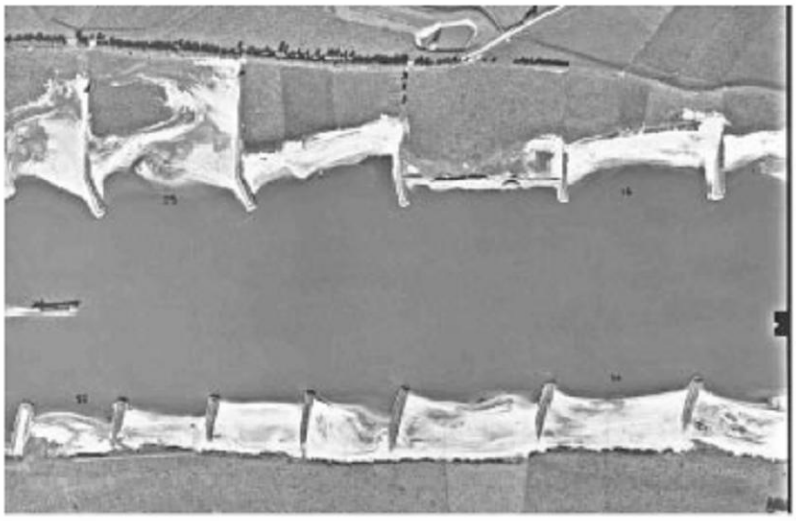

Figure n°11 : Photo infrarouge d'un banc d'épis (Ten Brinke 2004)

Cette photo, provenant d'une campagne aérienne en infrarouge permet de voir, à l'aide de la différence de couleur entre l'eau (noire, dans le chenal principal) et mes bancs de sable (blanc, sur les berges) qu'un champ d'épis à tendance à capter les sédiments.

2.5 - La modélisation des écoulements au sein des champs d'épis

L'ensemble des modifications apportées au flux liquides, solides, de la rivière par les épis engendre parfois des complications, comme le creusement des chenaux principaux des grandes rivières, la création de bancs sédimentaires, et la perte de l'écoulement au sein de chenaux secondaires dans les systèmes fluviaux en tresses.
Depuis que la gestion des cours d'eau en Europe tend vers une remise à l'état naturel, des études sont réalisées afin de déterminer quels sont les impacts que causent les aménagements humains sur les processus naturels.
Ces études, résultats de l'observation des phénomènes se déroulant en l'état dans les rivières est aussi appuyé par l'élaboration de modèles numériques permettant la modélisation des flux au voisinage de champs d'épis.

L'étude de Mohamed F.M. Yossef et de R. Rupprecht sur l'application du modèle numérique Delft 3D system montre, par une comparaison de résultats empiriques et de résultats de la modélisation numérique, qu'un tel modèle, même s'il ne permet pas une approche quantitative fiable, donne de bon résultats qualitatifs. La modélisation permet, de plus, une présentation graphique des résultats (voir Figure n°12)

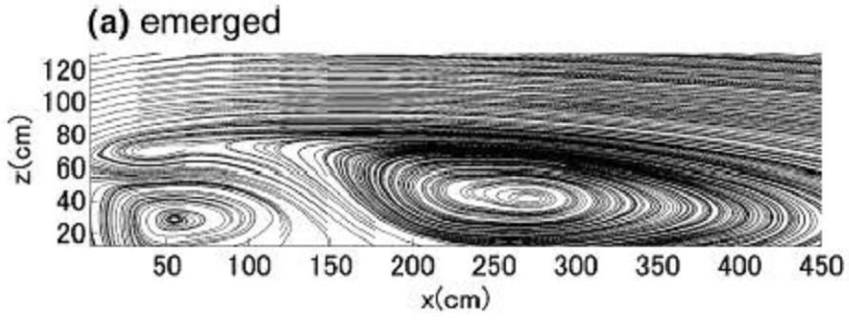

Figure n° 12 : modélisation des champs de vitesses dans le voisinage d'un champ d'épis (Kadota 2006)

Ces modèles, pouvant être calés sur des données de terrains recueillies lors de campagne d'entretien d'ouvrages, ou lors d'études préliminaires, peuvent permettre

de quantifier les impacts d'un champ d'épis et ainsi prévoir des complication induites par la modification du cours d'eau (érosion des berges, fosses).

CONCLUSION

On a vu dans cette synthèse que les cours d'eaux ont été influencés par l'homme, pour des raisons raisonnables et nécessaire, comme la navigation marchande et la préservation de l'écoulement dans des zones particulières (ports). Cependant la mise en place d'épis au sein des rivières de grande taille affecte fortement l'écoulement du cours d'eau.

Les flux liquides et solides sont touchés et les conséquences néfastes sont désormais plus importantes que les bénéfices tirés de ces ouvrages.

L'enfoncement général du lit de certains grands fleuves, avec les problèmes que cela induit, les déconnections de chenaux secondaire, avec les conséquences hydrologiques et écologique produites font des champs d'épis une problématique importante actuellement lors des planification de gestion de grands cours d'eau comme la Loire ou le Rhin, ou encore la Waal.

Si la politique globale Européenne de gestion des cours d'eau tend à redonner un aspect naturel plus important à nos grands fleuves les actions de reconnections des chenaux secondaires, d'arasement d'épis afin de remobiliser les sédiments et ainsi faire remonter la ligne d'eau vont se multiplier dans les prochaines années.

Cependant, lors de la recherche bibliographique pour la réalisation de cette synthèse, le faible nombre de publications (presque aucune en France) sur l'impact des épis de navigation, met en évidence que les connaissances sont encore faibles dans ce domaine et très peu répandues dans les organismes de gestion. La mutualisation des connaissances en cours dans le domaine de la gestion de l'eau parait un bon moyen de restaurer les cours d'eau et leur redonner leur aspect, leur qualité et leur charme originel.

BIBLIOGRAPHIE ET OUVRAGES CONSULTES

Ouvrages :

- ✓ Hydrosystèmes fluviaux, **C. Amoros et G.E. Petts**
  Collection d'écologie n° 24
  Editions Masson 1993

- ✓ Rivers and Floodplains, Forms processes and sedimentary record, **John S. Bridge**
  Editions Blackwell 2003

- ✓ Transports solides dans le cours d'eau, **P. Lefort**
  Edité par l'école nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique de Grenoble en 1995

Périodiques :

- ✓ Loire et Terroirs, des barrages pour la navigation, **Charles Berg**

- ✓ Loire et Terroirs, des aménagements pour la navigation, **Phillippe Auclerc**
  Parties 1, 2, 3, 4

Publications :

- ✓ Sediments dynamics in anabranched channels of the Loire : The study case of Ingrandes (France)
  S. Rodrigues, J.N. Gautier, J.J. Peters

- ✓ Recent training of the lower Rhine to increase Inland Water. Transport potentials : A mix of permanent and recurrent measures

H. Havinga, M. Taal, R. Smedes, G.J. Klaassen, N. Douben, C.J. Sloff

- ✓
- ✓ The Shallow flow around a single groyne under submerged and emerged conditions
  K. Suzuki, A. Kadota, W.J.S. Uijttwaal

- ✓ Modeling the flow and morphology in groyne fields
  M.F.M. Yossef, R. Rupprecht

- ✓ Modeling morphodynamic evolution of river dunes
  C.M. Dohmen Janssen, S.J.M.H. Huslcher, A.J. Parlberg, J. van der Berg, A.P.P Ternes

- ✓ Evaluation of environmental impacts resulting from river regulation works: A case study from Portugal
  A.E. Barbosa, E. Alves, R.M.V. Cortes, P.M. Silva-Santos, F. Aguiar, T. Ferreira

Sites internet :

- ✓ Une introduction aux processus sédimentaires
  F. Boulvain
  www.ulg.ac.be

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS 2

SOMMAIRE 3

RESUME 4
Mots clés 4

ABSTRACT 4
Key Words 4

LISTE DES FIGURES 5

INTRODUCTION 6

1 - LES GRANDS COURS D'EAU, LEURS AMENAGEMENTS ET LES SEDIMENTS QU'ILS TRANSPORTENT 7
1.1 - Les aménagements des cours d'eau de grande taille 7
1.2 - Les épis : 8
1.3 - Les sédiments : 8

2 - L'INFLUENCE DES EPIS DE NAVIGATION SUR LES PROCESSUS SEDIMENTAIRES 12
2.1 - Introduction 12
2.2 - Effets bénéfiques/maléfiques 13
2.3 - Influence sur les flux liquides 15
2.4 - Influence sur les flux solides 17
2.5 - La modélisation des écoulements au sein des champs d'épis 20

CONCLUSION 22

BIBLIOGRAPHIE ET OUVRAGES CONSULTES 23
Ouvrages : 23
Périodiques : 23
Publications : 23
Sites internet : 24

TABLE DES MATIERES 25