

Chapitre 4 : Les ouvrages de protection contre l'érosion

4.1. Introduction

L'érosion résulte de processus naturels et anthropiques par lesquels les sols des berges d'un cours d'eau sont arrachés, puis transportés sous forme de fines particules par les courants et déposés plus loin en aval. Ce processus sédimentaire est un élément fondamental de la dynamique des cours d'eau. Ce phénomène se produit lorsque les forces d'entraînement dues à la vitesse du courant et sa turbulence sont capables de vaincre le poids des particules, leur frottement l'une sur l'autre et leur cohésion éventuelle. Le choc est plus brutal lorsque la direction du courant fait un angle avec la berge. C'est donc un phénomène affectant principalement les berges concaves des courbes, mais se produisant aussi dès qu'un obstacle perturbe le courant.

La figure suivante illustre bien comment les obstacles peuvent favoriser l'érosion de la berge. Ainsi un arbre abattu peut provoquer l'érosion de la berge opposée d'une petite rivière, par courant réfléchi. Le tourbillon provoqué par le tronc d'un arbre en place peut éroder la berge. À l'aval d'un seuil, les tourbillons tendent à éroder les deux berges aval. Un rétrécissement créé par une souche avancée crée un courant de retour qui peut amorcer une encoche d'érosion (Degoutte, 2006).

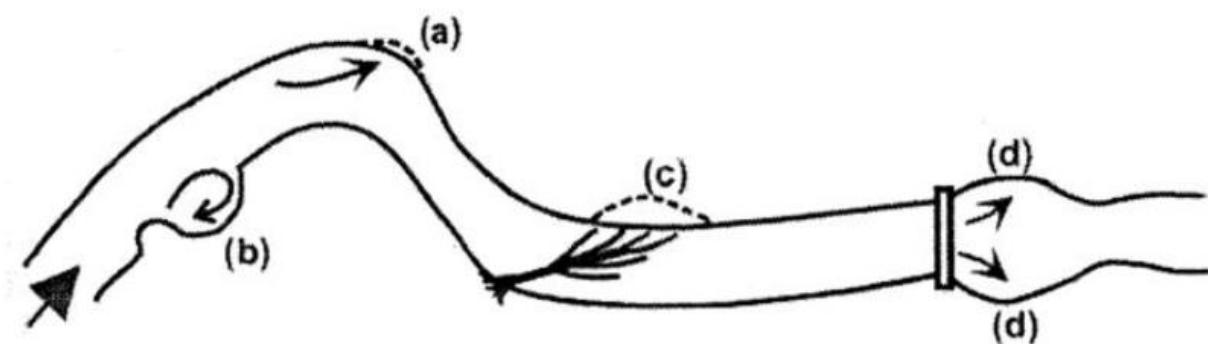


Figure 4.1.Exemples de zones sensibles à l'érosion : dans une courbe (a); par courant de retour (b); par courant réfléchi dû à un arbre tombé (c); par dissipation d'énergie à l'aval d'un seuil (d).

Lorsque les berges sont cohérentes, l'érosion par le courant peut conduire à la création de zones en surplomb. Cette possibilité est facilitée si les berges sont stratifiées avec à leur base des matériaux grossiers (graviers ou sables) et des limons à leur sommet. À terme, ces surplombs sont instables et s'effondrent brutalement sous leur propre poids. L'effondrement est une conséquence directe de l'érosion de la berge.

L'érosion est à la base un phénomène naturel influencé notamment par le climat, la topographie, le type de substrat ainsi que la couverture végétale. Ce phénomène peut toutefois être aggravé par certains facteurs de nature anthropique. Ainsi les pratiques culturelles inadaptées à proximité des cours d'eau, le déboisement et/ou la régression du couvert végétal, la circulation de véhicules sur les berges et dans les cours d'eau, le passage de bateaux ou autres embarcations nautiques, l'urbanisation et le ruissellement urbain ainsi que les interventions en rivières (barrages, digues, etc.) sont tous des éléments qui peuvent accentuer l'érosion dans un cours d'eau.

4.2. Protection contre les érosions du lit

Diverses possibilités

Augmentation de la résistance du lit

- Lit artificiel (canal bétonné)
- Pavage du lit par des blocs en pierre (couche de pavage artificiel)
- Renforcer le lit par de gros blocs (rocher ou éléments en béton)

Réduction de la pente du lit

- Fixation du lit par des traversées (seuil en bois, pierres de taille, béton)
- Fixation du lit par des rampes de blocs
- Changement du tracé du cours d'eau (prolongement du talweg par des méandres, etc...)

Elargissement du lit

- Elargissement sur longue distances
- Elargissement local
- Déivation partielle du cours d'eau dans un lit secondaire

Intervention sur le transport solide

- Renversement du gravier dans le cours d'eau (localement à l'amont du tronçon érodé)

4.3. Stabilisation des lits contre l'érosion

Fixation du lit par des ouvrages transversaux :

- a) Seuil
- b) Coursier bétonnier
- c) Rampe des blocs
- d) Rampe des blocs à grande rugosité
- e) Coursier avec pavage artificiel
- f) Seuil en bois

- g) Seuil de fixation en blocs
- h) Seuil de fixation en bois
- i) Traversées
- j) Seuil en bois avec refuge pour poissons

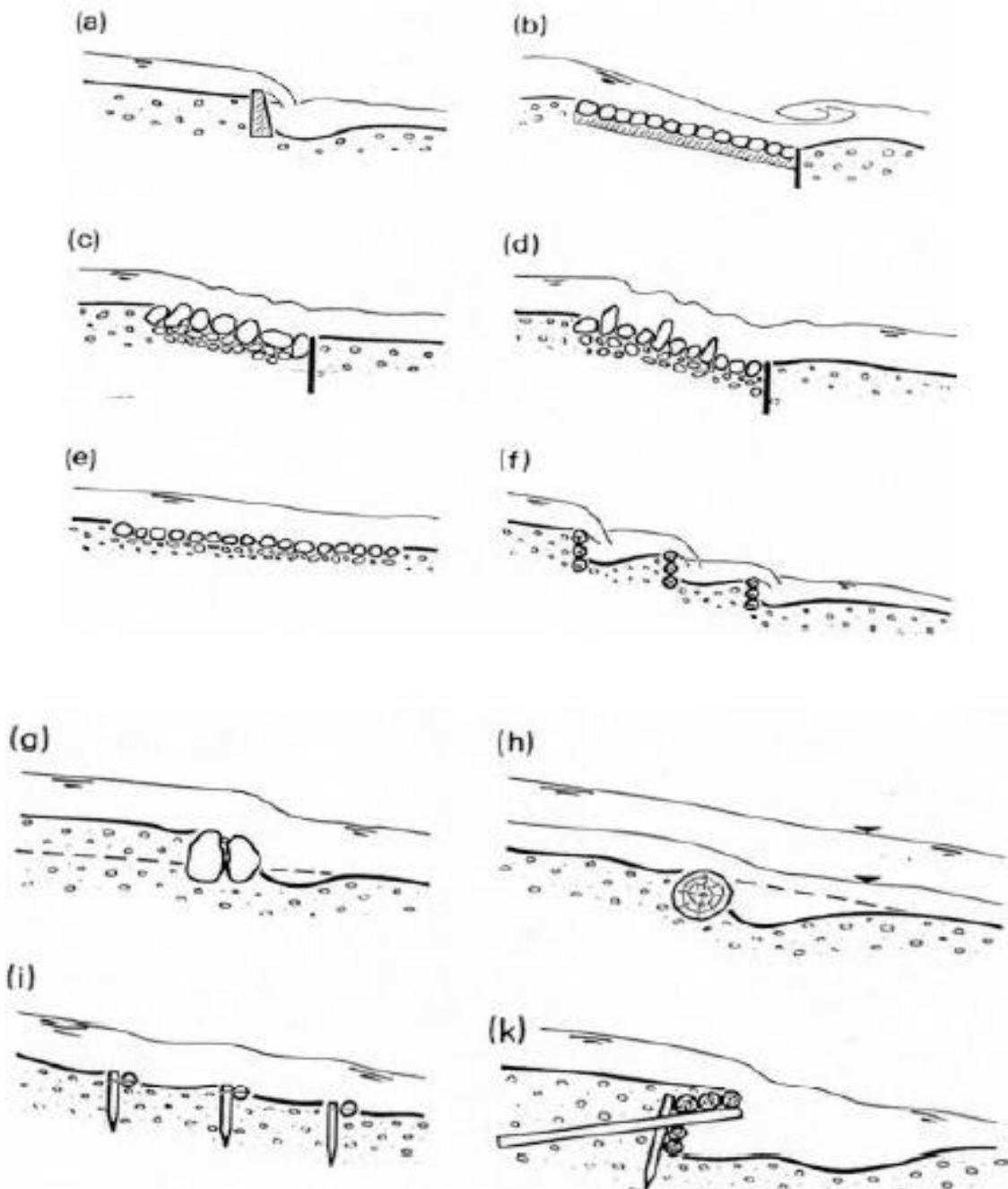


Figure 4.2. Les ouvrages transversaux : a)Seuil b) Coursier bétonnier c) Rampe des blocs
 a) Rampe des blocs à grande rugosité e) Coursier avec pavage artificiel f) Seuil en bois
 g) Seuil de fixation en blocs h) Seuil de fixation en bois i) Traversées k) Seuil en bois avec
 refuge pour poissons

4.4. Protection des rives (berges)

Differentes techniques sont utilisées pour la protection des berges lorsque le sol est inconsistant, qui sont comme suite

4.4.1. Techniques lourdes

Cette technique consiste à ériger le long de la berge endommagée par l'érosion un "mur" en rochers d'épaisseur variable et de combler l'espace laissé vide par un matériau meuble, par exemple de la terre, du sable ou des graviers. Entre les rochers et ce matériau on place généralement un matériau géotextile ou un film plastique pour que la terre ne s'évacue pas par ruissellement (affouillement, renard...) de la berge vers la rivière. Ce "filtre" doit laisser passer l'eau et doit retenir les fines et les cailloux. Pour que la ligne d'enrochement tienne, la première rangée de roches, sur laquelle repose tout l'ouvrage, est quasiment complètement enfouie dans au moins 60 cm de sol et constitue l'ancrage. On construit généralement l'ouvrage de sorte à ce qu'il tienne seul sans les remblais de terre; on s'assure ainsi de sa solidité.

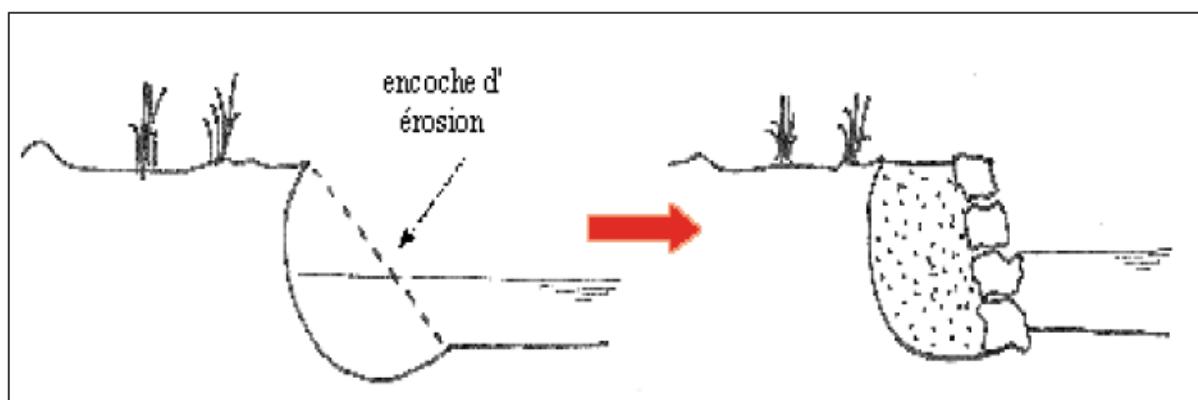
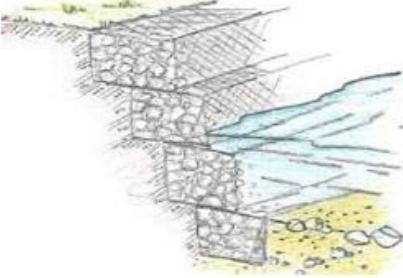
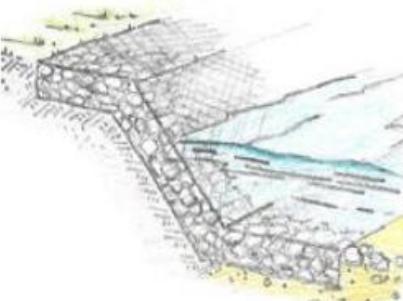
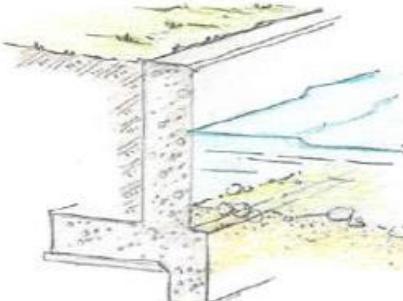
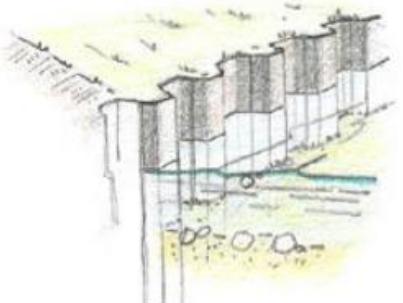


Figure 4.3 Protection d'une berge

Pour un même ouvrage les matériaux utilisés doivent être de qualité homogène. Les blocs de roche doivent posséder une dureté suffisante pour pouvoir être déversés en vrac et manipulés avec des engins mécaniques. Ils doivent être homogènes et propres autant que possible, ne s'altérer ni à l'air ni à l'eau et être exempts de fissures.

Tableau 4.1. Les matériaux utilisés pour la protection des berges

Gabions	<p>Enveloppes de grillage remplies de pierres, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation.</p>	
Matelas-gabions	<p>Matelas construits sur le principe des gabions d'environ 20cm d'épaisseur. Ils sont plus discrets que les gabions et se végétalisent plus facilement. Ils s'adaptent bien en cas d'évolution du lit et des berges</p>	
Murs	<p>Constitués de pierre, moellons ou béton ils remplacent la berge et font du cours d'eau un canal. A réservé pour les agglomérations, leur intégration au site est difficile et relève de l'urbanisme.</p>	
Palplanches	<p>Feuilles de métal épais préformées et emboîtables les unes dans les autres. Protection rigide à réservé à des usages précis: restauration de chaussées, consolidation d'anciennes protections, de ponts...</p>	

Les caractéristiques géométriques des blocs seront définies en fonction de la puissance érosive du cours d'eau, de la vitesse maximale, de la hauteur d'eau et de la pente du talus. De manière générale la masse moyenne des blocs est de l'ordre de la tonne. On cherche le plus souvent à avoir le plus de blocs possible de la même taille, mais on peut avoir des blocs pesant largement jusqu'à plusieurs fois la masse moyenne choisie par le maître d'œuvre.

Les roches doivent être de préférence à angles marqués et de forme tétraédrique en respectant un rapport compris entre 1 et 2 entre la longueur et l'épaisseur.

Les caractéristiques physiques des matériaux permettent de valider la solidité de l'ouvrage.

On recherche des matériaux non calcaires ayant un poids spécifique apparent sec de l'ordre de 2500kg/m³. La sensibilité au gel doit être très faible et sa résistance à la compression élevée.

C'est le maître d'œuvre qui décide des matériaux qu'il va utiliser et c'est à lui de fixer la qualité des matériaux qu'il recherche en fixant une commande la plus précise possible concernant les caractéristiques géométriques et physiques précitées.

a- Autres types de confortement de berges

Le principal inconvénient de ces techniques est de modifier le régime hydraulique de la rivière le long du linéaire mis en place. L'écoulement est en effet accéléré car on a diminué la rugosité de la berge. Ainsi il existe des risques de déstabilisation de la berge en amont, en aval ou en rive opposée de l'ouvrage, par épanchement de l'énergie hydraulique supplémentaire créée par la survitesse. Le schéma suivant montre les zones qui seront plus sensibles à l'érosion autour de l'ouvrage:

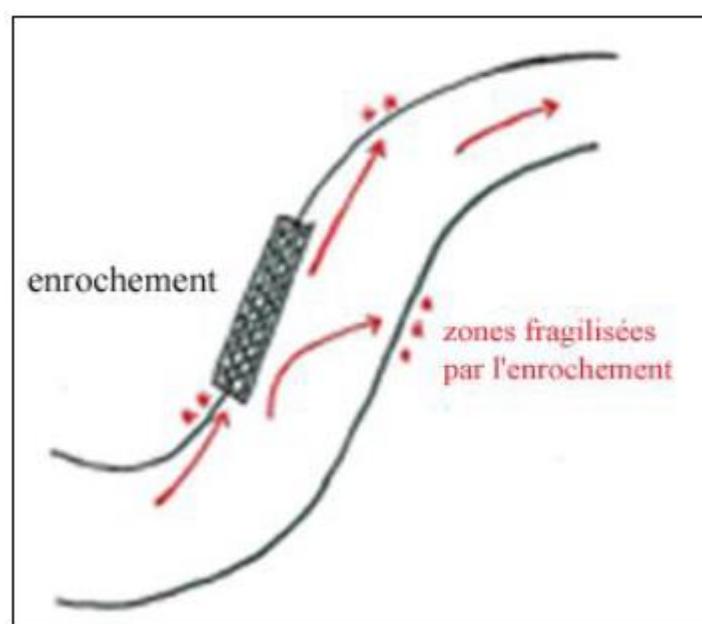


Figure 4.4. Les zones sensibles à l'érosion autour d'un ouvrage

La faiblesse de l'enrochement est sa mauvaise résistance au marnage rapide et aux variations saisonnières du régime de la rivière. Souvent réalisé sans assez de soins il peut s'affaisser en son milieu ou s'arracher en amont et aval. L'amont et laval sont les points les plus sensibles de la ligne d'enrochement, si l'eau arrive à passer derrière les blocs amont tout l'ouvrage est menacé par l'érosion et peut assez rapidement s'effondrer. L'enrochement doit donc être correctement ancré en amont et en aval par des blocs de taille plus importante que sur le reste de la ligne et déborder largement de la zone à conforter. On peut aussi dans le cas où l'ouvrage se situe non loin en aval d'un affluent prolonger l'enrochement jusqu'au croisement des cours d'eau, le coût s'en trouve alors sérieusement augmenté.

D'autre part l'absence du filtre entre les roches et la berge permet l'arrachement des éléments les plus fins de la berge par ruissellement, les blocs sont alors désolidarisés et s'affaissent.

- Le manque d'entretien de ces ouvrages peut aussi s'avérer très coûteux: si le contrôle de la tenue de leur base ne se fait pas et qu'il y a affaissement, les réfections qui sont alors nécessaires sont très coûteuses car parfois synonymes de reconstruction complète de l'ouvrage. De plus si on n'empêche pas l'implantation d'arbres, tels que les peupliers, entre les rochers, le déracinement de l'arbre lors de forts coups de vent ou de crues entraîne le déplacement des blocs dans la rivière et le reste de l'ouvrage n'est plus efficace.

- L'avantage de ces techniques (si toute fois l'ouvrage est bien réalisé) est de pouvoir résister à des crues importantes et une forte agression hydraulique.

- D'autre part, durant la première année après l'installation il s'adapte à la forme de la berge par tassement des blocs il devient ainsi plus résistant.

- Ces techniques sont préférables lorsque des habitations sont très proches de la zone à conforter. Elles peuvent être placées à la verticale et nécessitent peu de place sur la berge (environ 1m).

- Un autre avantage est de pouvoir répondre à tout moment à une demande de confortement si le risque est imminent. En effet, quelle que soit la saison le matériau peut être disponible et l'efficacité de l'ouvrage est immédiate.

4.4.2. Techniques douces

Ces techniques sont basées sur l'utilisation de matériaux végétaux inertes ou vivants.

Le génie végétal favorise une protection naturelle des berges en conservant la végétation existante. Les buts principaux sont comme les techniques de génie civil d'offrir une solution efficace à un problème de protection des sols (érosion, glissement,...) tout en engendrant un

coût de réalisation raisonnable. Cependant l'essentiel de leur intérêt repose sur les objectifs suivants:

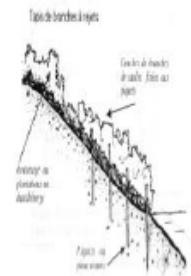
- considérer le cours d'eau comme un complexe formé d'un lit, de berges et de rives en relation avec le bassin versant et les nappes phréatiques
- maintenir une diversité maximale d'habitats aussi bien au niveau du lit que des berges et des rives
- garder une morphologie correcte et typique au cours d'eau
- éviter une structure rocheuse des berges là où elle n'existe pas naturellement
- respecter une distribution étagée de la végétation, du pied au sommet de la berge, régie par des conditions hydrauliques et hydrauliques
- intégrer l'ouvrage dans son site
- minimiser l'impact occasionné par l'implantation d'un ouvrage de stabilisation

Les protections en matériaux végétaux inertes sont faciles à réaliser sur de petits cours d'eau lorsqu'elles sont faites avec du bois pris à proximité. Elles sont plutôt destinées à la stabilisation des pieds de berges et s'accompagnent de plantations. Le matériau principal utilisé est le **saule**.

Les protections en matériaux vivants (enherbement, végétation buissonnante ou arbustive, arbres) font partie des opérations de végétalisation les plus simples qui consistent à mettre en terre des espèces vivantes qui vont coloniser le secteur aménagé. Les essences doivent être variées, adaptées au type de sol, au degré d'humidité et de préférence existant naturellement dans le secteur. Il est préférable d'éviter les alignements monotones. L'entretien (moyens techniques et humains, accès..) doit être prévu avant même la plantation.

La protection que les plantations apportent doit s'exercer sur l'ensemble du talus et le sommet de la berge (essences ligneuses de haut port). Généralement les plantations ne s'effectuent qu'en complément à d'autres techniques.

Tableau 4.2. Les matériaux végétaux utilisés pour la protection des berges

Type de protection	Description	Schéma
Enherbement	<p>Dispersion de graines d'herbacées. Vise à limiter le ruissellement et l'érosion en surface mais aussi pour certaines herbacées à stabiliser.</p> <ul style="list-style-type: none"> + Colonisation végétale de haute densité, très régulière, rapide, grandes surfaces + Garde certaines berges ouvertes et offre plus de lumière + Couverture protectrice de surface - Efficacité limitée en fonction de la pente et de la force d'arrachement du courant - Paysage monotone; nécessité de plantations d'arbres - Peut favoriser l'implantation d'essences colonisatrices non désirées 	
Arbres ou arbustes en berge	<p>Mise en terre d'espèces généralement ligneuses élevées en pépinière en sommet de berges, d'arbustes en mi-pente et de végétaux heliophytes prélevés sur le terrain en pied de berge.</p> <ul style="list-style-type: none"> + Intervention simple + Possibilité d'apporter la diversité botanique + Ralentissement de l'écoulement en cas de crue; dissipation d'énergie - Limite pour les cours d'eau à fortes contraintes hydrauliques - Efficacité faible dans un premier temps 	
Tapis végétal	<p>Branches de saule, munies de leurs rameaux, disposées en couches serrées de 20 à 30 cm d'épaisseur, le pied vers le bas, fixés solidement à des pieux de saule.</p> <ul style="list-style-type: none"> + Stabilisation de talus - Nécessité de stabiliser le pied de berge 	 <p>The diagram illustrates a cross-section of a bank protection using willow root wattles. It shows a steep bank slope. Labels indicate: 'Tapis de branches à rameaux' (willow root wattle mat) at the top, 'Gouge de tronc à saule' (willow trunk notch) in the middle, 'rameaux à planches en échafaudage' (willow branches as scaffolding planks) on the left, and 'pièce de pieux' (willow stake piece) at the bottom.</p>

L'efficacité des techniques précitées peut être améliorée par l'apport d'autres matériaux: les géotextiles. Ce sont des nattes faites de matériaux de synthèse ou de fibres naturelles.



Figure 4.5. Mise en place de couches de branches et recouvrement avec un géotextile putrescible

Les géotextiles ne sont que partiellement utilisés en génie végétal. En effet, leurs propriétés mécaniques et hydrauliques ne sont pas les seuls critères de choix mais aussi leur capacité à la végétalisation à savoir que des tiges et des racines doivent pouvoir les traverser. La durée d'efficacité d'un géotextile en génie végétal est limitée: il doit en fait assurer ses fonctions pour la durée nécessaire au développement d'un enracinement suffisant. Il est donc courant d'utiliser des géotextiles putrescibles qui formeront de plus de l'humus. Les matériaux souvent utilisés sont: le jute, la fibre de coco, le lin, les roseaux.

4.4.3. Les épis

Ces ouvrages sont destinés à corriger les tronçons déjà affouillés. Les épis peuvent être en terre, enrochements, ou en gabions. Ils sont placés dans les anses à forte érosion, afin de favoriser le dépôt entre eux et de ce fait réaliser le comblement des espaces affouillés.

Lorsque la nécessité oblige, on réalise des épis avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente.

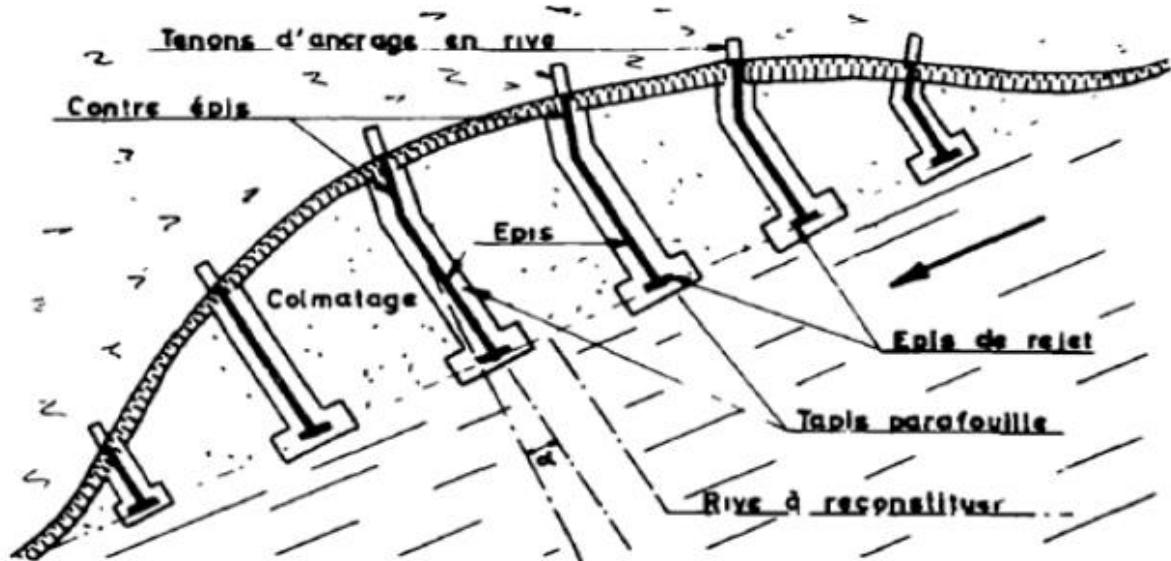


Figure 4.6. Plan schématique représentant une série des épis



Figure 4.7. Epis

- Types des épis

- Epis singuliers
- Epis en rangées
- Epis non submergés
- Epis submergés
- Epis non perméable
- Epis perméable
- Epis perpendiculaires

- Epis inclinés vers l’aval
- Epis inclinés vers l’amont
- Epis massifs (enrochement, empierrement, éléments artificiels en béton, blocs ou pierres en taille éventuellement posés sur des mortiers ou sur du béton)
- Epis en génie biologique (caissons en bois, fascines, pieux en bois)
- Epis combinés.

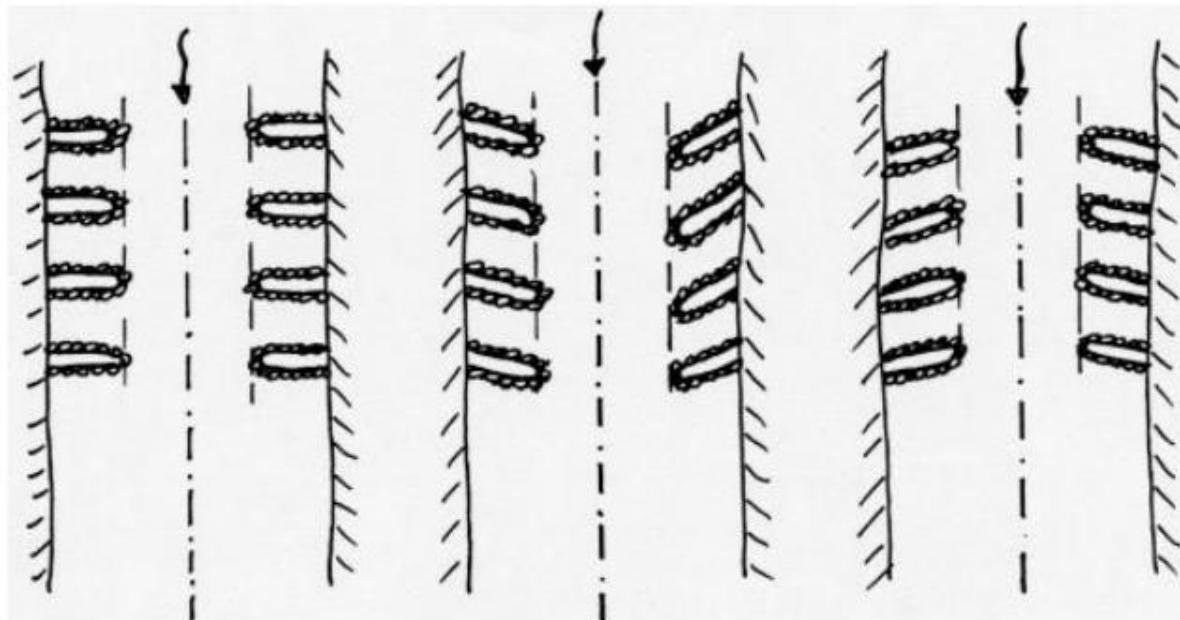


Figure.4.8.Inclinaisons des épis (perpendiculaire, vers l’aval et vers l’amont)

4.4.4. Les murs de soutènement

Ils permettent d’éviter l’érosion des berges, et le glissement derrière celles-ci. Les murs de soutènement peuvent être en béton, béton armé, maçonnerie, ou en gabions. Lorsque la nécessité oblige, on conçoit des chutes avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente. Ils sont constitués d’un rideau faisant office de parement, d’une semelle portant le rideau et ancrée dans la fondation, de barbacanes pour le drainage des eaux se trouvant derrière le mur, et parfois d’une bêche pour augmenter la stabilité de l’ouvrage.

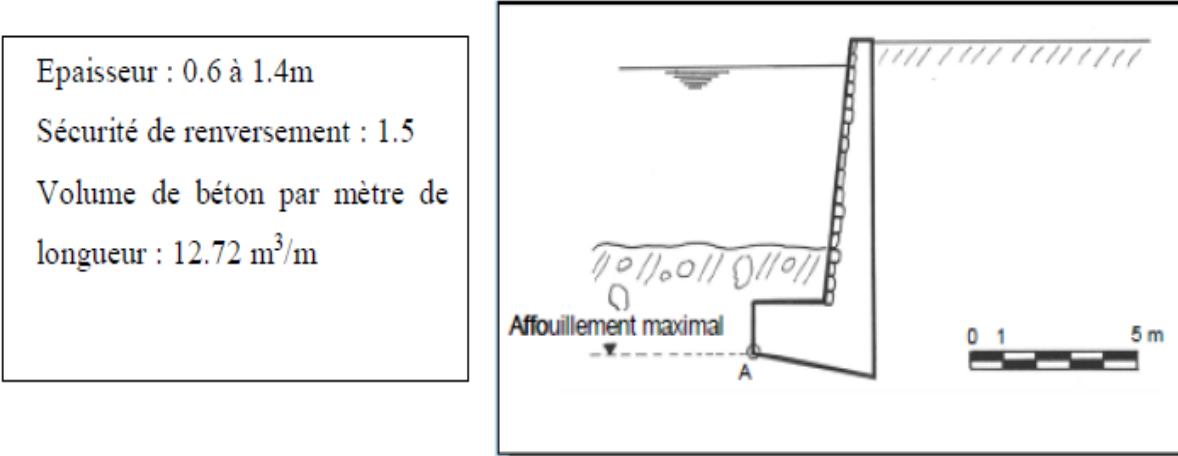


Figure 4.9. Mur de soutènement en L

4.4.5. Le revêtement des berges

Le revêtement des talus et des berges : par une protection adéquate, il évite l'apparition des affouillements, et l'érosion au niveau des berges

Les revêtements peuvent être en enrochements (fig ci-dessous), béton, béton armé, maçonnerie, ou en gabions. Lorsque la nécessité oblige, on conçoit des chutes avec une combinaison de deux (parfois plus) matériaux de nature différente. Leur épaisseur doit être suffisante pour résister à la force de traction du courant. Lorsque le revêtement est en béton, on lui associe des barbacanes de drainage.



Figure 4.10. Revêtement en enrochement en construction sur un géotextile

4.5. Dimensionnement des ouvrages de protection contre l'érosion du lit

4.5.1. Dimensionnement des enrochements

- Contrainte de cisaillement maximale sur les berges :

$$\tau_{max} = 0.77 \rho g h_{max} J \quad (4.1)$$

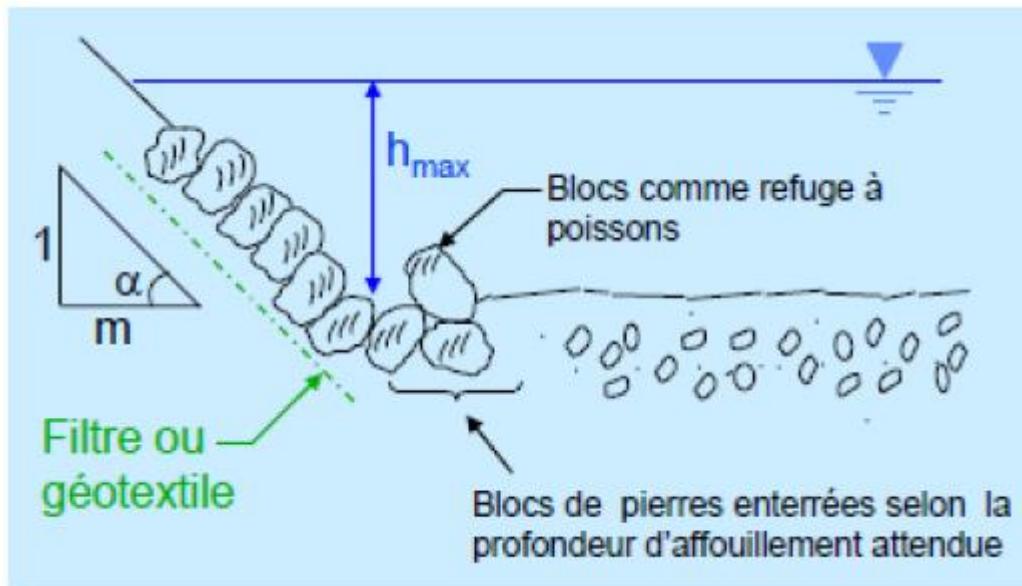


Figure 4.11. Revêtement en enrochement

- Contraintes de cisaillements adimensionnelles

$$\theta = \tau_{max} / \rho g (s-1) d_B = 0.77 h_{max} J / (s-1) d_B \quad (4.2)$$

h_{max} : Hauteur d'eau maximale sur les berges

J : pente de frottement.

S : densité spécifique : $s = \rho s / \rho = 2.65$

d_B : Diamètres des blocs.

- Dimensionnement des enrochements selon Stevens et al :

$$n = \theta / \theta_{cr} = 16.17 h_{max} \cdot J / (s-1) d_B \quad (4.3)$$

n : Facteur de dimensionnement selon Stevens et al

θ : Contrainte de cisaillement adimensionnelle

θ_{cr} : Contrainte de cisaillement adimensionnelle critique

$\theta_{cr} = 0.047$ En général (formule (4.3))

$\theta_{cr} = 0.1$ Pour des rivières de montagnes avec des gros blocs dans le lit.

Formule (4.3) la valeur 16.17 devient 7.7

$$\xi = n \cdot sm / \cos \alpha \quad \text{telque : } sm = \tan \varphi / \tan \alpha \quad (4.4)$$

ξ : Facteur de dimensionnement selon Stevens et al

α : Angle du talus avec l'horizontale ($\tan \alpha = 1/m$)

φ : Angle d'un talus d'enrochements stable sans écoulement :

Blocs < 1 t ($\varphi = 40 - 45^\circ$)

Blocs > 1 t ($\varphi = 45 - 60^\circ$)

$$S = s_m / 2 (\sqrt{\varepsilon^2 + 4} - \varepsilon) \quad (4.5)$$

S : coefficient de sécurité ($S_{min}=1.0/1.3$ selon conditions)

S_m : coefficient de sécurité sans écoulement.

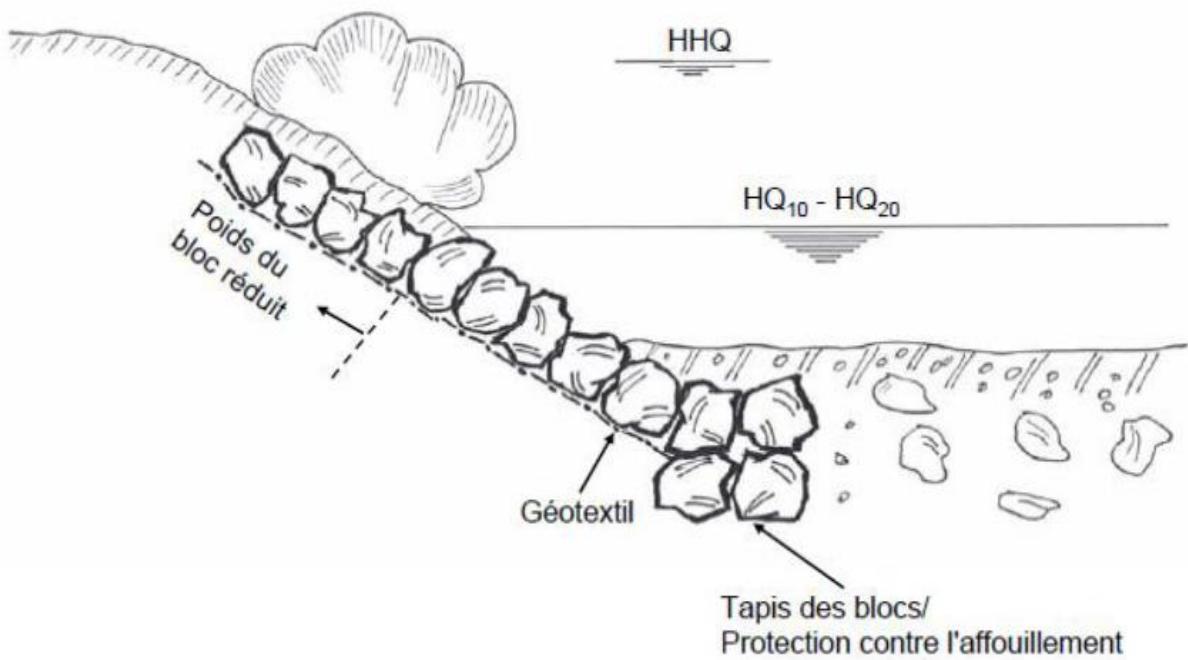


Figure 4.12. Enrochement avec une seule couche

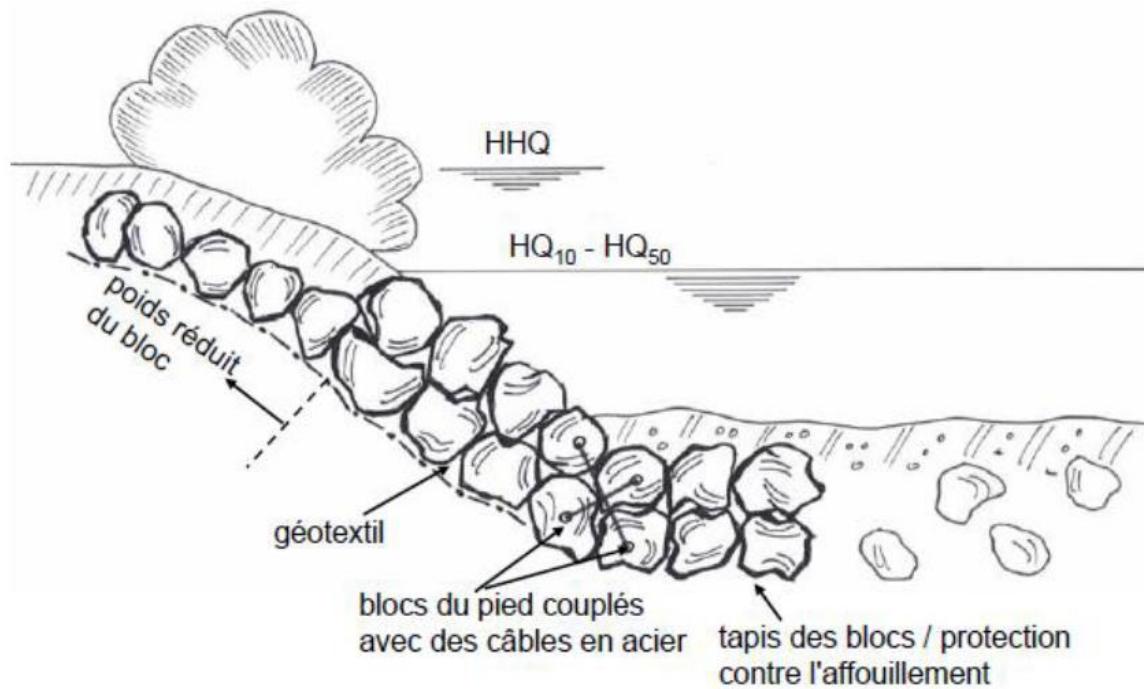


Figure 4.13. Enrochement en deux couches

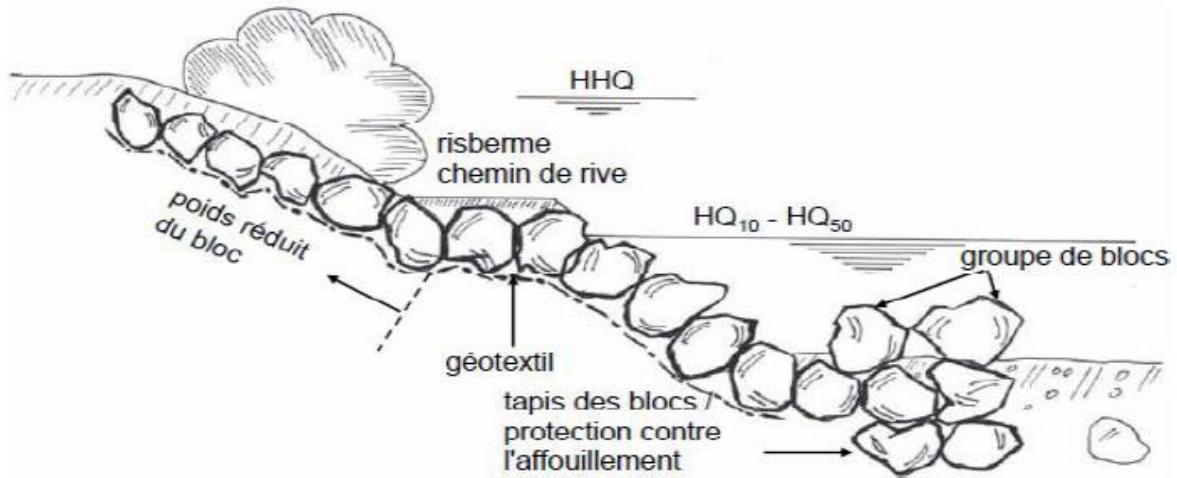


Figure 4.145. Revêtement en enrochement avec risberme

4.5.2. Protection contre l'affouillement

- L'estimation des affouillements à l'extérieur des tronçons-courbes

$$S = h_m \cdot (R_i / R_m)^k \quad (4.6)$$

Et $\sin \beta = k \cdot h_m / R_i$

avec

S : Profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface de l'eau

h_m : Profondeur d'eau moyenne

R_i : Rayon local

R_m : Rayon moyen

$\sin \beta$: pente transversale locale du lit

L'exposant k selon l'approche de Kikkawa (1976) vaut :

$$K = (2.575 \cdot c - 4.078) \cdot \sqrt{\theta} \quad (4.7)$$

Avec θ : facteur de Shields (contrainte de cisaillement adimensionnelle)

$$\theta = h_m \cdot J \cdot (s-1) \cdot dm \quad (4.8)$$

$$c = v_m / v_* \quad \text{et la vitesse de cisaillement } v_* = \sqrt{g \cdot h_m \cdot J}$$

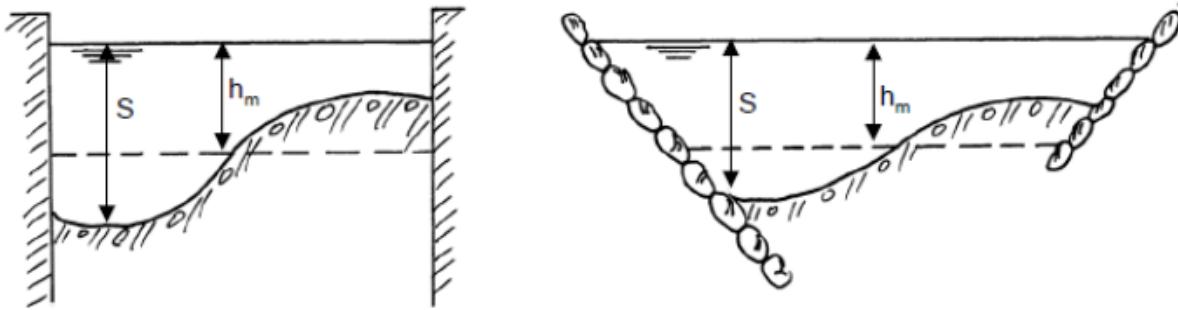


Figure 4.16. Affouillement en courbe

- Estimation des affouillements causés par l'écoulement meandrant

1. Profil rectangulaire :

$$S = h_m + B / 6 \cdot (b d_m)^{0.15} \quad (4.9)$$

2. Profil trapézoïdal :

$$S = h_m + B - (2n(S-h_m) / 6[B-2n(S-h_m) d_m]^{0.15}) \quad (4.10)$$

avec:

S : Profondeur de l'érosion mesurée à partir de la surface de l'eau

h_m : Profondeur d'eau moyenne

B : Largeur du lit

d_m : diamètre moyenne de la granulométrie du lit

n : pente de talus de la rive (1/n)

4.5.3. Enrochements pour les rivières en plaine

- Dimensionnement avec démarche de Stevens et al.

Avec $\theta_{cr}=0.05$ et $\varphi<45^\circ$ (angle de repose du talus).

- Epaisseur minimale des enrochements en remblai.

L'épaisseur minimale de l'enrochement en remblai dépend de la granulométrie choisie :

- granulométrie avec les grains de diamètre presque uniforme

$d_{min}=0.9 d_m$, $d_{max}=1.1d_m$: épaisseur minimale $s=1$ à $3d_m$

Granulométrie étendues avec

$d_{min}=0.6d_m$, $d_{max}=1.6d_m$: épaisseur minimale $s=1.5d_m$ ($S >d_{max}$)

Le pied de l'enrochement doit être fondé à une profondeur suffisante pour résister aux affouillements attendus.



Figure 4.17. Enrochement pour les rivières en plaine

4.5.4. Dimensionnement des épis

- Espacement et longueur des épis

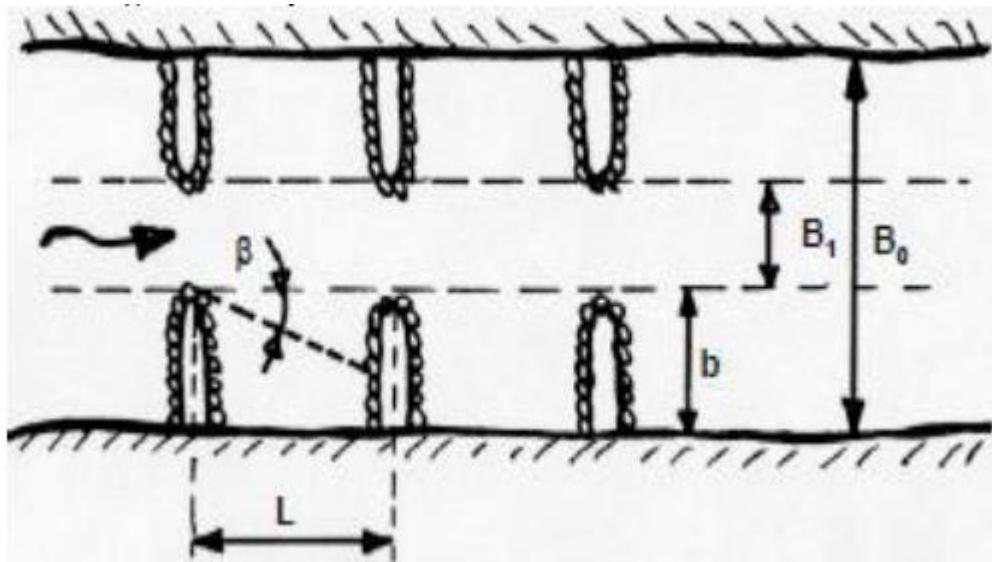


Figure.4.18.Espacement et longueur des épis

$$L \leq 4.5 (B_0 - B_1 / 2) = 4.5 b \quad (4.11)$$

Pour: $b = (1/4)L$, selon les conditions locales les espacements suivants sont recommandés :

- dans la transition entre un tronçon rectiligne et une courbe

$$L = 1/2 \text{ à } 3/4 B_1$$

- à la rive extérieure dans une courbe

$$L = 1. B_1$$

- à la rive intérieure dans une courbe

$$L = 1.5 \text{ à } 2 B_1$$

La longueur de l'épis résulte du rétrécissement souhaité B_1 de la rivière pour favoriser le transport solide. $\beta = 6^\circ$ à 9°

- **Influence hydraulique des épis**

- La largeur du cours d'eau est hydrauliquement réduite par les épis.
- Surélévation du plan d'eau
- Concept de la section équivalente

Epis non submergés

$$\lambda = B_{eff} / B_1 < 1.0 \quad (4.12)$$

Epis submergés

$$\lambda > 1.0 \quad (4.13)$$

Première approximation $B_{eff} = B_1$ ($\lambda = 1$)

$K_{paroi}=15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (faible profondeur) à $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (épis submergés)

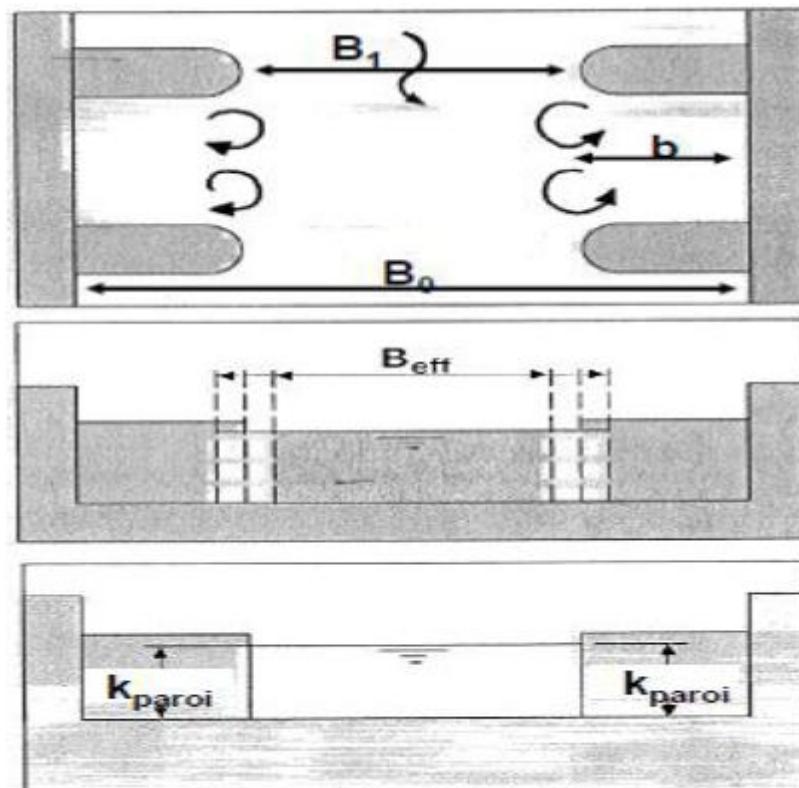


Figure 4.19. Influence hydraulique sur les épis

- Erosion du lit due à l'effet des épis

Erosion maximale selon Spannring :

$$\Delta Z_{max} = h_0 [(\tau_0 / \tau_{crit})^{3/7} (B_0 / \lambda B_1)^{6/7} - 1] \quad (4.14)$$

avec:

h_0 : Profondeur d'eau dans la section sans épis

τ_0 : Contrainte du cisaillement au lit dans la section sans épis

B_0 : Largeur de la section sans épis

B_1 : Largeur de la section entre les têtes des épis

λ : Coefficient des épis

A_u : section de l'écoulement au-dessus des épis

A_{ges} : section totale de l'écoulement (sans épis)

$\lambda_{gr} = B_0 / B_1 (\tau_0 / \tau_{crit})^{1/2}$ Correspond à la limite supérieure de λ selon l'équation pour

$\Delta Z_{max}=0$

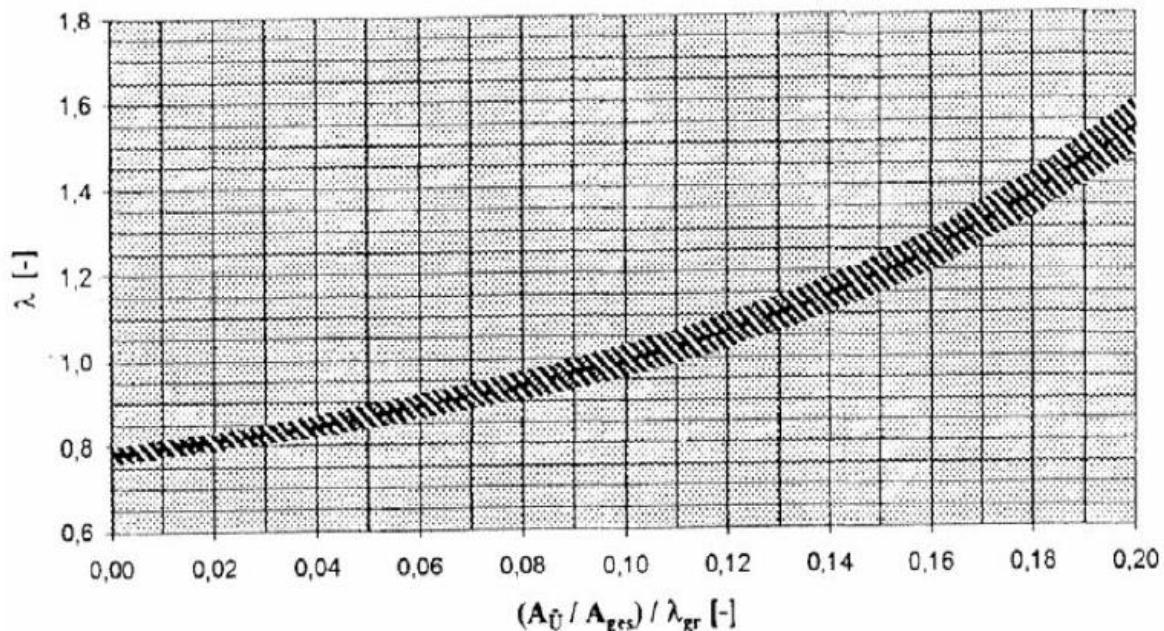


Figure 4.20. Coefficient des épis en fonction de la section d'écoulement au dessus des épis et la section totale de l'écoulement (sans épis)

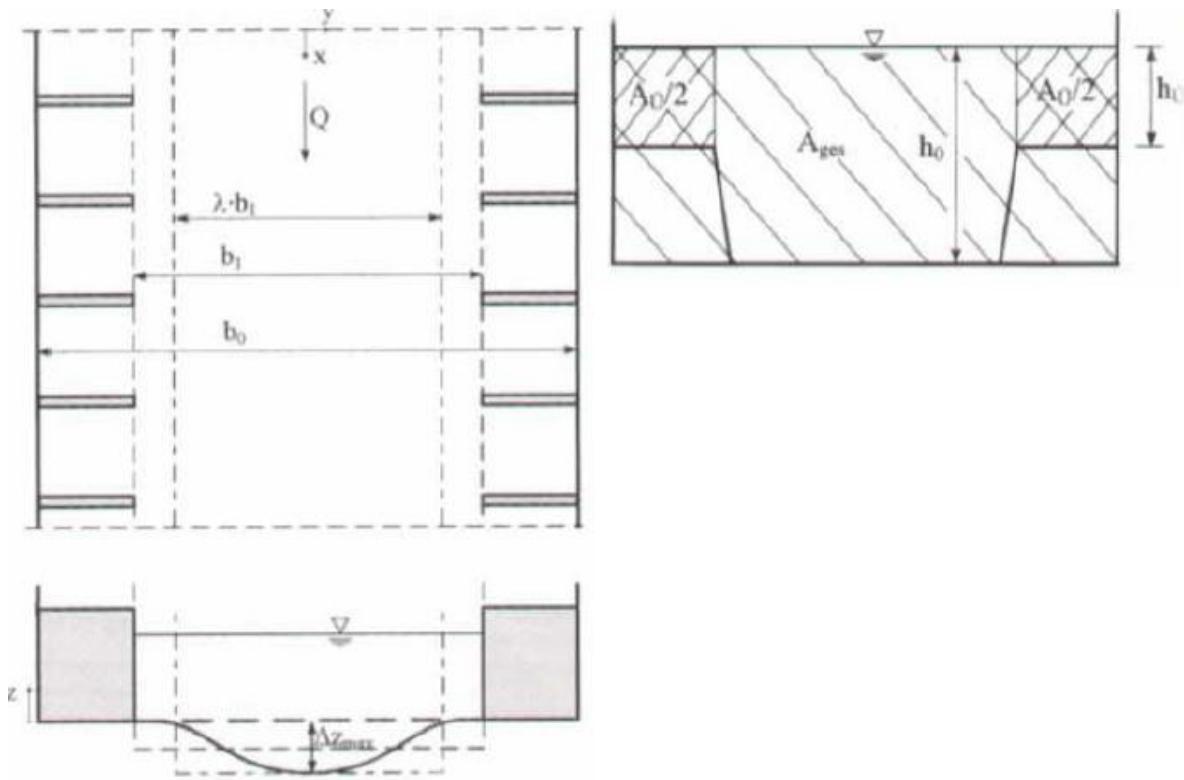


Figure 4.21.Erosion du lit due à l'effet des épis

- **Détails constrictif des épis**

1. Corps des épis

-**Pente amont** : 1 :1.5 (empierrement) à 1 :2.0 (enrochement) ;

-**Pente aval** : 1 : 2.0 (empierrement) à 1 : 3.0 (enrochement) ;

Pour des pentes faibles l'affouillement en cas de submersion est réduit (1 :5) ;

-**Pente longitudinale** : typiquement 1 : 8 à 10.

- **Tête des épis**

- Normalement élargies par rapport au corps avec une pente de 1 :3.

- Hauteur de la tête par rapport au niveau du débit de dimensionnement dans des tronçons en courbe :

Rive extérieure + 0.5m

Rive intérieur - 0.5 m.

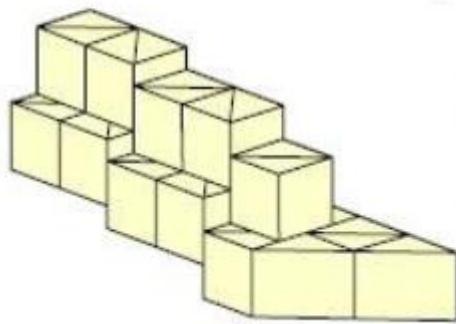


Figure 4.22. Epis en béton

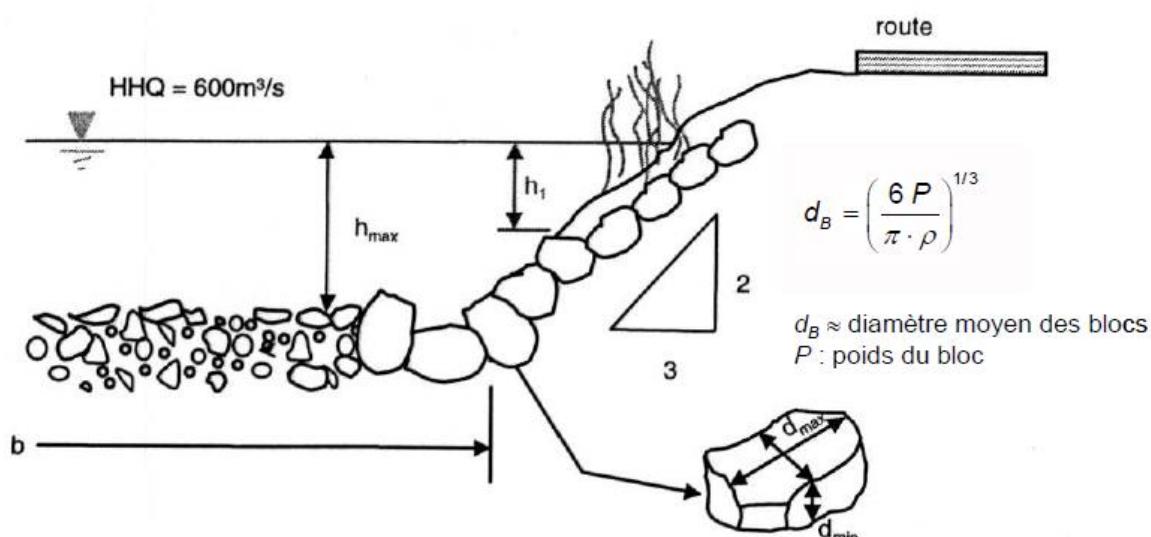
EXERCICE Stabilisation des berges en enrochements

La berge d'un torrent de montagne qui s'écoule le long d'une route importante doit être protégée par des enrochements pour prévenir l'érosion latérale menaçant la route.

Le cours d'eau peut être modélisé par une section trapézoïdale dont les caractéristiques sont:

- Plafond: $b = 25 \text{ m}$
- Pente des berges: $m = 1.5$ (3.0 horiz./2.0 vert.)
- Pente longitudinale: $J = 3\%$
- Granulométrie de la sous-couche du lit: $d_{m \text{ US}} = 0.4 \text{ m}$; $d_{90 \text{ US}} = 1.30 \text{ m}$

La crue maximale observée est caractérisée par un débit de pointe $\text{HHQ} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette crue a provoqué l'érosion latérale du lit jusqu'à la route.



Question 1: En admettant un écoulement uniforme, déterminer la hauteur maximale de l'écoulement. La rugosité du lit peut être estimée par la relation empirique

$$K = 0.75 \quad K_r = 0.75 \cdot \frac{26}{d_{mDS}^{1/6}} \quad \text{et} \quad d_{mDS} \approx d_{90US}$$

Question 2: Déterminer la contrainte de cisaillement maximale τ_{\max} agissant sur les berges au pied du talus. Choisir la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique pour le dimensionnement des berges (torrent de montagne).

Question 3: Selon la procédure de dimensionnement de Stevens et al. quel est le diamètre moyen d_B et le poids des blocs nécessaires? Le facteur de sécurité souhaité pour la stabilité de la berge est $S = 1.3$ (en admettant un angle de talus d'enrochement stable, sans écoulement, de $\phi = 55^\circ$ pour $P > 1t$)

Question 4: Depuis quelle profondeur d'écoulement h_1 serait-il possible d'utiliser des blocs de 1 tonne? ($\phi = 45^\circ$ pour $P < 1t$)

Question 5: Quels sont les problèmes qui se posent si le tronçon de berge est à l'extérieur d'une courbe?