

# CHAPITRE 4

## **ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES RIVIÈRES AMÉNAGÉES**

<b>1 - ÉVOLUTIONS DU PROFIL EN LONG</b> .....	<b>78</b>
1.1 - Prélèvements temporaires dans le lit mineur.....	78
1.2 - Prélèvements permanents dans le lit mineur.....	79
1.3 - Élargissement du lit sans modification de la rugosité des berges.....	80
1.4 - Enlèvement important de la végétation des berges.....	81
1.5 - Influence des coupures de méandres.....	82
1.6 - Influence des endiguements.....	82
1.7 - Rétrécissement local du lit mineur.....	83
1.8 - Prélèvements permanents dans le lit majeur.....	84
1.9 - Enlèvement des atterrissements.....	85
1.10 - Influence des barrages.....	85
1.11 - Influence des seuils (sans dérivation).....	86
1.12 - Dérivations avec restitution.....	87
1.13 - Influence des reforestations du bassin versant.....	88
1.14 - Conclusion sur les érosions régressive et progressive.....	89
<b>2 - ENLIMONAGE DES BANCS</b> .....	<b>89</b>
<b>3 - ÉVOLUTIONS DU LIT MAJEUR</b> .....	<b>91</b>
<b>4 - ÉVOLUTIONS DU TRACÉ EN PLAN</b> .....	<b>91</b>
4.1 - Évolution du style fluvial.....	91
4.2 - Évolution du tracé, sans changement du style fluvial.....	92
<b>5 - ÉVOLUTION GLOBALE, EN PLAN ET EN PROFIL</b> .....	<b>92</b>
<b>6 - AUTRES CONSÉQUENCES DES TRAVAUX EN RIVIÈRE</b> .....	<b>93</b>
<b>7 - CONCLUSION SUR L'ÉVOLUTION DES RIVIÈRES AMÉNAGÉES</b> .....	<b>93</b>

**D**ans ce chapitre, nous allons étudier comment des aménagements du lit ou même du bassin versant peuvent faire évoluer les formes naturelles des cours d'eau. Dans un premier temps (§ 1), nous allons considérer que les berges sont fixées par exemple par la végétation. Seul le profil en long est alors susceptible d'évoluer. Dans la pratique, c'est souvent le cas. Le § 2 traite l'évolution en plan tandis que le 4 aborde globalement les évolutions en plan et en profil. C'est évidemment ainsi qu'il faut raisonner, mais nous avons préféré commencer par découpler ces deux conséquences morphologiques pour des raisons pédagogiques. Nous aborderons ensuite au § 5 les conséquences non géométriques. Le cas particulier et complexe des rivières endiguées est traité dans [19].

Au fil du texte nous évoquerons le caractère plus ou moins irréversible des aménagements. Il est bon que les aménageurs et les gestionnaires de cours d'eau puissent appréhender le niveau d'intervention ou de non-intervention pouvant conduire à une irréversibilité.

Nous supposons que les rivières étudiées sont en équilibre dynamique au sens donné précédemment (chapitre 3, § 2.3). Si la rivière n'est pas naturellement en équilibre dynamique, les évolutions observées à la suite d'aménagements auront plusieurs causes et le diagnostic devient plus complexe.

## 1 - ÉVOLUTIONS DU PROFIL EN LONG

Nous allons aborder tour à tour les principaux types d'aménagement qui se traduisent toujours soit par une modification géométrique, soit par une modification des apports liquides et solides.

Le profil en long peut réagir soit en s'approfondissant soit en se surélevant. Le mécanisme correspondant à l'approfondissement est baptisé érosion. Celui correspondant à la surélévation est baptisé exhaussement. Par ailleurs, ces deux mécanismes peuvent se développer vers l'aval ou vers l'amont. Les interactions sur le profil en long sont donc de quatre types : érosion régressive, érosion progressive, exhaussement régressif et exhaussement progressif. Les deux mécanismes d'érosion – régressive ou progressive – sont nettement les plus fréquents. Malgré leur ressemblance, nous verrons que leurs principes sont très différents et que les parades sont assez différentes.

### 1.1 - Prélèvements temporaires dans le lit mineur

➤ Supposons que l'on pratique une excavation sur un tronçon de lit AB pour extraire des graviers ou du sable (voir figure 1 haut). En B, la ligne d'eau s'abaisse, la pente augmente. La force tractrice efficace ( $\beta \cdot \tau_0 = (K/K_{grains})^{3/2} \gamma_w y \cdot i$ ) augmente donc, ce qui entraîne un enfoncement du fond. Une érosion régressive se déclenche donc (1). L'apport solide provenant de l'amont est piégé dans l'excavation et la comble peu à peu (2). A l'aval de A, le débit liquide n'est plus saturé en débit solide, et l'écoulement doit donc creuser le lit pour compenser ce déficit (3). Ce mécanisme s'appelle l'érosion progressive. Ensuite, la fosse finit par se combler totalement et l'équilibre initial est peu à peu retrouvé.

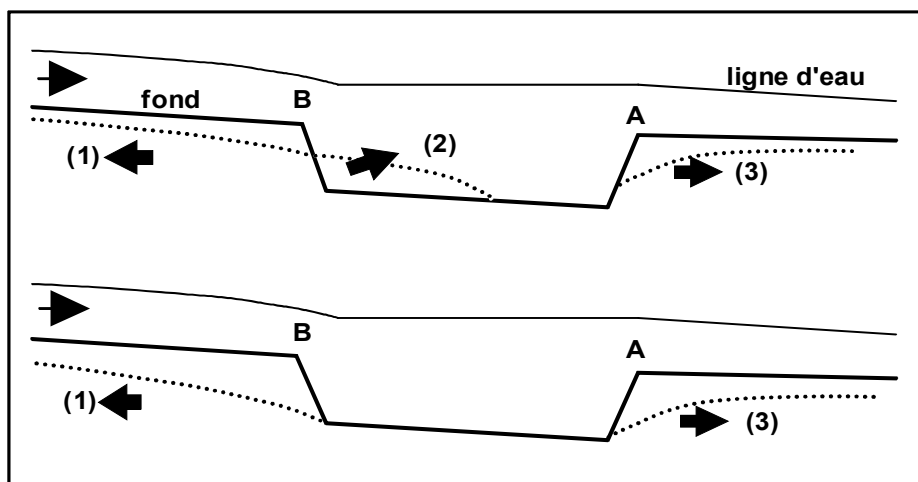
➤ Ce n'est pas pour autant que le lit ne garde aucune trace de ce prélèvement. Si les érosions développées vers l'amont et vers l'aval sont assez profondes, des glissements de berges peuvent en résulter ou bien des déstabilisations d'ouvrages.

➤ Cet exemple des prélèvements temporaires est surtout présenté à des fins pédagogiques car ils sont assez exceptionnels et en principe interdits. Mais, les prélèvements de granulats au titre de l'entretien s'assimilent à des prélèvements temporaires, la différence étant qu'ils sont généralisés à l'ensemble d'un tronçon de cours d'eau (voir § 1.9).

➤ Nous venons donc de voir un exemple typique d'intervention à caractère réversible. Il a permis de définir les vocables "érosion régressive" et "érosion progressive". Nous allons voir d'autres interventions conduisant à ces mêmes conséquences. Les géographes parlent d'incision pour désigner indifféremment une érosion régressive ou progressive.

## 1.2 - Prélèvements permanents dans le lit mineur

Cette fois-ci une gravière industrielle exploite le gisement alluvial du lit mineur de manière permanente. Les alluvions qui arrivent dans la fosse sont draguées au fur et à mesure. Voir la figure 1 bas. L'érosion régressive (1) se poursuit donc jusqu'à ce qu'un point dur soit rencontré en amont (seuil rocheux par exemple). L'érosion progressive n'est par contre pas forcément arrêtée par un point dur aval, le déficit en apport solide n'étant compensé que progressivement. Le résultat global est donc un enfoncement du lit de moins en moins profond en allant vers l'aval. Une érosion progressive est donc un mécanisme qui se traduit par une diminution de la pente. Nous avons supposé les berges fixes. En fait le déficit en matériaux solides se traduit aussi par une sollicitation accrue des berges impliquant une tendance au méandrement.



**Figure 1- conséquences de prélèvements temporaire et permanent dans le lit mineur**

Comme on l'a vu pour les prélèvements temporaires, les conséquences sont a priori réversibles, mais avec un délai très supérieur à celui avec lequel l'incision s'est manifestée et à condition que l'amont soit capable de fournir le stock granulaire nécessaire. Ainsi sur la Loire par exemple, l'arrêt des extractions en lit mineur commence à provoquer des débuts d'exhaussement du fond du lit. Il est toutefois un cas finalement fréquent de conséquence irréversible, celui où l'érosion régressive ou progressive a atteint le substratum rocheux comme par exemple sur la Durance vaclusienne ou sur les Gardons. Ces substratums peuvent être paradoxalement plus fragiles que les alluvions car ils ne sont pas renouvelables ! L'abrasion provoquée par le passage des galets charriés ainsi que le gel provoquent un enfoncement irréversible du lit. Par exemple, sur les Gardons à l'aval du pont de Saint-Chaptes, la vitesse de creusement du lit dans le substratum marneux est d'un mètre en dix ans. Pour ne pas léguer de telles situations aux générations futures, on doit absolument considérer que les sédiments sableux ou graveleux constituent une enveloppe protectrice renouvelable. L'enfoncement irréversible est particulièrement flagrant lorsque le substratum mis à nu est une marne délitable ou pire un limon organique.

La législation française a maintenant interdit les prélèvements dans les lits mineurs<sup>1</sup>, et peu à peu les installations se sont reportées en partie dans les lits majeurs.

<sup>1</sup> Loi sur l'eau et arrêté d'application du 22.9.1994 qui interdisent les prélèvements en lit mineur, sauf des dragages à des fins purement hydrauliques dont le caractère indispensable est prouvé.

### 1.3 - Élargissement du lit sans modification de la rugosité des berges

Considérons un tronçon AB calibré sur une longueur assez importante (figure 2). Par hypothèse d'école nous supposons dans ce paragraphe que la rugosité globale du lit ( $K$ ) reste inchangée. Pour apprécier la nature de l'impact de cet aménagement, nous supposons que les années hydrologiques qui vont suivre sont en moyenne semblables à celles qui ont précédé. On peut alors raisonner à débit constant. Si par exemple on démontre que pour un débit quelconque, la force tractrice augmente avec l'aménagement on est certain qu'il y aura tendance à l'enfoncement du lit.

Dans le tronçon calibré, la formule du régime permanent uniforme est applicable :  $Q = K.S.R^{2/3}.i^{1/2}$ . Uniquement dans un but de simplification de la présentation, nous supposerons en outre que la rivière est suffisamment large (de largeur  $L$ ). Dans ce cas  $R \cong y$  et la formule devient :  $Q = K.L.y^{5/3}.i^{1/2}$

Elle montre qu'à débit égal, le tirant d'eau  $y$  est diminué par rapport à la situation antérieure.

La force tractrice efficace ( $\beta.\tau_0 = (K/K_{grains})^{3/2} \gamma_w y.i$ ) diminue aussi sur AB puisque tous les autres paramètres,  $K$  et  $i$  sont inchangés. La capacité de transport solide diminue donc aussi. L'écoulement doit alors déposer des matériaux sur tout le tronçon AB (1). En amont de B, sur BB', le tirant d'eau s'est abaissé : il y a donc mise en vitesse, ce qui entraîne un enfoncement du fond du lit. En amont de B', le changement de pente du fond provoque une mise en vitesse qui va augmenter le transport solide et provoquer l'enfoncement du lit. L'augmentation de pente qui en résulte amorce un mécanisme d'érosion régressive (2). Ce phénomène progresse peu à peu vers l'amont. A l'opposé, en aval de A, l'eau a une charge solide inférieure à sa capacité de transport : l'écoulement va se saturer en débit solide par prélèvement sur le fond si les berges sont fixées (3). C'est une érosion progressive qui démarre.

A terme, la rivière va arrêter l'exhaussement lorsque la capacité de transport solide du tronçon élargi sera égale au débit solide qui parvient de l'amont. Pour cela, la rivière augmente sa pente pour compenser la baisse du tirant d'eau. Cela signifie que l'épaisseur de dépôt est un peu plus forte à l'amont qu'à l'aval. La cause de l'érosion progressive aval se résorbe donc et peu à peu ses effets sont annulés. A l'amont, la surélévation du fond va entraîner un exhaussement régressif qui compensera l'érosion régressive. En fait, il est bien délicat de prédire les effets exacts sur la ligne d'eau et sur les fonds amont à long terme, car on ne peut pas faire l'hypothèse d'un régime uniforme. De toute façon, un élargissement aussi brutal est un cas d'école.

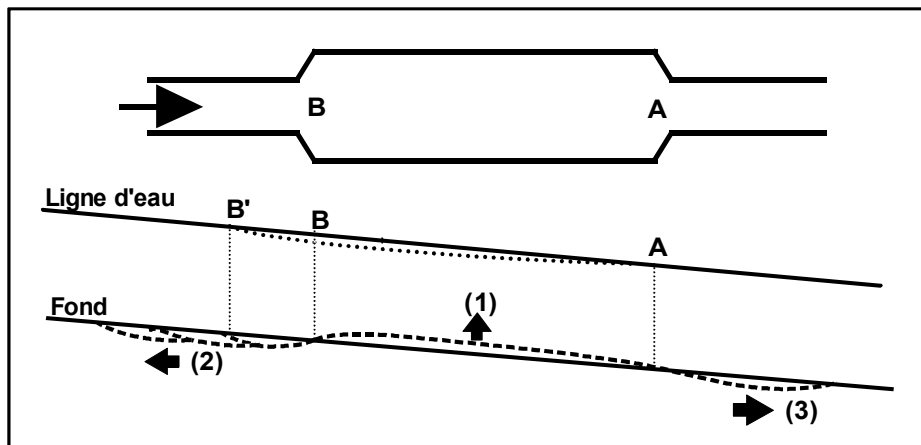


Figure 2 - conséquence à court terme d'un fort élargissement (profil en long)

Lorsque les travaux d'élargissement s'accompagnent d'une diminution de la rugosité des berges, il faut reprendre le raisonnement en prenant en compte les deux modifications ( $K$  et  $L$ ). De même, la conclusion peut être différente pour des rivières de faible largeur où  $R$  peut être très inférieur à  $y$ .

## 1.4 - Enlèvement important de la végétation des berges

Considérons cette fois-ci un long tronçon AB dont on enlève la végétation (figure 3). Son coefficient de Strickler est donc augmenté. Nous pouvons également admettre que la formule du régime permanent uniforme est applicable. A débit égal, le tirant d'eau varie comme  $K^{-3/5}$  et donc la force tractrice efficace ( $\beta \cdot \tau_0 = \left(K/K_{grains}\right)^{3/2} \gamma_w y \cdot i$ ) varie comme  $K^{3/2} K^{-3/5} = K^{9/10}$ , c'est à dire qu'elle augmente. Le transport solide augmente donc, et cela n'est possible que par prélèvement sur le fond puisque par hypothèse les berges sont fixées. La rivière va devoir s'enfoncer (1) entre A et B par érosion du fond (les berges étant supposées fixes). En amont de B, le changement de pente du fond provoque une mise en vitesse qui va augmenter le transport solide et amorcer une érosion régressive (2). En aval de A, l'excédent de transport solide provoque un dépôt (3). Bien entendu, ce mécanisme est d'autant plus net que la rivière est peu large. D'après notre expérience, l'enfoncement d'une rivière après restauration vaut environ 20 à 50 cm. On peut raisonnablement penser que la rivière a alors retrouvé un profil comparable à celui qu'elle possédait lorsqu'elle était régulièrement entretenue par les riverains. L'intervention est de type réversible. Mais dans le cas d'une rivière énergiquement restaurée, il peut arriver que soient mis à nu des terrains plus affouillables où l'enfoncement peut prendre des valeurs nettement plus importantes. Les conséquences de l'intervention sont alors irréversibles.

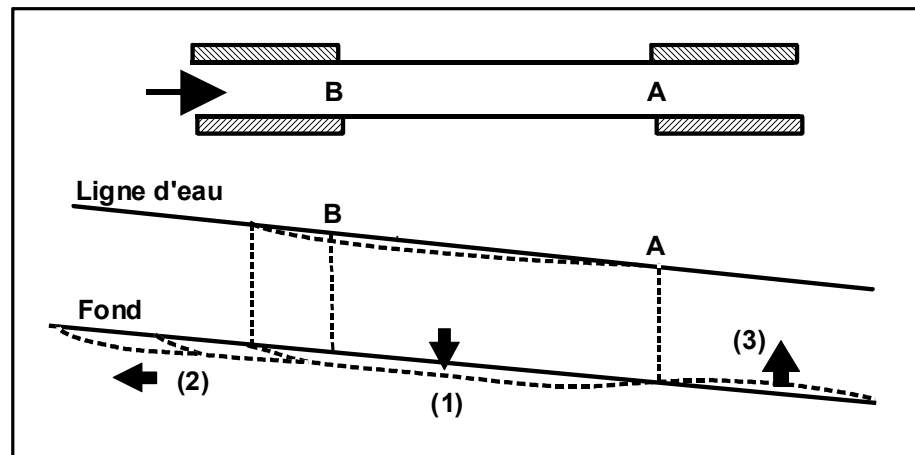


Figure 3 - conséquence d'une forte diminution de la rugosité des berges

## 1.5 - Influence des coupures de méandres

Soit une coupure de méandre entre A et B (figure 4). L'ancien lit est supposé obturé. La diminution de la longueur du trajet AB se traduit évidemment par une augmentation de la pente. La force tractrice est donc augmentée et aussi le transport solide. Il y a donc enfoncement (1) sur A'B' (B' un peu en amont de B), puis érosion régressive en amont de B' (2). Le complément de matériau solide ainsi prélevé sur le fond va se redéposer (3) en aval de A car on retrouve un tronçon déjà saturé en débit solide. Ainsi, la rivière retrouve peu à peu un profil en long plus régulier. La hauteur de l'enfoncement régressif est égale à la dénivelée de la longueur de rivière "perdue". Elle est donc très facile à calculer. Les coupures, qui doivent a priori rester exceptionnelles pour des raisons morphologiques et écologiques et dont il faut bien vérifier l'efficacité hydraulique. En effet, en termes de ligne d'eau, le bénéfice d'une coupure est plutôt ponctuel.

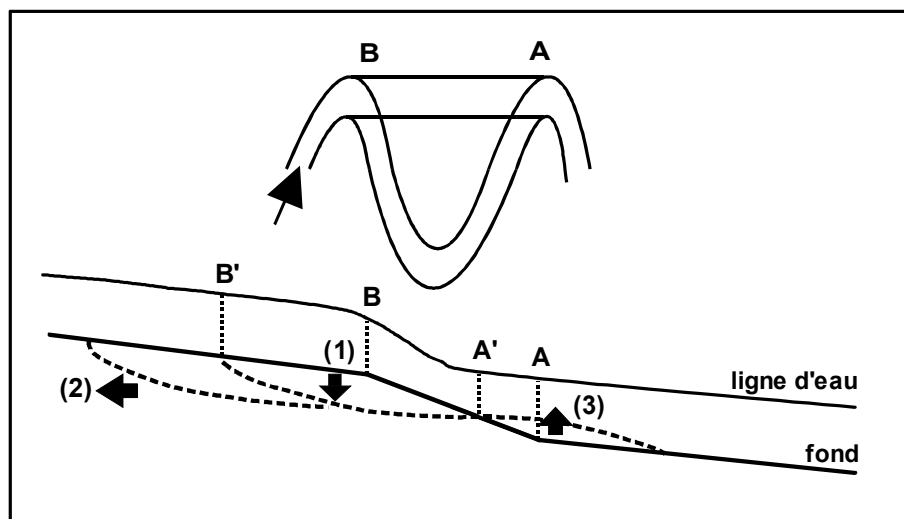


Figure 4 - coupure de méandre et conséquence sur le profil en long

## 1.6 - Influence des endiguements

Nous considérons un aménagement dont les berges sont inchangées et simplement surélevées par des digues latérales. Pour les débits inférieurs à l'ancien débit de plein bord, la force tractrice reste inchangée et il n'y a aucune conséquence morphologique.

Mais l'endiguement des deux rives a pour effet d'augmenter le tirant d'eau maximal dans le nouveau lit pour les très fortes crues (figure 5). La force tractrice augmente dans ce cas. Comme pour le déboisement des berges (paragraphe 1.4), il y a enfoncement par érosion sur le tronçon endigué, érosion régressive à l'amont, dépôt à l'aval. Les ouvrages dont les fondations sont plutôt limitées risquent d'être déchaussés (ponts, seuils, prises d'eau, protections de berge).

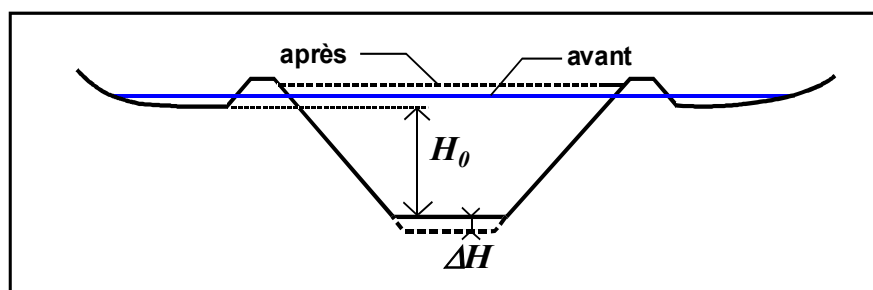


Figure 5 - élévation du niveau de l'eau due à la suppression des débordements dans le lit majeur

D'après Ramette [56], les fonds évoluent sensiblement parallèlement aux fonds initiaux. Si  $Q$  est le

débit du lit endigué et  $Q_m$  la part de ce même débit dans le lit mineur avant endiguement, l'approfondissement est de l'ordre de  $\Delta H = H_0 \left( \left( \frac{Q}{Q_m} \right)^{2/3} - 1 \right)$  où  $H_0$  est la profondeur correspondant à  $Q_m$  avant endiguement. Par exemple si la capacité du lit augmente de 20%, l'enfoncement vaut 13% , c'est à dire 40 cm si  $H_0$  vaut 3 m.

Bien sûr, le raisonnement précédent s'applique seulement à une rivière endiguée mais non élargie. Si l'on réalisait à la fois un fort élargissement et un endiguement, il y aurait deux phénomènes de tendance opposée. Le résultat en serait généralement une surélévation du fond du lit.

Si le tronçon de rivière n'est pas à l'équilibre et dépose plus de matériaux que l'amont n'en procure, le calcul précédent n'est plus valable. Les endiguements empêchent les dépôts dans la partie protégée du lit majeur. Le reste du lit majeur et le lit mineur sont alors l'objet de dépôts accrus. Dans le cas des digues édifiées au bord des berges, c'est le lit mineur seul qui se surélève.

La problématique de la vulnérabilité des endiguements est traitée dans [19].

### 1.7 - Rétrécissement local du lit mineur

Dans un lit mineur de largeur  $L_1$ , un ouvrage de largeur  $L_0$  provoque un approfondissement localisé  $H_1 - H_0$ .

$H_0$  désigne la profondeur des fonds mesurée sous la ligne d'eau dans le tronçon non influencé par cet ouvrage. Au droit du rétrécissement la profondeur est, selon Ramette [56] :  $H_1 = H_0 (L_1 / L_0)^{2/3}$ . Voir les notations en figure 6.

De plus, il se produit un affouillement localisé au droit des culées. Il peut être approché par la formule déjà donnée au chapitre 2 § 9 :  $H_2 = 0,73.q^{2/3}d^{-1/6}$  (unités m et  $m^3/s/m$ ).

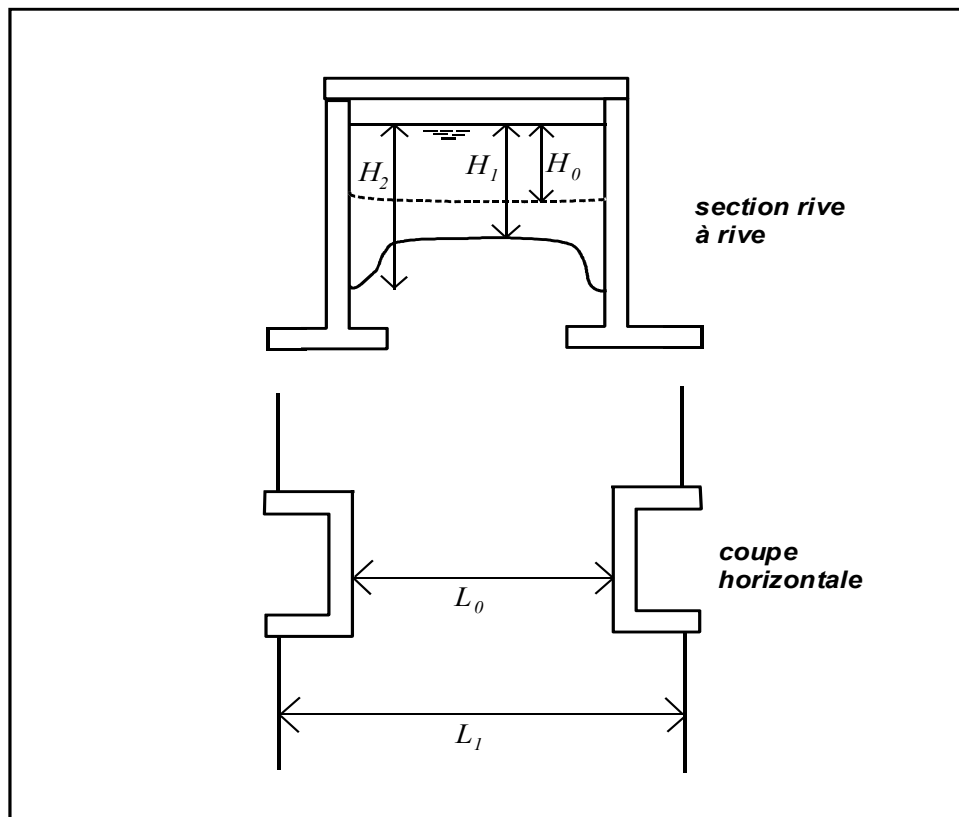


Figure 6 - influence d'un rétrécissement localisé (piles de pont ....)

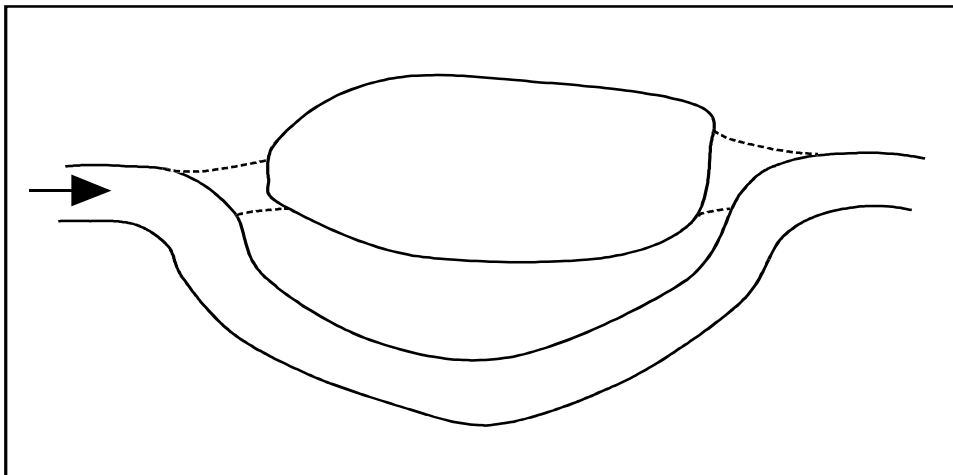
## 1.8 - Prélèvements permanents dans le lit majeur

On peut penser a priori qu'une gravière dans le lit majeur n'a aucune connexion avec le lit mineur et donc aucune influence sur la morphologie fluviale. Cet avis doit être largement relativisé pour trois raisons.

➤ La raison la plus forte est qu'une connexion risque fort de se produire à l'occasion d'une grosse crue. Celle-ci peut très bien éroder la langue de terre séparant le lit mineur d'un bassin en cours ou en arrêt d'exploitation. Côté amont des bassins, ce risque est accru par la charge qui se crée entre la rivière en crue et le plan d'eau horizontal. Il en résulte une érosion régressive de la langue de terre analogue à ce qui se produit lors des surverses de digues (cf. chapitre 5 § 3.1). Le bassin se remplit alors à la cote de la rivière en crue et généralement, un débordement se produit à l'aval qui à son tour érode une langue de terre. La gravière est capturée par la rivière qui adopte un nouveau tracé. Le changement de tracé est déjà en soi une conséquence négative surtout pour l'exploitant de la gravière. Mais la conséquence morphologique la plus forte reste à venir. Le bassin joue le rôle de décanteur pour les sédiments charriés, ce qui déclenche à la fois une érosion régressive à l'amont et progressive à l'aval. Les deux mécanismes peuvent être spectaculaires compte tenu du caractère brutal du changement.

La solution préventive consiste à protéger efficacement les berges amont coté rivière (surtout si la rive est concave) et à traiter la langue de terre amont en la végétalisant et si possible en la surélevant pour quelle soit sollicitée en déversement le plus tard possible et lorsqu'un plan d'eau aval amortisseur s'est déjà créé. Il est bien préférable que l'inondation en crue commence par l'aval. L'endiguement complet serait envisageable moyennant une très bonne constitution des digues et sous réserve que la diminution du lit majeur inondable ne soit pas préjudiciable pour la propagation des crues aval.

La solution curative peut consister à remettre la rivière dans son lit, principalement pour ne pas prolonger l'érosion progressive. L'érosion régressive a déjà commencé et peut nécessiter de construire un seuil amont ou de conforter les fondations du premier seuil amont. Remettre la rivière dans son lit peut être plus coûteux que de la laisser dans son nouveau tracé, surtout si l'exploitation de la gravière était finie. Un seuil évite l'érosion régressive, mais l'érosion progressive continuera. Un calcul de débit solide par une formule de type Meyer-Peter (cf. chapitre 2, § 8.1) donnera un ordre de grandeur de la durée du comblement du bassin et donc de la durée de l'érosion progressive. Nous voyons là un exemple où, si le tracé n'est pas rétabli, nous pouvons considérer qu'un seuil d'irréversibilité est franchi.



**Figure 7 – capture d'une gravière**

➤ Lorsque la capture de la gravière est évitée grâce à des protections efficaces, la gravière n'a pas de conséquence directe sur la morphologie des cours d'eau. Toutefois, si celui-ci a une dynamique latérale active, les protections empêchent les migrations latérales et s'opposent à l'alimentation du cours d'eau en matériau alluvial. Les conséquences morphologiques sont alors une tendance à l'érosion progressive. Elle est cependant moins rapide que si les prélèvements avaient lieu dans le lit



mineur. Pour de telles rivières actives, il est donc conseillé d'éloigner au maximum les nouvelles implantations du lit mineur pour diminuer les risques de capture tout en autorisant les migrations latérales.

➤ La troisième raison pour laquelle les gravières en lit majeur peuvent avoir une influence morphologique tient aux aménagements "annexes" qui sont souvent réalisés : calibrage du lit pour diminuer la fréquence des submersions et limiter le risque de capture, endiguements de mise hors d'eau des bassins, protections de berge...

Au total, il convient d'exercer une surveillance attentive des bassins en fin d'exploitation et de recommander des implantations nouvelles éloignées du lit mineur, surtout pour les rivières à dynamique latérale active. Nous reviendrons sur cet aspect au début du chapitre 6 à propos de la notion "d'espace de mobilité".

## 1.9 - Enlèvement des atterrissements <sup>2</sup>

Une tendance forte consiste à dégager les atterrissements dans les coudes de rivière au titre de l'entretien. Les riverains associent souvent la cause des érosions de berge concave à la présence d'un banc sur la berge opposée. Dans certains cas, les granulats ainsi prélevés peuvent avoir une valeur marchande, ce qui accroît la tendance à vouloir les enlever soit pour protéger les berges (croiton) soit pour diminuer la fréquence des submersions.

En fait, ces atterrissements ne sont que le résultat visible à l'étiage, d'une évolution continue des coudes et du profil en long. Enlever ces atterrissements n'est donc nullement une opération de mise à niveau du lit : c'est bien une augmentation de section ; le lit est capable de se remettre à niveau de lui-même. Autrement dit, en enlevant les bancs de gravier, on redéclenche un processus d'enfoncement du lit, ce qu'il convient absolument d'éviter.

Nous signalons les exceptions à cette recommandation générale pour lesquelles des interventions peuvent être recommandées :

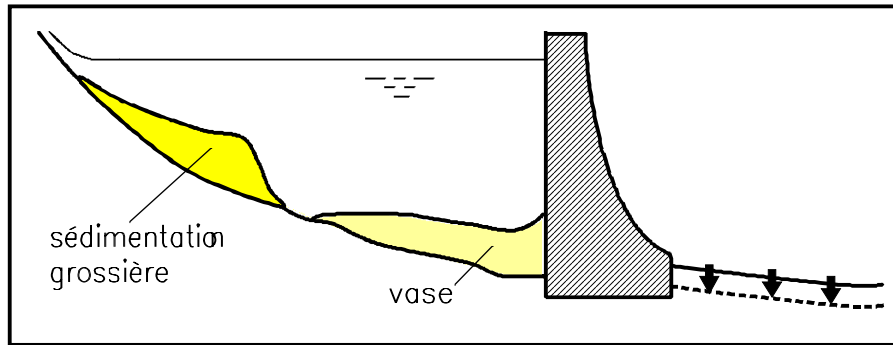
- \* végétalisation des bancs ;
- \* renvoi d'un courant réfléchi sur la berge opposée ;
- \* rivière en phase d'exhaussement jugé préjudiciable ;
- \* fort dépôt de matériaux très grossiers amenés par un affluent torrentiel ;
- \* lit remblayé à la suite d'un épisode exceptionnel et généralisé.

## 1.10 - Influence des barrages

La retenue d'un barrage joue le rôle d'un énorme décanteur. Les matériaux solides transportés par le cours d'eau sont déposés du fait du ralentissement de la vitesse. Un tri granulométrique s'opère avec dépôt des éléments les plus grossiers à l'entrée de la retenue (figure 8). Les éléments plus fins se déposent plus à l'aval. Les végétaux et animaux (zooplancton, poissons...) créent de la matière organique qui sédimente également, le tout formant une vase plus ou moins riche en matière organique qui se consolide rapidement. Les opérations de vidange n'arrivent qu'à extraire vers l'aval le bouchon de vase proche de l'orifice, et le comblement progressif de la retenue est irréversible. Ce phénomène est très marqué dans les pays du Maghreb.

---

<sup>2</sup> Atterrissements et dépôts sont utilisés de manière synonyme.



**Figure 8- comblement d'une retenue**

Une autre influence forte a lieu à l'aval qui est parfois oubliée. Schématiquement, elle est due à la fois à la réduction de débit et au déversement d'eau claire.

Pour tous les barrages, avec ou sans dérivation, le premier mécanisme aval est dû au lâcher d'une eau pratiquement débarrassée de toute charge solide. Le principe de saturation en débit solide explique que l'écoulement doit prélever des matériaux sur le fond ou sur les berges. Sauf dans les cas où l'écoulement atteint le substratum, c'est sur le fond que les matériaux sont prélevés. La rivière s'enfonce donc selon un mécanisme d'érosion progressive, comme nous l'avons vu pour les prélèvements.

Pour les retenues où l'eau est prélevée (dérivation, pompage), il y a une réduction souvent très forte du débit à l'aval du barrage. La végétation peut alors coloniser un espace autrefois occupé par l'eau. Mais les fortes crues, qui sont peu atténuées par la retenue, entraînent des débordements plus graves mais aussi des arrachements d'arbres, en particulier les peupliers, alors que les saules et les aulnes résistent mieux. L'expérience montre que ces arrachements sont modérés pour une crue pointue mais peuvent être très importants pour des crues longues capables d'affaiblir l'appareil racinaire. Les saules maintenus ralentissent les écoulements et favorisent les dépôts de limons fins qui épaississent les bancs et consolident l'implantation des saules. Les vases relarguées lors des lâchures fertilisent les bancs et favorisent la croissance des espèces ligneuses.

Tous ces mécanismes entraînent une réduction notable et durable de la largeur du lit mineur.

### 1.11 - Influence des seuils (sans dérivation)

Les seuils ont pour conséquences :

- ◆ de provoquer un atterrissement à leur amont ;
- ◆ de réduire le transport solide tant que le seuil n'est pas complètement atterri, ce qui provoque une érosion progressive ; celle-ci est arrêtée lorsque le seuil est atterri et peu à peu la rivière retrouve son profil initial à l'aval du seuil, s'il n'y a pas d'autres atteintes au milieu.

Lorsqu'une érosion régressive atteint un seuil, il faut être attentif au risque d'effondrement du seuil si celui-ci n'est pas fondé au substratum. Mais, même un seuil fondé au substratum peut être mis en danger par une érosion régressive, car l'augmentation de la hauteur de chute accroît les gradients et augmente les risques de contournement par les rives.

## 1.12 - Dérivations avec restitution

Considérons une prise d'eau pour une micro-centrale placée sur un long canal de dérivation et fonctionnant au fil de l'eau. L'ensemble seuil + canal de dérivation est conçu pour que les matériaux charriés par la rivière ne soient pas dérivés car ils viendraient combler peu à peu le canal et éroder les turbines. Il en irait de même si nous avions considéré un canal d'irrigation, la différence étant que l'intégralité du débit n'est pas restituée à l'aval dans ce cas. Le cas des dérivations sans restitution a été vu au paragraphe précédent.

Comme Lefort l'expose très bien, le problème de l'impact est assez complexe car plusieurs effets jouent dans des sens différents, la résultante des effets pouvant changer dans le temps [41]. La figure 9 illustre les trois temps de la recherche d'un nouvel équilibre dynamique. Le repère (0) est relatif à la situation initiale, les repères (1) et (2) marquent les deux premières phases où la rivière s'auto-ajuste aux modifications imposées et le repère (3) correspond à la dernière phase d'ajustement, c'est à dire au nouvel équilibre dynamique.

- Dans un premier temps, le nouveau seuil entraîne deux ajustements :
  - des dépôts se produisent en amont du seuil dus au ralentissement dans le remous (dépôt régressif);
  - une érosion progressive légère affecte l'aval du seuil qui a un débit solide presque annulé donc insuffisant même pour le débit liquide diminué. Dans ce secteur, la pente diminue.
- Dans le même temps, la restitution permet à l'aval de bénéficier d'un débit liquide inchangé mais avec un débit solide inférieur, d'où deux autres ajustements :
  - une érosion progressive qui s'enclenche à l'aval de la restitution et qui enfonce le niveau de la rivière au droit de la restitution ; dans ce secteur, la pente diminue également ;
  - cet enfoncement provoque en amont une érosion régressive qui remonte dans le tronçon de rivière court-circuité. Dans ce secteur, la pente augmente.
- Dans un second temps, l'atterrissement du seuil est achevé et le tronçon de rivière court-circuité bénéficie à nouveau de tout son débit solide, mais le débit liquide est inférieur, d'où deux nouveaux ajustements :
  - des dépôts se produisent à l'aval du seuil car le débit liquide diminué ne suffit pas à faire transiter le débit solide retrouvé ; la pente augmente donc en aval du seuil (exhaussement progressif) ; l'exhaussement permet au fond du cours d'eau de rattraper le niveau initial puis même de le dépasser, avec une pente adaptée à un débit solide inchangé et un débit liquide inférieur. Cette pente est donc supérieure à ce quelle était avant l'aménagement.
  - plus à l'aval, les érosions régressives et progressives se poursuivent comme dans la phase 1, puis arrive le moment où les matériaux solides que le seuil laisse à nouveau passer arrivent. L'érosion progressive s'arrête, puis un dépôt progressif démarre qui compense peu à peu les conséquences de l'érosion régressive et de l'érosion progressive.
- Dans un dernier temps, les ajustements sont terminés, et un nouvel équilibre dynamique s'est institué :
  - l'aval de la restitution retrouve son niveau car pour lui rien n'a changé maintenant par rapport à la situation sans dérivation ;
  - le profil du tronçon court-circuité atteint un nouvel équilibre car sa pente est adaptée au nouveau ratio débit solide / débit liquide ; elle est supérieure à ce qu'elle était dans l'état initial.

Cet exemple est instructif car il met en jeu les quatre modes d'évolution, exhaussement ou enfoncement croisés avec régressif ou progressif. De plus, deux variables sont modifiées :

- l'une de contrôle (cf. chapitre 3, § 2.2) : le débit liquide, du fait de la prise d'eau ;
- l'autre de réponse : la pente, du fait du seuil.

La rivière se livre à des phases d'ajustements successifs qui convergent vers un nouvel équilibre dynamique, à tracé inchangé avec une pente diminuée en amont du seuil et augmentée en aval. Il n'y a pas eu franchissement d'un seuil d'irréversibilité et d'ailleurs si l'on rasait le seuil et fermait la dérivation, l'état initial serait à nouveau retrouvé après quelques ajustements. Si par contre, la phase intermédiaire d'enfoncement aux environs de la restitution avait mis à nu des matériaux à caractéristiques très médiocres, l'enfoncement aval aurait pu prendre de l'ampleur et on aurait pu parler du franchissement d'un seuil d'irréversibilité. Une fois de plus, nous constatons l'importance de la pente qui est le paramètre d'ajustement essentiel. A chaque étape, la rivière a fait en sorte de se

doter de la pente nécessaire et suffisante pour transporter le débit solide qui lui parvient.

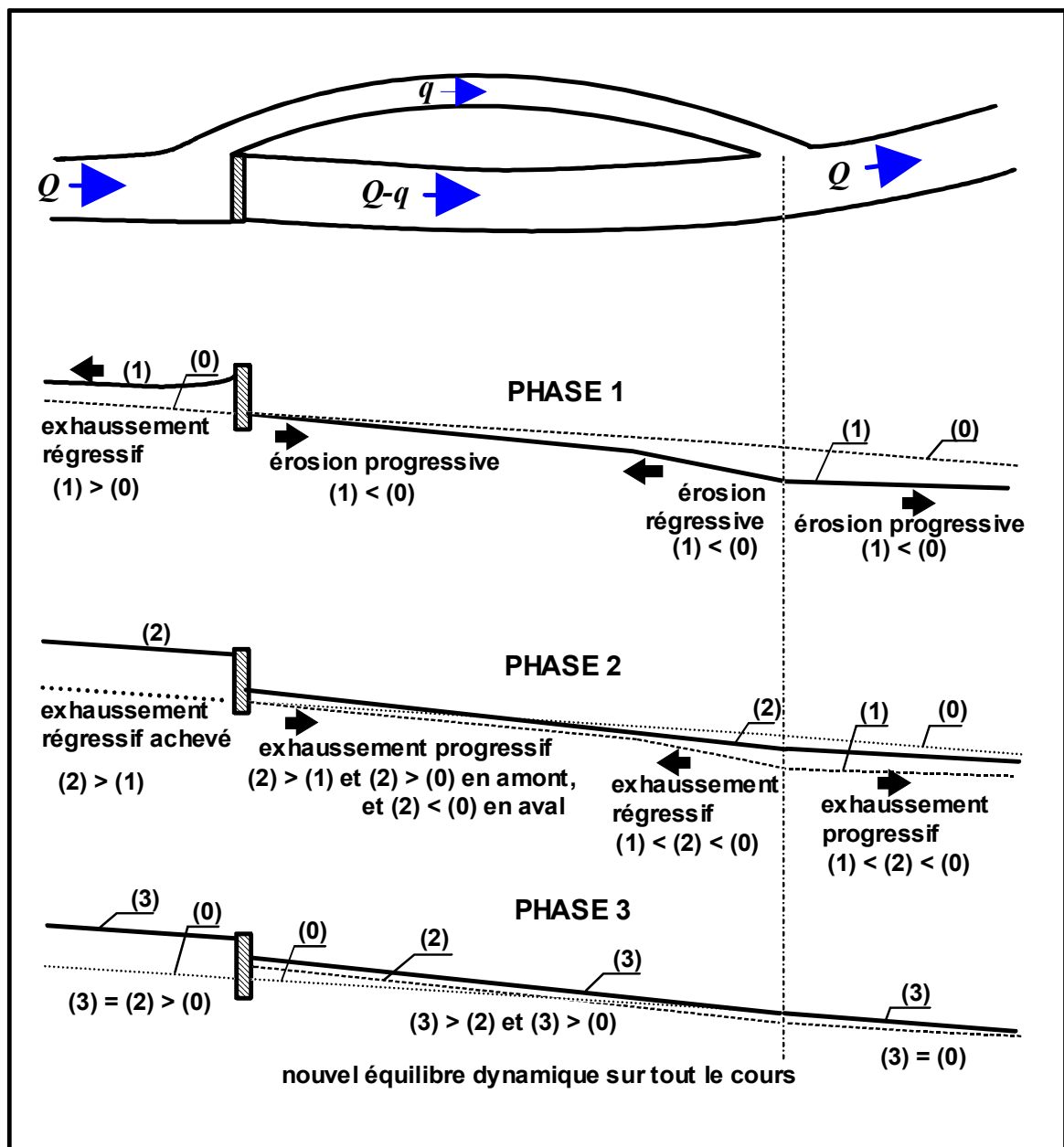


Figure 9 – conséquences successives d'une dérivation (inspiré de Lefort [41])

La végétation du tronçon court-circuité joue un rôle important. En effet, pendant une grande partie de l'année, l'essentiel du débit peut être dérivé. Dans ces cas, la surface mouillée est réduite comparé à la situation avant dérivation. La végétation arbustive se rapproche alors d'avantage de l'axe du lit. En fortes eaux, cette végétation favorise le dépôt de limons fins et au total, la section du lit a tendance à se refermer. Pendant les fortes crues, le canal de dérivation participe faiblement aux écoulements s'il est contrôlé par une usine hydroélectrique. Le tronçon court-circuité se trouve alors incapable d'évacuer les débits qu'il transitait auparavant et les débordements sont accrus et plus fréquents. Cette situation est très fréquente en rivière de plaine. Un entretien de la végétation doit être plus régulier si l'on veut éviter cette aggravation.

### 1.13 - Influence des reforestations du bassin versant

Les reboisements et les corrections torrentielles réalisés au siècle dernier dans le cadre d'un

spectaculaire programme de restauration des terrains en montagne ont très fortement diminué les risques de ravinement de terrain, de laves torrentielles ... Par voie de conséquence directe, ils ont diminué la source d'approvisionnement en matériaux granulaires, ce qui a entraîné une érosion progressive de l'ensemble des cours d'eau alpins.

La construction de retenues hydroélectriques et les prélèvements de graviers dans le lit mineur qui ont marqué la première moitié du siècle ont eu les mêmes conséquences, et ont entraîné une incision importante de ces cours d'eau.

## 1.14 - Conclusion sur les érosions régressive et progressive

Il convient d'insister sur les traits distinctifs des deux mécanismes.

L'érosion régressive est un phénomène rapide : il y a donc urgence à intervenir si un ouvrage est concerné. Par exemple, si un seuil amont est menacé d'effondrement car l'érosion régressive mettra à nu son parafouille aval, une solution praticable en urgence consiste à battre un rideau de palplanches.

Tout au contraire, l'érosion progressive peut se prolonger pendant plusieurs années, le temps que la rivière puisse compenser le déficit en matériaux solides en prélevant sur son fond ou ses berges. Les matériaux les plus faciles à prélever au fond sont les plus fins. Le processus d'érosion progressive présente donc toutes les caractéristiques pour engendrer un pavage du fond (cf. chapitre 2, § 7). La pente diminue par rapport à la situation antérieure.

La construction d'un seuil constitue la parade pour contrer les conséquences d'une érosion régressive. Il suffit d'un seul ouvrage, placé à l'amont immédiat du secteur responsable. Ce seuil doit être fondé suffisamment profond pour ne pas être déchaussé. Il n'a pas besoin d'être surélevé par rapport aux fonds antérieurs à l'érosion régressive. Il ne doit d'ailleurs pas l'être car sinon il bloquerait le débit solide, au moins temporairement, ce qui entraînerait une érosion progressive.

Mais attention, un seuil ne constitue pas la parade à une érosion progressive, contrairement à ce que pensent certains. En effet, le déficit en matériaux solides reste exactement le même en aval du seuil. Il n'y a pas de véritable remède sauf l'ajout de matériaux dans le lit, ce qui est peu imaginable. Il est cependant possible d'arriver à une solution en contournant le problème. Puisque la rivière a besoin de davantage de matériaux que ce dont elle peut disposer, remplaçons là par une rivière moins gourmande, c'est à dire de plus faible pente. Il s'agit en fait de construire une série de seuils qui atténuent la pente. Si tous les seuils ont la même hauteur, ils peuvent être de plus en plus espacés au fur et à mesure que les affluents apportent une charge solide atténuatrice du déficit relatif. On voit bien qu'une telle solution conduit à un aménagement modifiant considérablement le milieu qui se trouve dégradé et banalisé en termes de diversité. Si l'on refuse cet aménagement lourd, il reste à admettre les conséquences de l'enfoncement aval du lit et à protéger localement les éventuels ouvrages menacés (ponts, seuils, prises ...).

## 2 - ENLIMONAGE DES BANCs

L'enfoncement du profil en long par érosion régressive ou progressive a pour conséquence à court terme de raréfier la mise en eau des bancs. Ceux-ci se trouvent perchés. D'une part, ils ne participent plus autant qu'avant à la dynamique du transport solide vers l'aval. D'autre part, ils se végétalisent plus facilement. Lors des crues, la végétation des bancs ralentit l'écoulement et favorise les dépôts de limons. A leur tour, les limons favorisent la croissance des espèces ligneuses. Les bancs se consolident de plus en plus et finissent par ne plus participer à la dynamique fluviale. La conséquence morphologique majeure est une tendance à la diminution de la largeur du lit.

Au résultat, contrairement à ce que l'on pourrait espérer, une rivière en cours d'incision aura une capacité d'écoulement diminuée et une tendance accrue à la formation d'embâcles.

En résumé, dans une rivière à forte charge solide, l'incision du lit entraîne une diminution de la largeur d'écoulement pour les crues moyennes. A défaut d'entretien régulier, les débordements sont aggravés.



### 3 - ÉVOLUTIONS DU LIT MAJEUR

Sauf dans les zones en déprise agricole, l'évolution des façons culturales des dernières décennies a été forte avec d'avantage de labours. Cela modifie le transport solide en accroissant le transport des fines en suspension.

On a déjà dit que ces fines avaient très rarement un rôle morphogène dans le lit mineur ; c'est le transport par charriage qui a un rôle morphogène.

Cependant une augmentation significative du pourcentage de fines peut entraîner une surélévation du lit majeur à l'occasion des crues importantes. Cette surélévation a une double conséquence hydraulique :

- le lit majeur est moins fréquemment inondé ;
- mais lorsqu'il est inondé par des crues extrêmes, l'inondation gagne des zones qui auparavant n'étaient pas inondables. Le champ d'inondation s'agrandit latéralement. Il ne faut donc pas oublier que l'effet de translation vers le haut du lit majeur a des conséquences latérales également ! Pour le diagnostiquer, il faut avoir recours à la datation des sédiments.

### 4 - ÉVOLUTIONS DU TRACÉ EN PLAN

Il n'est pas toujours possible de considérer que les berges sont fixées et que le tracé en plan est immuable. Les modifications imposées soit à la géométrie soit à la charge solide à évacuer peuvent modifier le style fluvial<sup>3</sup> ou bien le tracé, dans un style inchangé.

#### 4.1 - Évolution du style fluvial

En pratique lorsqu'un style fluvial évolue en France, c'est toujours pour passer d'un tracé en tresses à un tracé à méandres ou tout au moins sinueux<sup>4</sup>. La cause est le déficit en matériaux solides provoqué par la reforestation des terrains en montagne, les corrections torrentielles, les grands barrages hydro-électriques et surtout les prélèvements de granulats dans les lits mineurs. L'enfoncement qui en résulte à l'aval raréfie la submersion des bancs qui peuvent durablement se végétaliser. Cette fixation des bancs en supprimant la source de matériaux qu'ils représentent aggrave ainsi l'enfoncement du lit mineur. Le chenal principal se met à avoir un rôle de plus en plus prépondérant, les chenaux secondaires se remblayant par une charge sédimentaire fine et se végétalisant peu à peu.

Or, les rivières en tresses, grâce à leur grand dynamisme fluvial, modifient rapidement leurs formes et par conséquent rajeunissent fréquemment les espèces végétales. Il en résulte un milieu particulièrement diversifié. A cet avantage écologique s'ajoute un avantage hydraulique. Les lits en tresses sont larges et boisés. Ils provoquent un véritable effet d'écrêtement des crues dont bénéficient les riverains aval.

Faut-il pour autant préserver un tronçon en tresses lorsqu'il commence à évoluer vers un tracé sinueux avec chenal unique ?

Des actions locales de type décapage des bancs et recreusement de chenaux secondaires ont une utilité car elles permettent de compenser en partie le déficit solide. Mais elles ne s'attaquent pas à la source du mal et ne suffisent vraisemblablement pas à éviter le passage progressif d'une rivière en tresse vers une rivière à bras unique. S'attaquer à la source du mal est assez peu réaliste, quand il s'agit des reforestations entreprises au siècle dernier voire même de la progression des espaces boisés suite à la déprise agricole. Par contre, la suppression des prélèvements dans le lit mineur va dans le bon sens. Mais c'est une mesure qui est déjà prise. Permettra-t-elle à certains tronçons de revenir vers des tracés en tresses ? Sans doute pas, mais elle doit permettre de maintenir les lits en tresse existants. En outre, l'abaissement des seuils de correction torrentielle lorsqu'il est possible

<sup>3</sup> Voir chapitre 3, paragraphe 3.

<sup>4</sup> L'inverse s'est produit aux XVII<sup>ème</sup>, XVIII<sup>ème</sup> et début du XIX<sup>ème</sup> siècles lors du petit âge glaciaire qui a considérablement augmenté les volumes solides transportés.

permet une remobilisation d'une partie du matériau solide stocké.

## 4.2 - Évolution du tracé, sans changement du style fluvial

Le tracé peut évoluer pour deux raisons différentes.

Tout d'abord, les évolutions du profil en long par enfoncement que l'on vient de décrire peuvent provoquer à leur tour des glissements et érosions de berges. Dans bien des cas il n'en résultera pas une modification profonde du tracé. Il faut donc bien distinguer le processus fondamental et généralisé qui est l'enfoncement, et des processus locaux de déformation de berge même s'ils peuvent être spectaculaires.

Mais, il se peut que les berges soient très friables. La rivière pourra alors compenser son déficit en matériaux en prélevant à la fois sur le fond et sur les berges. On verra donc des berges se déformer là où auparavant elles étaient réputées stables. En quelque sorte, l'aménagement a redynamisé le cours d'eau, ce qui est quand même gênant pour l'occupation humaine d'autant que cela n'a pas forcément été prévu.

Autre exemple, dans une rivière trop élargie, on a vu plus haut en 1.3 que la tendance était à l'exhaussement du fond. Dans bien des cas, la rivière dépose en fait des bancs de gravier ou de sable et sinue entre ceux-ci. A terme, elle adopte un pseudo-lit mineur sinueux dans un lit trop large. Elle compense donc le déséquilibre qui lui a été imposé par un double processus :

- réduction de pente et de section lorsqu'elle transporte de petits débits liquides ;
- dépôts pendant les périodes de gros débits.

Enfin, dans les deux cas, si le déplacement en plan même modeste amène le cours d'eau près d'une dépression (ancien lit, étang, gravière), un contournement devient possible. Le tracé est alors brutalement et irréversiblement modifié. Nous l'avons expliqué plus haut à propos des gravières au paragraphe 1.8.

## 5 - ÉVOLUTION GLOBALE, EN PLAN ET EN PROFIL

Les évolutions latérales et verticales doivent être étudiées globalement car en fait la rivière obéit à une seule logique. Nous pouvons tenter de l'approcher en considérant les variables de contrôle et les variables de réponse définies au chapitre 3, paragraphe 2.

Les variables de contrôle, principalement le débit et le débit solide, sont imposées au cours d'eau par la géologie et le climat, et peuvent être modifiées par des aménagements. Les variables de réponse sont plutôt des degrés de liberté dont dispose le cours d'eau, mais peuvent aussi être modifiées par des aménagements.

Les dérivations, les barrages, les gravières, le boisement du bassin versant modifient les variables de contrôle (débit et débit solide). Les calibrages, les coupures de méandre, les seuils modifient des variables de réponse (largeur, sinuosité, pente, profondeur). Dans les deux cas, la rivière comme on l'a vu adapte à nouveau ses variables de réponse par exemple en s'enfonçant, ou en changeant sa pente ou même en changeant son style. Elle aboutira à un nouvel équilibre dynamique. Selon l'ampleur et la pérennité du changement imposé, le nouvel état sera proche du précédent, ou bien il sera éloigné, un seuil d'irréversibilité ayant été franchi. Attention, un nouvel état dans lequel la dynamique serait plus faible, pourrait laisser penser qu'un véritable équilibre (au sens statique) est atteint et qu'enfin le cours d'eau a été assagi. Si la dynamique fluviale est plus faible, l'équilibre n'en reste pas moins dynamique et au passage nous aurons perdu en terme de diversité.

Enfin, rappelons le rôle particulier de la pente, paramètre d'ajustement privilégié. Face à des modifications naturelles ou dues à l'homme, la rivière fait en sorte de se doter de la pente nécessaire et suffisante pour transporter le débit solide qui lui parvient.



## 6 - AUTRES CONSÉQUENCES DES TRAVAUX EN RIVIÈRE

Les travaux qui entraînent un enfoncement important du lit entraînent aussi un abaissement de la nappe phréatique, ce qui a des conséquences négatives sur les prélèvements d'eau potable ou d'eau pour l'irrigation mais aussi pour les milieux naturels. Les arbres de rive sont asséchés et peuvent mourir, les zones humides se trouvent irrémédiablement asséchées, les bras morts sont déconnectés de la rivière... Toutes ces perturbations peuvent être catastrophiques lorsque la nappe s'enfonce de 5 à 8 mètres comme cela s'est produit sur la basse Durance, sur la Dordogne...

Lorsque le substratum rocheux est atteint, la rivière draine la nappe toute l'année et il n'y a plus aucune réserve souterraine permanente. De plus, la disparition du fond alluvial appauvrit le milieu qui offre beaucoup moins de microhabitats.

Si l'on sait prévenir les conséquences morphologiques en construisant des seuils, il n'en va pas de même pour la nappe.

En effet, le seuil va compenser une érosion régressive de matériaux plutôt grossiers par un dépôt de matériaux plutôt fins à son amont. Il peut en résulter un colmatage du lit et une diminution de la réalimentation de la nappe par la rivière. Des puits de réalimentation doivent alors être creusés...

En zone maritime, suite à l'enfoncement du lit, la marée voit son influence remonter vers l'amont et le biseau salé progresse vers l'intérieur des terres. La diminution d'apports solides à la mer provoque le recul des plages maritimes et l'érosion des dunes, imposant de nouveaux aménagements pour protéger les biens et les personnes.

Au total, on voit bien que les conséquences de prélèvements excessifs dans le lit mineur sont nombreuses :

- appauvrissement hydrobiologique et baisse de la qualité piscicole ;
- diminution de la ressource en eau par abaissement de la nappe ;
- suppression des zones humides ;
- banalisation de la ripisylve ;
- appauvrissement paysager.

➤ En France, les prélèvements de sables et graviers sont maintenant interdits dans le lit mineur des cours d'eau. Ils sont reportés dans les lits majeurs. Là, leur influence sur la dynamique fluviale est sensiblement moins néfaste, à condition que l'on évite absolument la capture des zones draguées. En conséquence, les berges concaves doivent être confortées ou au moins surveillées dans les zones susceptibles d'être érodées et de permettre la communication avec les bassins excavés. Dans les lits majeurs larges, il serait nettement préférable de ne pas installer de nouvelles gravières dans l'espace de mobilité du cours d'eau et donc de les éloigner le plus possible du lit mineur [19].

## 7 - CONCLUSION SUR L'ÉVOLUTION DES RIVIÈRES AMÉNAGÉES

La rivière est un milieu non figé qui obéit à sa propre logique. Cette logique pourrait certes être approchée en découplant les problèmes :

- logique de l'écoulement ;
- logique du transport solide ;
- logique de la morphologie fluviale ;
- influence de la végétation.

Mais seule l'approche globale de ces logiques peut éviter des échecs sous forme de travaux rapidement remis en cause ou ignorés. Toute intervention doit être précédée d'une phase de diagnostic du comportement de la rivière sur un tronçon bien plus long que celui sur lequel on compte intervenir en envisageant bien différentes situations hydrologiques. L'aménageur ne doit pas se réfugier derrière le caractère exceptionnel d'un épisode pour justifier un comportement qui n'a pas été prévu. Heureusement, la rivière est son propre architecte<sup>5</sup> et sait montrer les solutions à qui sait l'observer.

---

<sup>5</sup> La rivière est son propre architecte. Ce remarquable raccourci est dû à Joël CACAS [3].