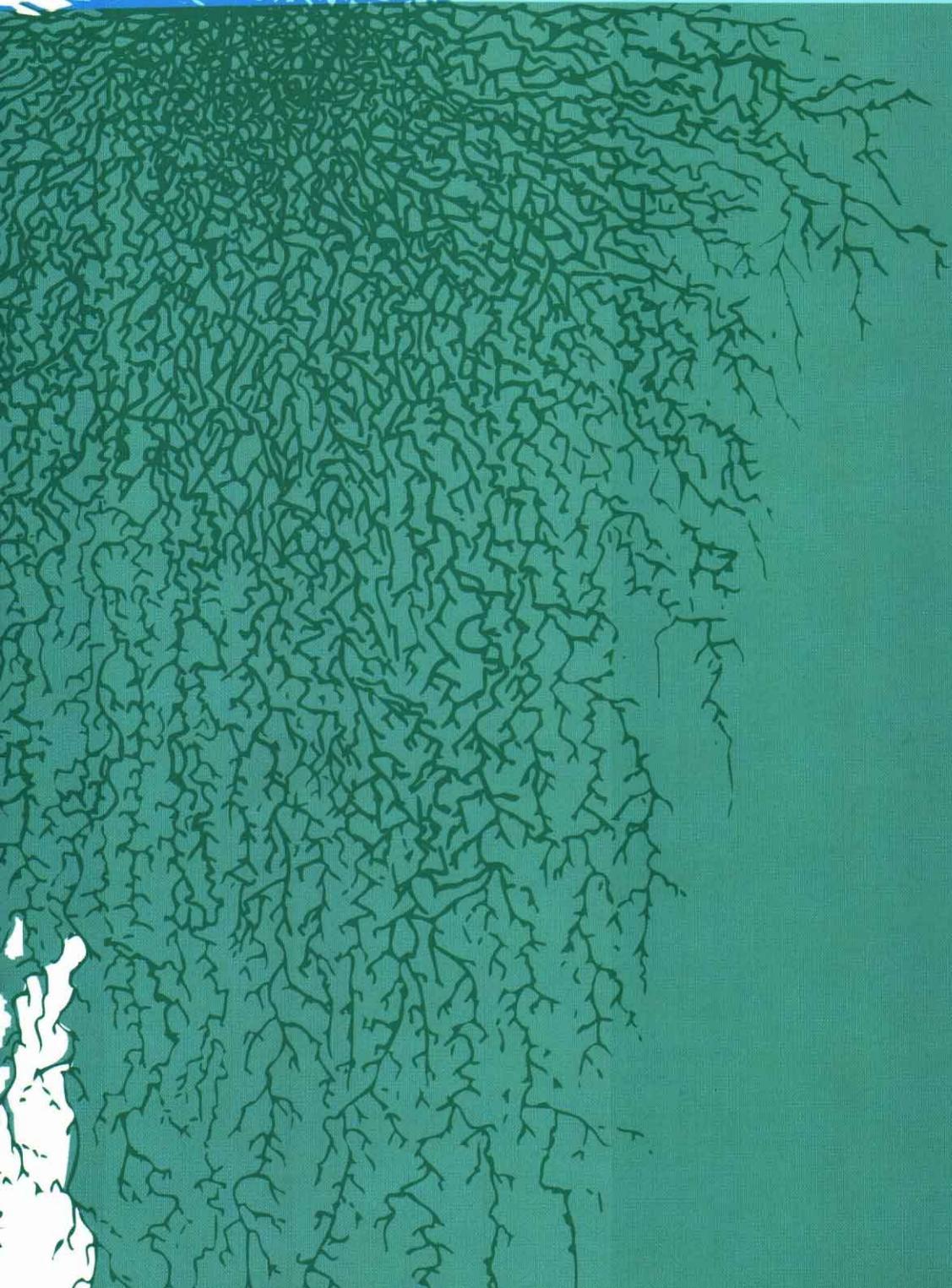


méthodes de calculs pour le dimensionnement des ouvrages végétaux





DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRAULIQUES COURANTS

Les propriétés géométriques et hydrauliques des cours d'eau sont généralement très irrégulières (parties hautes "seuils", parties profondes "mouilles", forme, largeur, alternances, granulométrie, etc.).

Cette géométrie irrégulière exige, pour l'appréhender, des simplifications ainsi qu'un certain nombre d'hypothèses (forme prismatique de l'écoulement, ligne de charge parallèle à la pente moyenne du lit, etc.), ce qui implique que, dans ces conditions, à un débit donné, on se trouve en régime uniforme.

Ainsi, l'application de formules fondamentales d'hydraulique dans le dimensionnement des cours d'eau ne peut donner que des résultats approximatifs.

L'ensemble des formules décrites ci-dessous, bien qu'issues d'une approche très mathématique, constituent le minimum à utiliser en aménagement végétal de cours d'eau. Elles permettent au concepteur-projeteur de vérifier la crédibilité de son choix et de donner des garanties, au moins formellement, sur la résistance de ses propositions.

Cependant, dans la mesure où l'on se trouve dans le simple cas d'une reconstitution de portion de berge boisée disparue ou s'il ne s'agit que de remettre de la végétation, il n'y a pas lieu d'utiliser les formules de la même manière que pour un dimensionnement complet.

RAPPEL DE LA FORMULE GENERALE DE MANNING-STRICKLER

Dans le cas du régime uniforme (vitesse constante tout au long du cours d'eau), on peut démontrer que la hauteur d'eau est constante et que la pente I de la ligne de charge est parallèle à la pente i

du radier. La vitesse V et le débit Q peuvent alors être déterminés par différentes formules dont une des plus usuelles est celle de Manning-Strickler :

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = K_s \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

et la loi fondamentale suivante : $Q = V \cdot S$

I : pente du radier
 n : coefficient de Manning
 K_s : coefficient de Strickler = $\frac{1}{n}$

R : rayon hydraulique = $\frac{\text{section mouillée cours d'eau}}{\text{périmètre mouillé du lit}} = \frac{S}{P}$

La détermination des coefficients "n" ou "Ks" est fondamentale car ils caractérisent le type du cours d'eau à étudier. Les valeurs telles que débit, vitesse et section projetée sont directement fonction de ces coefficients.

Pour l'ingénieur ou l'écologue, il existe plusieurs façons de procéder. Celles-ci sont décrites en détail à l'annexe A3. Des valeurs du coefficient de rugosité pour des cours d'eau naturels sont données à l'annexe A4.

CALCUL DE LA HAUTEUR D'EAU POUR UN DÉBIT DE RÉFÉRENCE

Le concepteur-projeteur peut se trouver dans le cas :

- d'un cours d'eau dont il convient de protéger les berges contre l'érosion sans transformer le gabarit du lit
- d'une modification ponctuelle de la section visant à assurer une protection plus forte des sols riverains contre les inondations.

Dans la deuxième situation, il cherchera à ajuster une section permettant le passage d'un débit de crue de projet.

Mais dans les deux cas, il se calera par rapport à un débit de référence pour lequel il souhaitera vérifier la tenue des protections de berges.

Le débit de référence noté Q_r est fixé soit à partir d'études hydrologiques ou soit à partir de niveaux de crues connus.

La valeur de ce débit correspond souvent à une fréquence centennale.

Cependant, dans la mesure où les sols riverains peuvent (et surtout devraient) tolérer l'inondation, des fréquences plus petites doivent être choisies en fonction des valeurs réelles à protéger. A partir de cette donnée et en accord avec les autorités, on calcule la section du cours d'eau ou la hauteur d'eau correspondante, selon les cas.

Notons également qu'est souvent déjà définie soit la largeur (emprise maximale du cours d'eau), soit la hauteur d'eau (gestion des inondations), ce qui simplifie les calculs.

Soit la formule définie au paragraphe précédent :

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = K_S \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

avec $Q = V \cdot S$

On obtient :

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = K_S \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \geq Q_r$$

Le calcul de la hauteur d'eau, dont dépendent le rayon hydraulique et l'aire de la section mouillée s'effectue par itérations à l'aide de programmes plus ou moins complexes selon le degré de paramétrisation de la section concernée.

Les résultats obtenus, donnent ainsi une idée sur la place qu'on peut admettre pour les végétaux, comment la berge devra être construite et le niveau des protections.

FORMULE GENERALE

Afin de déterminer le type de protection végétale à mettre en oeuvre sur une berge érodée ou nouvellement créée, la tension de frottement τ est utilisée, appelée plus communément force tractrice ou force d'arrachement :

$$\tau = \rho \cdot R \cdot I$$

avec :

ρ : poids unitaire de l'eau
(10 000 N/m³)

R : rayon hydraulique (m)

I : pente du cours d'eau

τ : force tractrice (N/m²)

Pour les cours d'eau naturels ou des chenaux de largeur importante, on admet $R \cong h$ (h = hauteur d'eau), plus aisé à utiliser, mais qui donne des valeurs de force tractrice légèrement plus élevées. Ceci amène un facteur de sécurité supplémentaire puisque les ouvrages vont être dimensionnés pour une force tractrice plus grande, soit :

$$\tau = \rho \cdot h \cdot I$$

Remarque : Effet de sinuosité du cours d'eau : cette formule est basée sur un tracé rectiligne du cours d'eau, mais pour un tronçon sinueux, la force d'arrachement est plus grande dans la courbe externe d'un méandre que dans la courbe interne. La formule sous-estime donc la valeur moyenne des forces d'arrachement dans une

courbe externe. C'est pourquoi lors de projet de protection de berge en courbe externe, la force tractrice sera multipliée par les coefficients suivants :

- 1.10 cours d'eau légèrement sinueux
- 1.35 cours d'eau moyennement sinueux
- 1.70 cours d'eau très méandreaux.

L'abaque de l'annexe A1 indique en première approche directement la force tractrice que peuvent supporter certains types de protection végétale, en fonction de la pente du cours d'eau et de la hauteur d'eau par rapport à la force tractrice limite (critique).

FORCE TRACTRICE CRITIQUE (FORMULE GENERALE)

On appelle force tractrice critique τ_0 , la force tractrice à partir de laquelle les matériaux de fond commencent à se déplacer. Pour des matériaux relativement grossiers et non cohérents, la formule généralement utilisée est la suivante [12] :

$$\tau_0 \text{ (N/m}^2\text{)} = 8 d_{75} \text{ (cm)}$$

τ_0 : force tractrice critique sur le fond

d_{75} : diamètre correspondant à 75 % des matériaux de diamètre inférieur sur la courbe granulométrique

Remarques : Cette formule n'est applicable que pour des matériaux non cohérents ; en effet, on peut montrer que c'est le sable qui s'érode

le plus facilement ($d \cong 0,1 \text{ mm}$), alors que le limon ($d \cong 0,01 \text{ mm}$) montre une grande résistance à l'érosion due à la cohésion entre les particules.

Effet de la sinuosité du cours d'eau : cette formule est basée sur un tracé rectiligne du cours d'eau. Dans un cours d'eau sinueux, la valeur de la traction sera plus faible que dans le cas d'un tronçon rectiligne. C'est pourquoi la valeur de force tractrice critique obtenue sera multipliée par les coefficients suivants [13] :

- 0.90 cours d'eau légèrement sinueux
- 0.75 cours d'eau moyennement sinueux
- 0.60 cours d'eau très méandreaux.

FORCE TRACTRICE CRITIQUE SUR LES BERGES

Si le matériau (non cohérent et grossier) n'est pas situé sur un fond horizontal ce qui est le cas des talus, il est nécessaire de tenir compte de l'effet de la pente des berges pour le calcul de la force tractrice critique que l'on exprime par un facteur de correction λ :

$$\tau_0' \text{ (N/m}^2\text{)} = \lambda \cdot \tau_0$$

avec :

$$\lambda = \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \theta}}$$

- τ_0 = force tractrice critique sur le fond
- τ_0' = force tractrice critique sur la berge
- λ = coefficient
- φ = angle de la berge avec l'horizontale
- θ = angle de frottement interne des matériaux (dépend de la forme et du diamètre des grains)

La détermination de l'angle de frottement interne des matériaux d'un sol sans cohésion (ou pulvérulent) peut être effectuée avec l'abaque en annexe A5.

Ceci ne constitue qu'une approximation grossière qu'il faut manier avec prudence. La détermination précise des paramètres caractérisant le sol doit être faite, en principe, par des essais en laboratoire.

FORCE TRACTRICE EN FONCTION DE LA VITESSE DE L'EAU

Quelquefois il est difficile de connaître les hauteurs d'eau, en fonction des débits, sur un cours d'eau naturel. Par contre il est relativement aisé d'estimer la vitesse de l'eau (flotteurs, moulinet, cane de Jens, etc.) ; c'est pourquoi il est intéressant de déterminer la force tractrice en fonction de la vitesse.

L'occasion peut aussi se présenter de disposer de mesures de vitesses de courant au droit des protections de berges projetées pour le débit de référence.

Les deux formules suivantes sont alors proposées pour évaluer la force tractrice :

$$\tau = \rho \cdot I^{1/4} \cdot K_S^{-3/2} \cdot V^{3/2}$$

ou

$$\tau = \rho \cdot R^{1/3} \cdot K_S^{-2} \cdot V^2$$

La première de ces formules est utilisée lorsqu'il est plus aisé de connaître la pente du cours d'eau (profil en long), alors que la deuxième formule est utilisée lorsqu'il est plus facile de mesurer le rayon hydraulique (profil en travers).

Les développements de ces formules figurent à l'annexe A3.

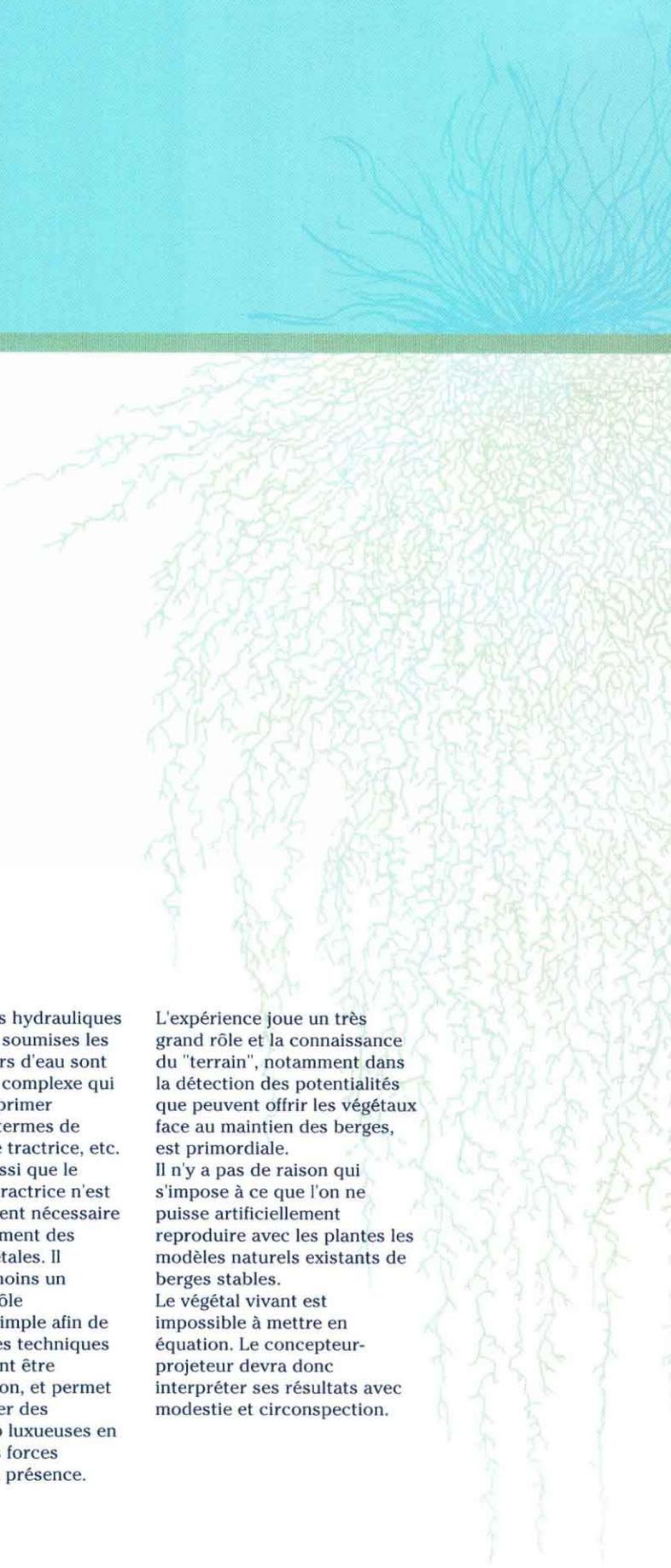
CONCLUSION SUR LES METHODES DE CALCULS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES VEGETAUX

Les sollicitations hydrauliques auxquelles sont soumises les berges d'un cours d'eau sont de nature assez complexe qui ne peuvent s'exprimer uniquement en termes de vitesse, de force tractrice, etc. Il est évident aussi que le calcul de force tractrice n'est pas le seul élément nécessaire au dimensionnement des techniques végétales. Il constitue néanmoins un moyen de contrôle mathématique simple afin de déterminer si des techniques végétales peuvent être appliquées ou non, et permet de ne pas réaliser des protections trop luxueuses en rapport avec les forces hydrauliques en présence.

L'expérience joue un très grand rôle et la connaissance du "terrain", notamment dans la détection des potentialités que peuvent offrir les végétaux face au maintien des berges, est primordiale.

Il n'y a pas de raison qui s'impose à ce que l'on ne puisse artificiellement reproduire avec les plantes les modèles naturels existants de berges stables.

Le végétal vivant est impossible à mettre en équation. Le concepteur-projeteur devra donc interpréter ses résultats avec modestie et circonspection.



An illustration showing a cross-section of soil with a dense network of roots. The roots are depicted in various shades of green and blue, extending from the surface down into the soil. The soil is represented by a textured, greenish-brown area. The overall style is that of a technical or scientific diagram.

conditions de réussite des techniques végétales

Toute implantation de végétation, y compris celles de végétaux fonctionnant comme éléments de construction, doit être précédée d'une analyse des conditions de croissance qu'offrira la station. Cette appréhension des paramètres se fait, en général, complètement sur le terrain et consiste d'une part en une approche globale et d'autre part dans la saisie de données essentielles pour l'élaboration du projet. D'autres résultats importants pour la nature des ouvrages s'obtiennent en laboratoire ou par calcul.

L'expérience de terrain et surtout sa connaissance sont absolument fondamentales. Il est inutile de vouloir planter des saules si l'on ne connaît ni les espèces, ni leurs exigences *édaphiques, ni leur étage de croissance en relation avec les niveaux d'eau, etc.

Dans la liste ci-dessous, les paramètres stationnels à appréhender absolument sont précédés du signe (+), ceux qu'il serait important de posséder sont précédés du signe (+/-) et ceux non indispensables mais pouvant aider au choix sont précédés du signe (-).

Contraintes physico-chimiques de l'eau :	<ul style="list-style-type: none"> + débits et niveaux de crues + périodicité des crues + durée moyenne des crues + niveau moyen des eaux + niveaux d'étiage et semi-permanent + durée moyenne de l'étiage + force d'arrachement +/- vitesse du courant +/- qualité
Morphologie du terrain :	<ul style="list-style-type: none"> + nature des sols + pente + exposition - relief
Propriétés physiques du sol :	<ul style="list-style-type: none"> + teneur en matériaux fins + profondeur + granulométrie - porosité
Propriétés chimiques du sol :	<ul style="list-style-type: none"> +/- teneur en eau +/- pH - richesse en éléments nutritifs - teneur en éléments polluants (not. métaux lourds)
Propriétés biologiques du sol :	<ul style="list-style-type: none"> - activité *microbiologique
Propriétés mécaniques du sol :	<ul style="list-style-type: none"> + instabilité superficielle + instabilité en profondeur + érosion
Conditions climatiques :	<ul style="list-style-type: none"> + ensoleillement + altitude +/- durée de la période de végétation - précipitations - gel - durée d'enneigement
Conditions environnementales :	<ul style="list-style-type: none"> + présence d'animaux pouvant nuire aux plantes + activités *anthropiques proches (culture intensive, fauche, pâture) + activités de loisirs +/- présence de *maladies cryptogamiques.

D'une manière générale, l'élaboration d'une carte synthétique (page 25) aide beaucoup à la compréhension de l'état existant et à diriger l'aménagement futur. Toutefois, elle n'est pas indispensable mais l'appréhension de la composition botanique sur le site à travailler et sur ses abords est incontournable pour détecter la présence des espèces capables de jouer un rôle actif en protection des berges.

De plus, la représentation des objets conduisant à des phénomènes modifiant l'écoulement et provoquant des érosions peut être un outil précieux pour comprendre et élaborer des modes d'implantation de la végétation.

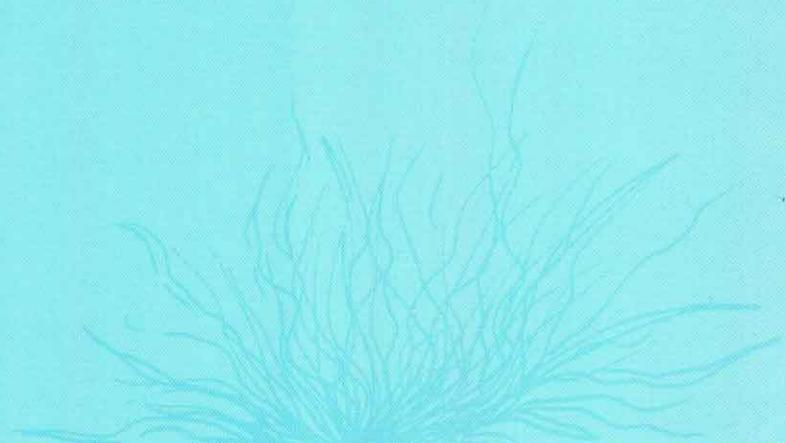
Le choix des végétaux est déterminant dans la réussite des ouvrages. La règle est de travailler avec des essences indigènes, adaptées aux conditions locales de croissance et qui satisfont au mieux les facteurs stationnels énumérés plus haut. La littérature donne souvent des listes [5, 14]. Pour des interventions sur des cours d'eau dont les rives sont encore habillées d'une végétation naturelle, la meilleure solution consiste à prélever les matériaux sur place. De cette manière, on a la meilleure garantie possible que les essences utilisées soient adaptées à la station. Lorsque les saules viennent à manquer, notamment par l'absence ou la modification de la *ripisylve, et afin de garantir un approvisionnement en saules de qualité avec les espèces spécifiées dans les projets, il est parfois nécessaire de constituer des plantations pépinières. Comme les saules se bouturent très facilement, la production de baguettes pour les ouvrages s'avère rapide et fonctionnelle si l'on prend soin d'utiliser des sols adaptés.

Il est toujours recommandé, dans un aménagement, de varier les essences, que ce soit les espèces de saule, s'il s'agit de matériaux devant être aptes à rejeter, ou les genres si des

plants à racines nues peuvent entrer en ligne de compte. Cette recommandation n'a pas pour seul but de satisfaire à des critères de diversité biologique, mais augmente également les chances d'une bonne reprise de la végétation, et de ce fait, d'un bon comportement de l'ouvrage. Respecter les facteurs stationnels signifie également que les essences seront distribuées sur la berge en respectant le principe des séries végétales, réparties en fonction des contraintes hydriques et hydrauliques. Ceci exige évidemment des connaissances indispensables en botanique.

Le choix des végétaux doit également tenir compte de leur aptitude à être utilisés comme éléments de construction, qu'il s'agisse de leur aptitude à rejeter, à *drageonner, de leur flexibilité, de leur mode de croissance ou de leur développement futur. A ce propos, certaines remarques méritent d'être mentionnées :

- seuls les saules garantissent avec sûreté de rejeter à partir de segments d'organes aériens, que ce soit des branches entières ou partielles, ou des ramilles. De plus, la flexibilité de leurs branches permet la réalisation d'ouvrages particuliers tels que les tressages ;
- le saule marsault (*Salix caprea*) présente une capacité à la multiplication végétative plus faible que les autres espèces du genre *Salix* ;
- les fragments d'aunelles (*Alnus sp.*) sont à déconseiller pour des raisons de manque de régularité dans la reprise. Si le bouturage est encore concevable, l'utilisation de branches entières vivantes n'est pas recommandée. Par contre les aunelles sont vivement conseillés s'ils peuvent être intégrés dans un ouvrage comme plants à racines nues. La structure de leur réseau *racinaire, leur pouvoir purificateur, leur aptitude à synthétiser les nitrates à partir de l'azote de l'air grâce à leur *nodosités à *actinomycètes, leur adaptation à l'eau et aux sols



*hydromorphes en font des auxiliaires précieux ;

- les peupliers (*Populus sp.*), mêmes s'ils peuvent rejeter, sont à déconseiller en raison de leur enracinement superficiel et de leur port élevé, qui les rend trop sujets au déchaussement ;

- certaines espèces de saules ont un développement buissonnant, d'autres sont arborescentes. Certains sont arbustifs et ne deviennent arborescents qu'en d'excellentes conditions. Cela constitue également des critères de choix ;

- des saules arborescents sont en général à éviter dans un aménagement de pied de berge, à moins qu'on puisse garantir une fréquence d'entretien qui les maintienne arbustifs.

Si l'aspect aérien s'avère important, il est tout aussi

nécessaire de connaître la morphologie du système

*racinaire et les profondeurs qu'il est possible d'atteindre. D'autres facteurs botaniques, plus particulièrement liés aux aspects physiologiques, doivent être connus avant l'utilisation des végétaux :

- l'élasticité (*Salix fragilis*, p. ex., est inapproprié pour les tressages) ;

- les actions sur les autres végétaux (le peuplier, p. ex., inhibe la croissance d'autres plantes) ;

- la capacité de résistance aux parasites et aux maladies ;

- l'*appétence que constituent certains végétaux pour la faune (p. ex. *rat musqué, *ragondin, castor, ...).

LES CAUSES D'ÉCHEC LIÉES À LA MISE EN ŒUVRE

La meilleure façon d'éviter les problèmes consiste certainement en l'énumération des causes les plus fréquentes d'échec rencontrées lors de la réalisation d'ouvrages à l'aide des techniques végétales. Parmi les événements malheureux qui surviennent, la liste non exhaustive ci-dessous mentionne les plus courants :

1. choix d'une technique inadaptée ;
2. préparation insuffisante du terrain (*talutage, nivellement, débroussaillage) ou mauvais matériel de remblayage ;
3. mauvaise méthode de construction ou mode d'exécution mal adapté ;
4. période de travail inadaptée ;
5. mauvais choix de la végétation, aussi bien pour des

critères d'adaptation aux conditions de la station, que d'aptitude des espèces à fonctionner comme matériel vivant de construction ;

6. mauvais stockage des matériaux vivants, entre le prélèvement et leur utilisation ;
7. absence de soins et d'entretien à la végétation, lorsque la situation l'exige ;
8. mauvaise connaissance sur le site d'intervention des niveaux d'étiage et semi-permanents.

En fait, les fautes proviennent, pour la plupart, de l'insuffisance de prise en compte que les matériaux utilisés sont vivants et que pour être efficaces, ils doivent non seulement survivre, mais se développer dans les meilleures conditions.

Mis à part les détails spécifiques propres à chaque technique décrite au chapitre suivant, un certain nombre de principes généraux sont à respecter, quel que soit l'ouvrage considéré. La réussite dans l'entreprise des travaux y est subordonnée, au même titre que pour les facteurs stationnels et botaniques. En voici les principaux, livrés sans ordre particulier.

- Les outils de coupe doivent être le plus tranchant possible. Des cisailles à mâchoires enserrantes ou avec un côté plat finement crénelé seront préférées à toute autre à cause de leur efficacité dans la coupe franche des branches, jusqu'à 4 cm de diamètre.

- Que ce soit lors du prélèvement, du rabattement ou pour appointer la base des boutures, toutes les coupes effectuées sur du bois vivant, doivent être nettes et franches, sans écorchures.

- Tout matériel végétal susceptible de rejeter (composante vivante de l'ouvrage) doit être prélevé sur des sujets sains et vigoureux.

- Le temps qui sépare le prélèvement des végétaux de leur implantation dans l'ouvrage, doit être réduit au minimum. Si pour des raisons d'organisation, un temps d'attente est inévitable, on choisira pour le stockage temporaire, un lieu ombragé qui offre la possibilité de

mettre la base des branches dans l'eau.

- L'utilisation de matériel mort ou non adapté, non susceptible de reprise et de croissance, est absolument proscrite et la mise en place des boutures doit impérativement être effectuée durant la période propice (voir calendrier, figure 7).

- Tout segment végétal destiné à être planté ou enfoui partiellement en terre en vue de rejeter, doit être dirigé de manière à respecter la polarité du rameau.

- Les pieux utilisés, que ce soit comme support de tressage, pour fixer des fascines ou autres, doivent absolument être battus mécaniquement pour offrir une résistance suffisante aux crues. En général, le battage des pieux s'opère avec une petite pelle hydraulique articulée (mini-excavatrice entre 2000 et 5000 kg) nécessaire aux travaux de remblayage et de façonnage des berges. A l'extrémité du bras on fixe un brise-roche dont la broche, à extrémité plate, s'adapte à un manchon prolongé par une douille cylindrique d'environ 15 cm de diamètre formant une cloche (fig. 5). La pièce étant très sollicitée au niveau des vibrations, elle doit être usinée en un seul bloc avec un acier 90 kg. Les modèles ayant fait leur preuve dans ce domaine répondent aux critères suivants :

Caractéristiques du brise-roche	Pelle 2.0 - 3.5 T	Pelle 2.5 - 4.5 T
Poids (kg)	env. 105	env. 160
Pression de travail (bars)	80-140	100-150
Vitesse de frappe (coups/min.)	900-1300	900-1300
Ø broche (mm)	50	60

En fonction de la résistance du substrat, des engins plus légers peuvent aussi fonctionner.

- Toutes les extrémités qui ont été battues, que ce soit manuellement pour des boutures ou mécaniquement pour des pieux, peuvent être endommagées. Il est alors nécessaire de rabattre

l'extrémité, avec une cisaille ou une tronçonneuse suivant le diamètre, afin d'avoir une coupe franche, ce qui évite le développement de pourritures nuisant à la vitalité des plantes. Cette intervention est également nécessaire en fin de réalisation, pour obtenir un ouvrage le plus compact possible, dépourvu d'aspérités inutiles qui provoquent des

turbulences en cas de crue et offre d'avantage de prise au courant.

■ Les branches d'un tressage, d'une fascine ou d'un tapis, doivent être en contact direct avec de la terre pour pouvoir rejeter. On y veillera notamment lors de la mise en place de *géotextile. Ainsi, un tressage ou une fascine sera toujours bien appliqué au sol, et de la terre sera toujours remblayée entre les branches côté berge. De même, les branches d'un tapis doivent être en contact avec le sol sur toute leur longueur.

■ Lors de l'enfouissement partiel de branches dans un caisson *végétalisé ou un lit de plants et *plançons, tout vide est à exclure. A cet effet, un tassement du remblai couche après couche est nécessaire.

■ Certains saules (p. ex. *Salix triandra*) possèdent des branches de base très courbes, impossibles malgré leur diamètre à être utilisées comme pieux. On les emploiera avantageusement dans les remblais et non en construction tressée.

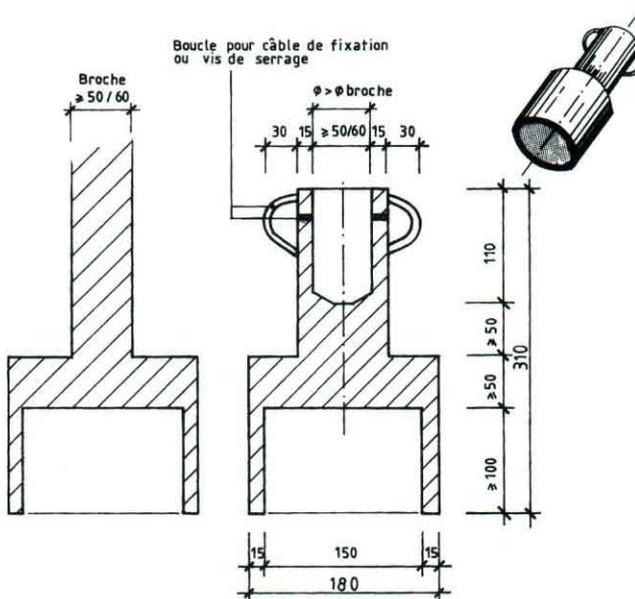


Figure 5.
Exemples de cloche pour le battage mécanique des pieux

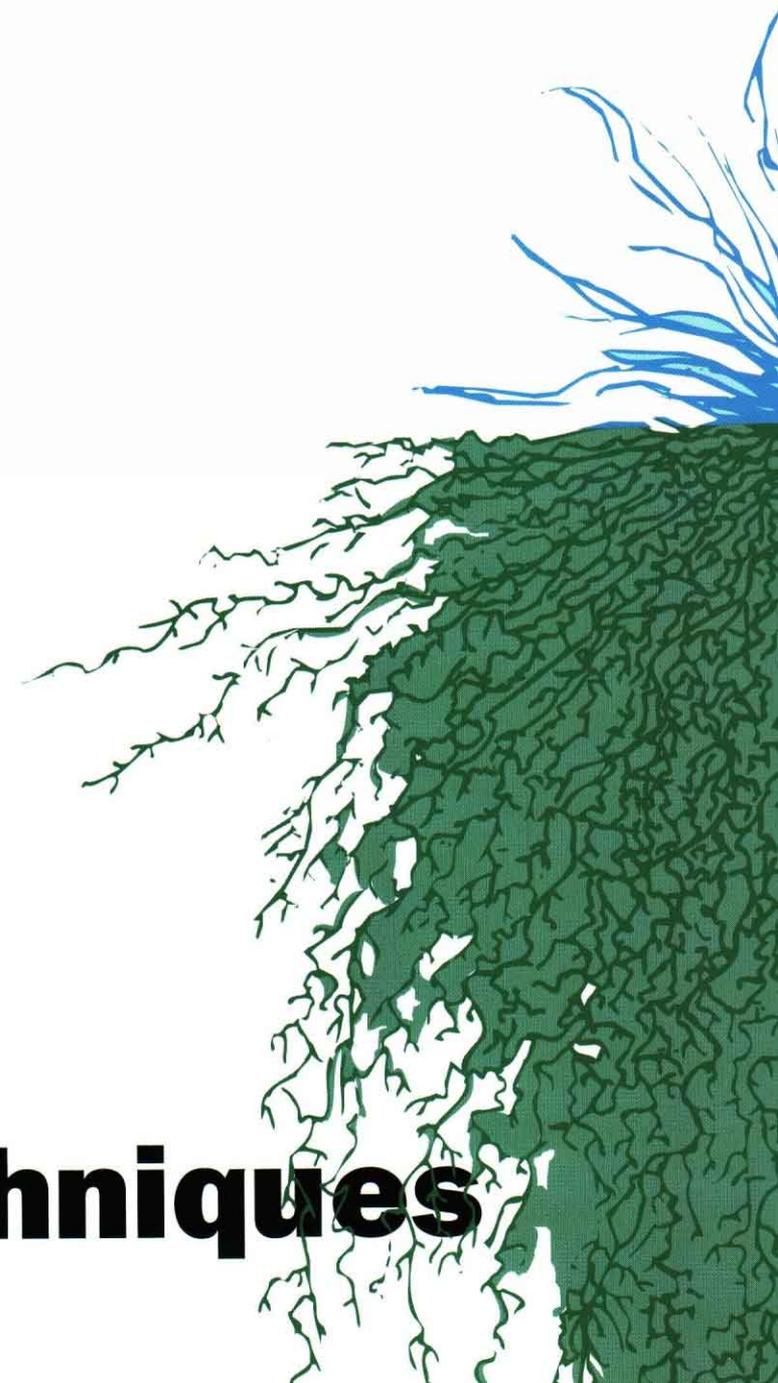
FACTEURS HUMAINS

Finalement, les facteurs humains sont tout aussi déterminants dans la réussite d'un ouvrage de protection de berge en techniques végétales. C'est pourquoi les domaines de connaissances, déjà exprimés, sont indispensables aux utilisateurs. De plus, il est particulièrement important de bénéficier d'entreprises spécialisées pour ces applications, dont la main-d'oeuvre possède le sens de l'eau et du végétal.

A ce propos, plusieurs organisations ont mis sur pied des cours de formations théoriques et pratiques dont le cours d'eau constitue un des éléments des connaissances enseignées. Les aspects

écologiques, la notion d'entretien et des méthodes d'aménagement y sont dispensées. Selon le programme proposé ou le degré de formation des candidats, ceux-ci peuvent choisir la filière qui leur convient le mieux.

En ce qui concerne la maîtrise d'oeuvre, une présence soutenue et un contrôle accru des conditions d'exécution sont indispensables. Le respect des plans et du cahier des charges propre à l'ouvrage par les entreprises s'avère incontournable lorsque le projet a été établi sur la base de critères hydrauliques et techniques particuliers au cours d'eau.



les techniques

Les techniques de base des constructions végétales se regroupent en trois catégories distinctes :

- utilisation de plantes entières,
- utilisation de partie de végétaux,
- utilisation des graines.

Un des objectifs prioritaires du *génie végétal est d'arriver à une forte diversification et variabilité des éléments constitutifs des berges.

Non seulement leur pente, leur structure, leur configuration, etc. doivent varier, mais également leur composition

floristique. Pour ce faire, on s'attachera à établir, dans la mesure du possible, la diversité botanique souhaitée en relation avec le site.

Les saules constituent le groupe d'espèces *pionnières le plus utilisé dans la confection des ouvrages. Un plant de saule adapté est susceptible de fournir tout le matériel indispensable à une technique particulière (figure 6). Une bonne connaissance des espèces est indispensable. Afin d'aider à leur reconnaissance, des clés de détermination simplifiées sont données en annexe A6.

Les saules à utiliser en techniques végétales en dessous de 1.200 m d'altitude sont :

Espèces	Taille normale	Port			Particularités	Etage (*)
		buisson	arbuste	arbre		
<i>Salix aurita</i>	1-3 m	X				C / M / S
<i>Salix nigricans</i>	1.5-5 m	X				C / M / S
<i>Salix purpurea</i>	1-6 m	X				C / M / S
<i>Salix cinerea</i>	3-6 m	X	(X)			C / M / S
<i>Salix atrocinerea</i>	3-6 m	X	(X)			C / M
<i>Salix appendiculata</i>	1-6 m	(X)	X		● □	M / S
<i>Salix triandra</i>	2-7 m	(X)	X			C / M
<i>Salix viminalis</i>	2-10 m		X			C
<i>Salix pentandra</i>	3-12 m		X	(X)	● □	C / M / S
<i>Salix caprea</i>	3-15 m		X	(X)	● □	C / M / S
<i>Salix daphnoides</i>	3-15 m		X	(X)		C / M / S
<i>Salix elaeagnos</i>	2-15 m	(X)	X	(X)		C / M / S
<i>Salix fragilis</i>	5-25 m			X	●	C / M
<i>Salix alba</i>	5-30 m			X	●	C / M

● Ces espèces doivent être plantées en sommet de berge ou installées sous forme de boutures plutôt qu'être utilisées dans les techniques végétales spéciales de pied de berge (tressage, fascinage, etc.).

□ *Salix caprea* et *Salix appendiculata* n'assurent pas un bon pourcentage de reprise.

(*) Etage : C = Collinéen M = Montagnard S = Subalpin

Les descriptions ci-après, volontairement limitées aux techniques de base, sont présentées séparément de façon à faciliter l'usage du guide. D'autres techniques existent et le panachage de plusieurs d'entre elles peut

s'avérer utile voire indispensable.

L'utilisation de végétaux indigènes au détriment des espèces exotiques est, évidemment, une règle essentielle.

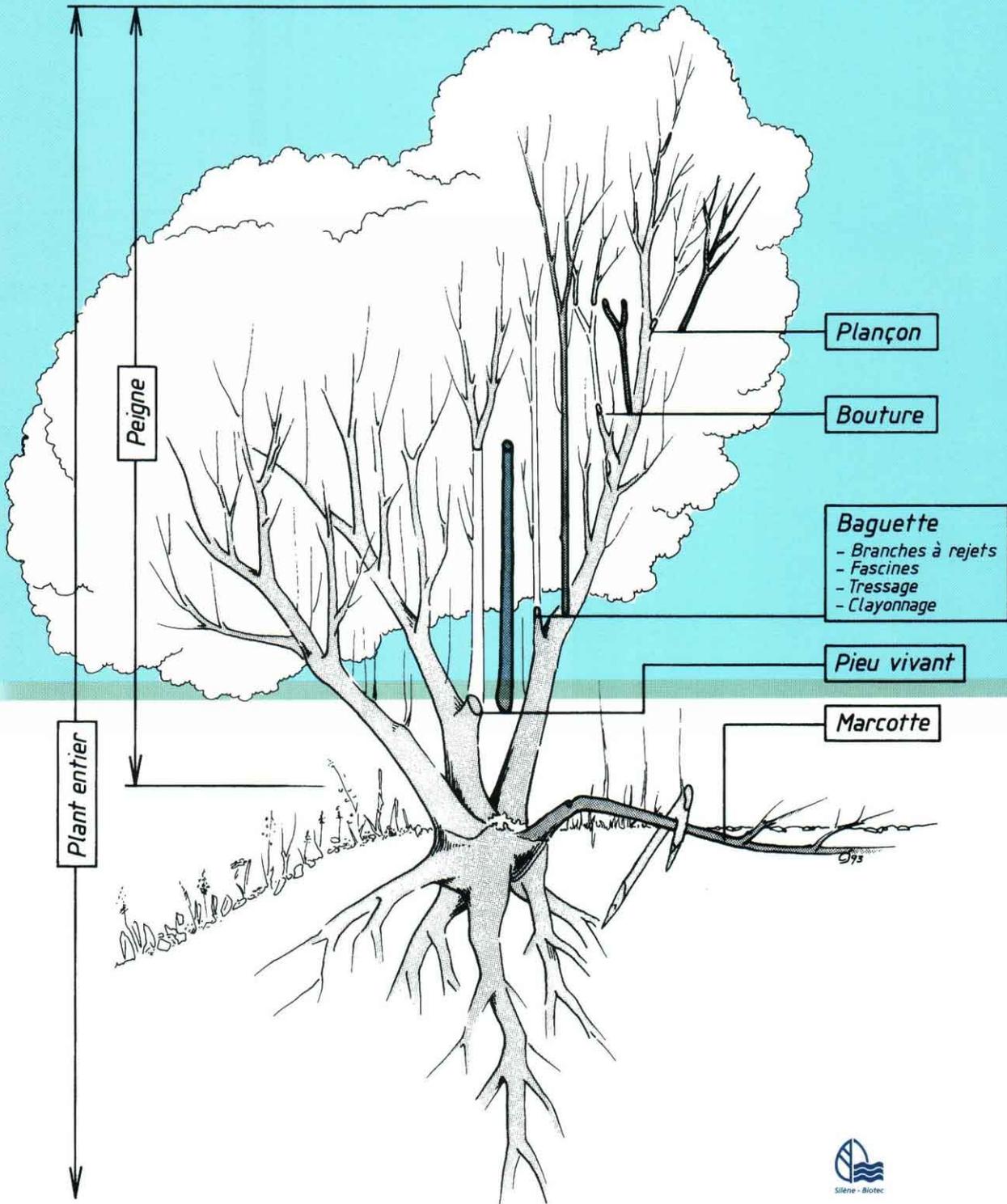


Figure 7.
Calendrier des
interventions en
cours d'eau en
fonction des
cycles naturels.
D'après [5]



		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
Lit	Faune aquatique	Cycle de reproduction Invertébrés / Insectes												
		Salmon.	Cyprinidés et autres						Salmonidés					
	Hydrophytes	Pêche sportive												
		Développement												
		Désherbage												
	Travaux dans le lit (seuil, épis, mouille, etc.)	Rég. cypr.	Régions salmonicoles										Régions cyprinicoles	
	Aménagements	Mottes Rhizomes				Bouturage				Mottes Rhizomes				
	Hélophytes	Soins aux boutures												
	Entretien	Fauçage												
	Aménagements	Ensemencement +												
Techniques végétales herbacées	Protection													
Entretien	Fauçage Désherbage													
Aménagements	Bouture, plançon, tressage, fascine, couche de branches, peigne, caisson													
	Bouture, plançon, tressage, fascine, couche de branches, peigne, caisson													
	Plantations													
Techniques végétales ligneuses	Plantations													
Entretien	Taille													
Faune terrestre	Nidification Reproduction Vertébrés													
	Entretien													
Végétation existante	+													
		+ = favorise - = épuise adapter en fonction de la faune												

L'application des diverses techniques végétales de protection de berge, les modifications éventuelles du lit pour compléter les ouvrages (seuils, épis, etc.) et les divers entretiens nécessaires ou possibles n'auront pas les mêmes effets et les mêmes incidences selon l'époque durant laquelle ils s'exécutent. Une parfaite

connaissance du milieu, mise au service des interventions, évitera bien des catastrophes écologiques. Pour aider à mieux cerner les périodes favorables aux diverses opérations sur un cours d'eau, le calendrier de la figure 7, synthétise mensuellement quelques paramètres écologiques et les actions possibles à mener.

Ce chapitre ne reprend pas les exigences déjà formulées au chapitre «conditions de réussite des techniques végétales», générales à toutes les techniques, quant à la qualité de mise en oeuvre. Seules les distinctions fondamentales et liées à la technique sont citées. Lorsque des coûts sont formulés, ils s'entendent hors taxes (H.T.). De plus, ils ne tiennent pas compte des

travaux préliminaires : installation et repliement de chantier, implantation et piquetage des ouvrages, plan de recolement, etc.

D'autres précisions sur les techniques ou des réflexions plus générales sur l'aménagement des cours d'eau, dans l'esprit du génie écologique, sont données notamment dans [5, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

BOUTURES

DESCRIPTION

Une bouture est un segment de branche (diamètre 2-4 cm, longueur 40-100 cm) ayant une forte capacité de rejets (saules, etc.) que l'on plante isolément ou en groupe et qui, en poussant, forme un nouveau buisson, un nouvel arbre.

CHAMPS D'APPLICATION

- Constitue une méthode économique et simple pour la stabilisation des talus et berges peu menacés de cours d'eau.

- Permet un *reverdissement rapide de talus et de berges où les forces tractrices sont peu élevées.

- Ne pas utiliser cette méthode dans des terrains très compacts où l'enracinement serait difficile.

- Si les berges de cours d'eau sont composées d'un matériel grossier et fortement drainant, faire attention à ce que les boutures ne se dessèchent pas si elles sont placées sur le haut de berge.

AVANTAGES

- Peuplement *pionnier ponctuel, facile à réaliser, nécessitant peu de moyens mécaniques et financiers.

- Une fois que la plante a repris, bon développement.

DESAVANTAGES

- Effet ponctuel et peu stabilisant au niveau mécanique, avant que les boutures aient repris (1 à 2 périodes de végétation).

PREPARATION DU TERRAIN

La mise en place des boutures demande peu de travaux préparatoires. Cependant, un nettoyage de la berge, un débroussaillage (ronces, buissons, hautes herbes, etc.), l'élimination de quelques gros cailloux sont souhaités.

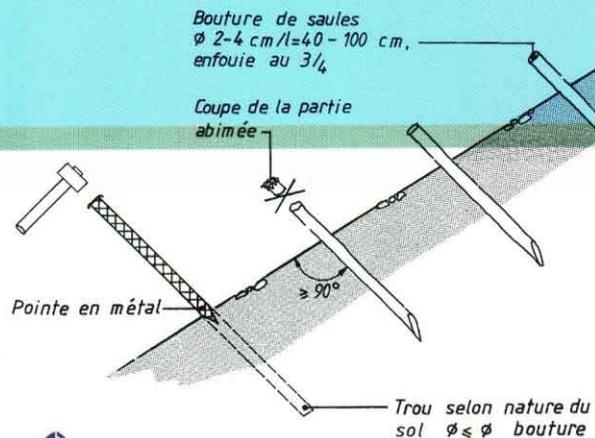
MISE EN OEUVRE ET *PHASAGE (figure 8)

- Selon la nature du sol, préparer des trous avec une pointe en métal (barre à mine) d'un diamètre légèrement plus petit que celui des boutures (densité variable, mais entre 2-5 trous/m²).

- Enfoncer les boutures dans les trous en laissant dépasser à l'air libre environ un quart de la longueur, en veillant à les tourner dans le bon sens (bourgeons dirigés vers le haut).

- Les boutures doivent être relativement comprimées dans le trou généralement nécessaire à leur implantation. En d'autres termes, la bouture doit encore offrir une certaine résistance, lorsqu'on l'enfonce dans le trou et ne pas être complètement libre.

- Arroser la bouture à la pose avec environ 1 litre d'eau par pièce.



Silène - Biotec

Figure 8.
 Le bouturage du saule.

COÛTS

Les coûts sont difficiles à estimer et très variables selon les régions et les quantités. Ils peuvent être très bas si la possibilité existe de prélever les matériaux sur place. Prix indicatif comprenant la fourniture et la mise en oeuvre : entre 6,00 et 30,00 F / pièce.

LIT DE PLANTS ET PLANCONS (= BOUTURES)

DESCRIPTION

Sur une berge plus ou moins terreuse ou limono-sableuse, des branches de saule capables de rejeter ainsi que des plants à racines nues sont disposés côte à côte, en rang serré, dans de petites tranchées étagées sur plusieurs niveaux. Chaque rangée de branches est recouverte avec le matériel excavé de la saignée supérieure. Le résultat donne des cordons de végétation horizontaux et parallèles. Cette disposition peut aussi être adoptée lorsque l'on reconstitue une berge par couches successives. Les lits de plants et *plançons sont simplement déposés sur les couches successives du remblai. Les racines se développent et pénètrent rapidement et profondément. Elles ont un effet drainant et stabilisent bien des fonds mouvants. La structure créée par les rangées de branches diminue l'érosion superficielle par ruissellement et prévient les glissements de terrain superficiels.

CHAMPS D'APPLICATION

- Pour des consolidations rapides.
- Sur des pentes instables présentant des dangers de glissement.
- Pour reconstituer des berges mêmes hautes, après effondrement.
- Pour des pentes raides.

AVANTAGES

- Technique très simple et bon marché.
- Pénétration profonde des racines.
- Possibilité d'intégrer d'autres essences que le saule grâce aux plants à racines et d'éviter ainsi une monoculture.
- Ouvrage colonisable spontanément par d'autres plantes, qui est souvent le théâtre d'une succession végétale naturelle.

DESAVANTAGES

- Ouvrage nécessitant beaucoup de matériel végétal.

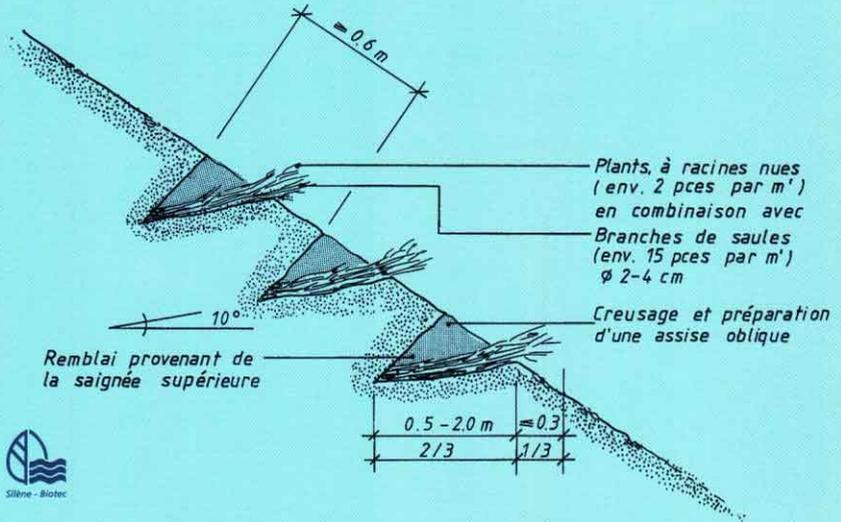
PREPARATION DU TERRAIN

Si on travaille uniquement en remblai, il s'agira d'avoir en pied de berge une surface relativement plane, libre de toute végétation ou blocs de pierres, afin de pouvoir réaliser la première assise sur laquelle reposera le premier niveau de plants et *plançons. Si l'ouvrage se réalise en déblai, la berge doit être préparée, de manière à ne pas laisser d'obstacles importants pour ne pas gêner les travaux.

MISE EN OEUVRE ET *PHASAGE (figure 9)

- Au fond d'une berge terreuse, on ménage une saignée oblique pouvant varier de 0,5 à 2 mètres suivant les cas et qui présente une inclinaison de 10° orientée côté rive.
- Des branches de saule aptes à rejeter sont couchées les unes à côté des autres, en ordre serré, toujours avec la base des branches dirigée côté rive. Elles ne doivent pas dépasser le front du talus de plus du tiers de leur longueur, et généralement pas de plus de 30 cm.
- Des plants à racines nues peuvent également être couchés, intercalés entre les *plançons. On veillera à tailler leurs extrémités de manière à ce qu'ils croissent immédiatement à la verticale.
- Une fois couverte de branches, cette première saignée est remblayée avec le matériel excavé de la tranchée supérieure. Un bon compactage du matériel est nécessaire pour éviter les vides et pour que les branches soient en contact avec la terre sur toute la longueur enfouie.
- On peut également réaliser ce type d'ouvrage en remblai, ce qui est plus simple. C'est

Figure 9.
Coupe type des lits de
plants et *plançons



notamment le cas lorsque l'on reconstruit une berge effondrée. On donnera au remblai la forme d'une terrasse, également inclinée côté rive. Une fois la première rangée de branches installée, on peut continuer de remblayer, en compactant bien les matériaux terreux à la machine.

■ Pour augmenter l'efficacité de la structure interne, les plants et *plançons peuvent se croiser en "X" sous le remblai.

COÛTS

Prix indicatif comprenant la fourniture et la mise en oeuvre des matériaux : entre 100,00 et 180,00 F /m.

TRESSAGE

DESCRIPTION

Le tressage est une protection de pied de berge de faible hauteur (maximum 40 cm) réalisée avec des branches de saule vivantes, entrelacées autour de pieux battus mécaniquement. Le résultat donne un véritable "mur" végétal capable de résister à de fortes contraintes hydrauliques, le tressage des osiers entre les pieux constituant à lui seul une protection mécanique immédiate.

Le clayonnage, terme assimilé au tressage et plus répandu que ce dernier est en réalité un tressage plus haut que 40 cm. Il est construit sur la rive et est ensuite plaqué, à plat, sur la berge talutée et nettoyée pour favoriser le contact avec le sol.

CHAMPS D'APPLICATION

- Représente une méthode rapide et efficace pour stabiliser les bords de cours d'eau en pied de berge, sur des cours d'eau peu agressifs du point de vue érosif.
- Sur des cours d'eau puissants, le tressage est régulièrement accompagné

d'autres techniques de protection (boutures, couche de branches, plantations, etc.) car il ne constitue pas une technique appropriée pour la protection du talus en entier.

- Permet la réalisation d'épis provisoires sur les bords de cours d'eau.
- Permet de modeler le pied de berge de manière très souple pour diversifier l'écoulement et les habitats (granulométrie différenciée).
- Les pieux seront préférentiellement faits de saule mais peuvent aussi être façonnés avec d'autres essences ou être faits en bois mort d'acacia, de marronnier, de chêne, etc., ou en métal. La mise en place doit être effectuée durant la période de repos de la végétation.
- Au-dessus du tressage de pied, pour la stabilisation du talus, des tressages supplémentaires en escalier peuvent aussi être mis en place.

AVANTAGES

- Permet une protection immédiate, efficace et bon marché.

- Constitue par son effet mécanique une protection stable dès la mise en place, même avant que les végétaux aient repris et produit des racines.

- S'adapte de façon souple aux irrégularités de la berge.

- Technique très connue et répandue, d'où facilité de mise en oeuvre (savoir-faire des entreprises).

DESAVANTAGES

- Hauteur de protection relativement limitée et ouvrage nécessitant souvent d'autres techniques végétales accompagnatrices.

- Sur des petits cours d'eau, le fort développement de saules aura tendance à limiter quelque peu le gabarit si aucun entretien n'est réalisé après quelques années. C'est un élément dont il faut tenir compte dans la mise en oeuvre en se tenant le plus près possible de la berge ou en talutant éventuellement celle-ci.

PREPARATION DU TERRAIN

La mise en place d'un tressage demande souvent très peu de travaux préparatoires. Cependant, un nettoyage du pied de berge est nécessaire, de même que l'enlèvement de l'un ou l'autre gros bloc et le terrassement léger du pied de berge, de manière à ne pas empiéter sur le cours d'eau avec l'ouvrage.

MISE EN OEUVRE ET *PHASAGE (figure 10)

- Enfoncer par battage mécanique dans le sol, les pieux de saule (ou autres) d'une longueur de 150 cm au minimum, diamètre 7-12 cm. La distance entre les pieux doit être environ égale à 60-80 cm et le pieu situé le plus à l'amont du tressage sera enfoncé en retrait dans la berge de manière à ne pas créer d'obstacle à l'écoulement (tressage incurvé et rentrant dans la berge).

- Tresser les branches de saule avec toutes leurs ramilles entre les pieux

(longueur \geq 200 cm, diamètre 2-5 cm) de manière à constituer un mur végétal haut de 15-40 cm.

- Les extrémités des branches de saule seront dirigées côté aval, la base côté amont et enfoncée, si possible, dans le substrat du lit pour les premières couches. Pour les couches supérieures, la base de la baguette touchera la berge et ne sortira pas du tressage.

- Généralement, la première couche de branches est mise en place sur toute la longueur du tressage avant de passer à la couche supérieure et ainsi de suite.

- On prendra soin de presser au maximum les branches tressées vers le bas en se mettant debout sur le tressage ou en mettant une planche sur l'ouvrage, que l'on pressera avec le bras de la pelle hydraulique, afin d'obtenir un ouvrage le plus compact possible.

- Il est indispensable d'alterner l'appui sur les pieux à chaque couche de branches (répartition des forces), afin de ne pas provoquer un basculement des pieux.

- Il est possible de compléter la fixation des branches aux pieux avec du fil de fer galvanisé (diamètre 2-3 mm) ou de la ficelle agricole.

- Si le tressage est réalisé sur un bord de cours d'eau à substrat très fin (sable, limons, etc.), il est judicieux de placer un lit de branches (mortes ou vivantes) perpendiculairement au sens du courant et sous le tressage, afin d'éviter un déchaussement de l'ouvrage en cas de crue. L'emploi de *géotextiles est aussi possible.

- Il est important de remblayer l'espace situé derrière le tressage avec du matériel terreux, de manière à ce que les branches ne se dessèchent pas et prennent correctement racines.

- Une fois le tressage réalisé à hauteur désirée, couper l'extrémité des pieux dépassant au-dessus de l'ouvrage.

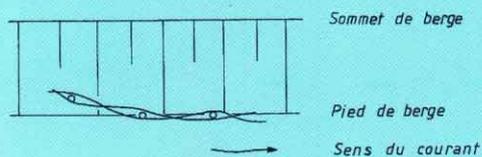
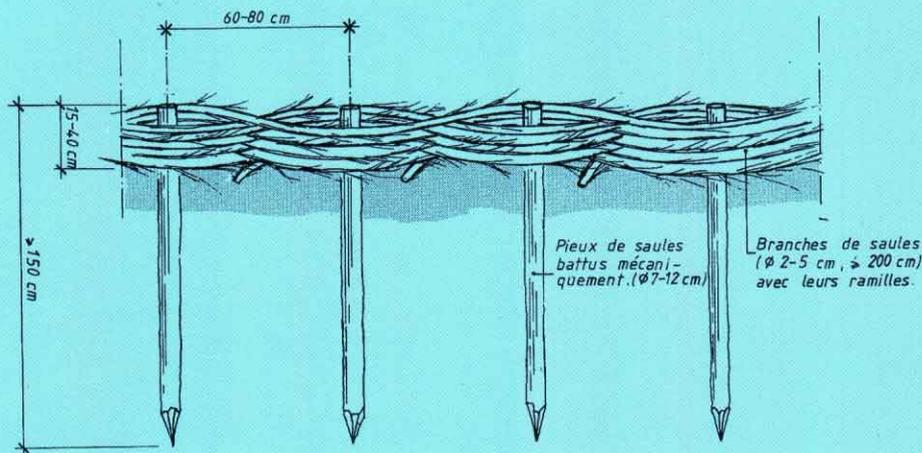


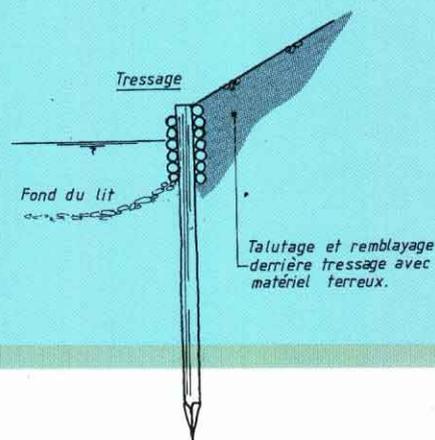
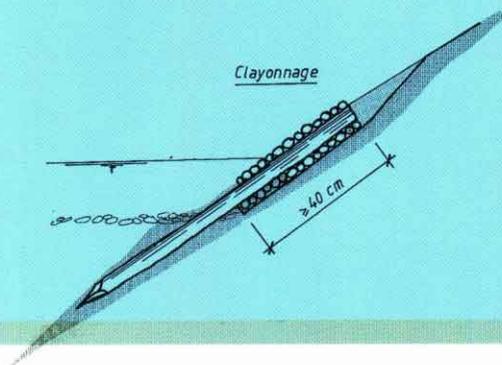
Figure 10. Détails du tressage



Vue longitudinale



Coupes



COÛTS

Les coûts sont difficiles à estimer et très variables suivant la longueur de la berge et les régions. Ils peuvent être considérablement diminués si

la possibilité existe de prélever le matériel sur place. Cependant, un prix indicatif moyen au mètre linéaire comprenant la fourniture des matériaux et la confection de l'ouvrage est donné :

pieux de saule	(2 pces/ml)	50 - 90 F / pce	100 - 180,00 F
		(y compris battage mécanique)	
branches de saule	(8 pces/ml)	5 - 8 F / pce	40 - 64,00 F
matériaux terreux derrière l'ouvrage		- 0,3 m ³ /ml	20,00 F
Total aménagement d'un mètre de tressage			160 - 260,00 F

FASCINE

DESCRIPTION

Le fascinage est une protection en pied de berge par la mise en place d'un ou plusieurs fagots de branches vivantes de saule (fascines), fixés par des pieux battus mécaniquement.

CHAMPS D'APPLICATION

- Constitue une méthode efficace pour stabiliser les bords de cours d'eau (pied de berge).

- Les fagots peuvent contenir en leur centre un noyau fait de galets, graviers ou matériaux terreux. Ces fascines de lestage complètent la protection du pied de berge.

- De même que le tressage, la fascine est régulièrement accompagnée d'autres techniques de protection (boutures, lit de plants et *plançons, couches de branches, etc.) car elle ne constitue pas une technique appropriée pour la protection du talus en entier.

- Protection très adaptée pour la stabilisation de niches d'érosion le long des cours d'eau.

- Protection convenant relativement bien pour des cours d'eau où l'étiage peut être relativement sévère et où les fascines se retrouvent hors de l'eau pendant quelque temps.

- Les pieux seront préférentiellement faits de saule mais peuvent aussi être façonnés avec d'autres essences ou être faits en bois mort d'acacia, de marronnier, de chêne, etc., ou en métal. La mise en place doit être effectuée durant la période de repos de la végétation.

- Permet la réalisation d'épis vivants sur les bords du cours

d'eau si l'on prend soin de remplir le noyau de la fascine avec des matériaux terreux.

- Au-dessus de l'ouvrage de pied, des petites fascines, disposées sur le talus de façon oblique, peuvent être mises en place pour protéger le talus.

AVANTAGES

- Permet une protection solide dans les endroits où le pied de berge est sapé.

- S'adapte aux irrégularités de la berge.

- Constitue par son effet mécanique une protection stable dès la mise en place, même avant que les végétaux aient repris.

DESAVANTAGES

- Nécessite de grandes quantités de saules et est un peu plus difficile à réaliser que le tressage.

- Hauteur de protection limitée au pied de berge.

- Sur de petits cours d'eau, le fort développement des saules aura tendance à limiter quelque peu le gabarit, si aucun entretien n'est réalisé après quelques années. C'est un élément dont il faut tenir compte dans la mise en oeuvre, en se tenant le plus près possible de la berge.

PREPARATION DU TERRAIN

Outre le nettoyage, le débroussaillage ou l'enlèvement de l'un ou l'autre gros blocs propres à tous les ouvrages en techniques végétales, la réalisation d'une petite assise, légèrement creusée, est nécessaire.

MISE EN OEUVRE ET *PHASAGE (figures 11 et 20)

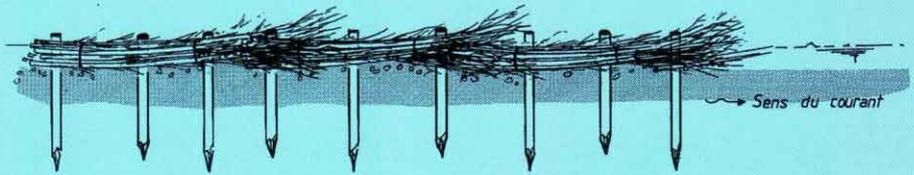
- Confection de la fascine sur la rive ou sur le lieu de prélèvement des saules ; branches de saule (longueur ≥ 200 cm, \varnothing 2-5 cm) attachées solidement ensemble tous les 80 cm environ avec du fil de fer galvanisé (\varnothing 2-3 mm), de manière à former un fagot (longueur 200-400 cm, \varnothing 20-40 cm). Les branches de saule sont compressées les unes aux autres avec un serre-fagots (outil régulièrement utilisé par les forestiers).
- Pose des fascines depuis l'aval vers l'amont, en prenant

soin de placer chaque fois l'extrémité aval (bout des branches) d'une fascine sur l'extrémité amont (base des branches) de la fascine suivante.

- Enfoncer les pieux à travers la fascine par battage mécanique. Les pieux de saule (ou autres) d'une longueur de 150 cm au minimum selon la nature des sols auront un diamètre de 7-12 cm et seront espacés de 60-100 cm. Afin de ne pas déstabiliser le pied de berge par compression lors du battage, les pieux pourront être inclinés de 90° par rapport à l'angle de la berge.

Figure 11.
Vue longitudinale
d'une fascine

Vue longitudinale



- Attaches complémentaires des fascines aux pieux avec du fil de fer.

- Remblai de matériaux terreux derrière la fascine indispensable, afin que les branches ne se dessèchent pas et prennent correctement racines.

- Une fois la fascine posée, couper l'extrémité des pieux dépassant au-dessus de l'ouvrage.

- Si la fascine est réalisée sur un bord de cours d'eau à substrat très fin (sable, limon, etc.), il est judicieux de placer un lit de branches (mortes ou vivantes) perpendiculairement au sens du courant sous la fascine, afin d'éviter un déchaussement de l'ouvrage en cas de crue (voir figure 20).

- Il est judicieux pour ne pas créer d'obstacle à l'écoulement, de placer l'extrémité amont du fascinage

à l'intérieur de la berge (fascine incurvée et rentrant dans la berge).

Variante :

La méthode de réalisation décrite ci-dessus constitue la fascine traditionnelle ; il est cependant très courant de modifier et d'adapter les méthodes du *génie végétal aux conditions locales du cours d'eau ou selon le savoir-faire et l'expérience de l'entreprise. C'est pourquoi il est également décrit la mise en oeuvre d'une variante (cf. figure 12) très répandue dans l'aménagement de cours d'eau :

- Enfoncement mécanique de deux rangées parallèles de pieux de saule (ou autres).

- Pose de branches de saule entre les pieux, que l'on prendra soin de compacter au maximum (en posant une planche perpendiculairement aux branches et que l'on

pressera à la pelle hydraulique).

- Il est également possible d'intégrer de fines couches de matériaux terreux entre les branches ou de ménager un noyau des mêmes matériaux.
- Une fois le niveau voulu atteint, attaches de fil de fer aux pieux perpendiculairement aux branches.
- Recouvrement de l'ouvrage avec des matériaux terreux afin que les branches ne se dessèchent pas et prennent correctement racines.

COÛTS

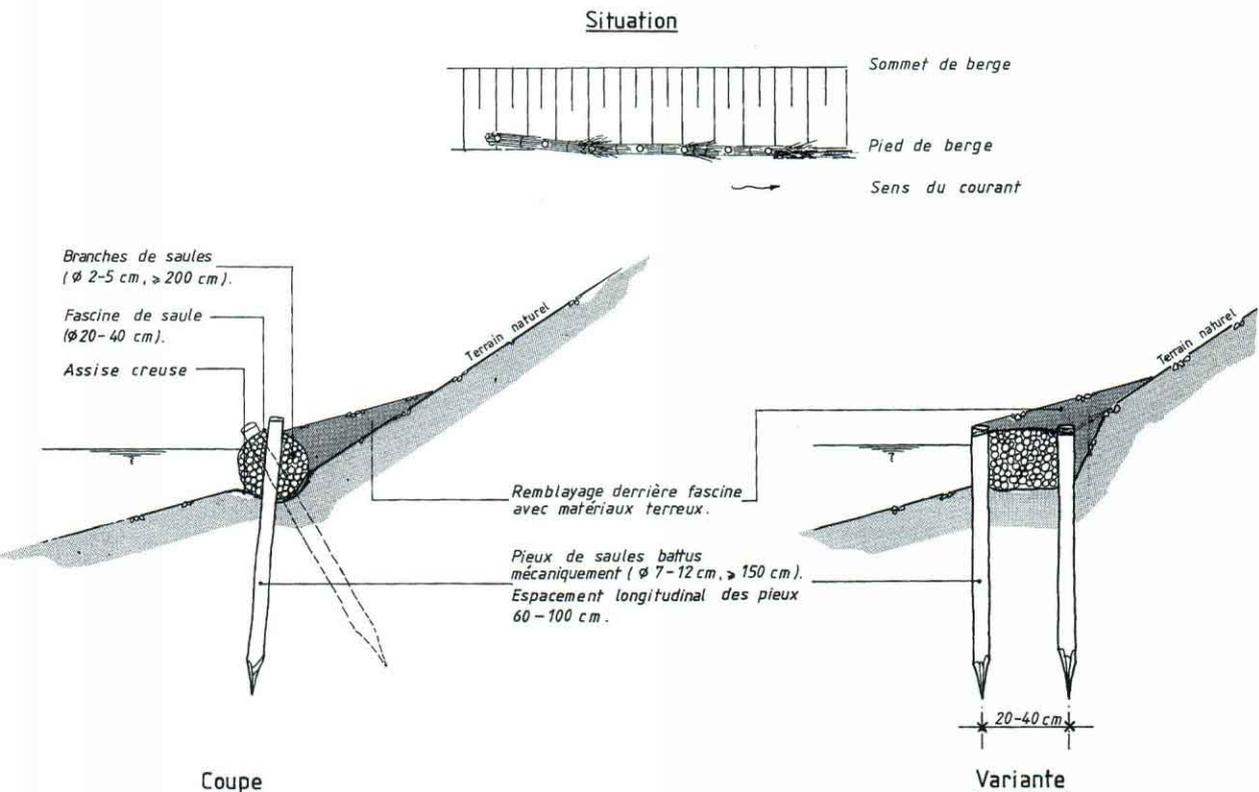
Les coûts sont difficiles à estimer et très variables suivant la longueur de l'ouvrage et les régions. Ils peuvent être considérablement diminués si la possibilité existe de prélever le matériel sur place. Cependant, un prix indicatif moyen au mètre linéaire comprenant la fourniture des matériaux, le battage mécanique des pieux obliquement et la confection de l'ouvrage peut être avancé comme suit :

pieux de saule	(1,5 pces/ml)	50 - 100 F / pce	75 - 150,00 F
branches de saule	(10-20 pces/ml)	5 - 8 F / pce	50 - 160,00 F
remblai derrière la fascine		- 0,3 m ³ /ml	20,00 F
Total aménagement d'un mètre de fascine			145 - 330,00 F

(Prix moyen en Franche-Comté, Champagne-Ardenne et Rhône-Alpes : env. 250 F / ml).



Figure 12.
Détails sur la confection du fascinage



COUCHE DE BRANCHES

DESCRIPTION

Les couches de branches vivantes constituent une protection de la berge par couverture du sol avec des éléments ligneux susceptibles de reprise et de croissance immédiate (branches de saule fixées, plaquées et maintenues par des pieux de saule ou autres). Cette technique est parfois appelée tapis de branches, matelas de branches, garnissage.

CHAMPS D'APPLICATION

- Talus et berges fortement menacés par le courant ou ayant subi une érosion et qui doivent être protégés en surface.
- Talus et berges où les forces tractrices sont élevées ou en conditions difficiles.
- Peuvent remplacer les *géotextiles.

AVANTAGES

- Les couches de branches à rejets sont immédiatement efficaces (effet mécanique exercé par le tapis avant que les bourgeons débourent) sur toute la surface de la berge.
- Elles croissent bien et forment un réseau très dense de racines.
- Permettent un *reverdissement rapide et total.
- Elles forment le long des cours d'eau une ceinture végétale dense et durable, capable de résister à de fortes crues.
- Permettent la reconstitution de saulaies résistantes.

DESAVANTAGES

- La réalisation d'une couche de branches nécessite beaucoup de matériel et de travail, d'où des coûts relativement élevés.

- Constitue un espace de saule tellement dense qu'il se passe beaucoup d'années avant que d'autres espèces ligneuses puissent s'installer naturellement et diversifier la berge aménagée (saulaies pures).

PREPARATION DU TERRAIN

Outre les travaux de débroussaillage et nettoyage mentionnés aux paragraphes précédents, la préparation du terrain pour la pose d'une couche de branches nécessite absolument un *talutage de la berge afin de produire une surface la plus régulière possible, sur laquelle viendront reposer les branches.

Si le substrat de la berge n'est pas propice à la croissance des végétaux, un apport supplémentaire de matériaux terreux sera nécessaire avant la mise en oeuvre de la couche de branches (min. 30 cm d'épaisseur).

MISE EN OEUVRE ET *PHASAGE (figure 13)

- Poser les branches de saule côte à côte de manière à masquer le sol (minimum 20 branches par mètre linéaire, longueur des branches variable, généralement ≥ 2 m et diamètre 2-4 cm). Les disposer perpendiculairement à l'axe longitudinal du talus ou de la berge à protéger, avec l'extrémité des branches dirigées vers le haut et la base placée au contact de l'eau.
- Enfoncer dans le sol des pieux de saule ou d'autres matériaux (longueur ≥ 60 cm, \varnothing 4-10 cm) destinés à fixer la couche de branches. Hors sol, ils dépasseront provisoirement de 20 cm. La distance entre les pieux doit être environ égale à 80-100 cm dans le sens vertical comme horizontal et la rangée inférieure des pieux sera

placée environ 20 cm au-dessus des extrémités inférieures des branches.

■ Fixer et plaquer les couches de branches par un treillage de fil de fer (généralement galvanisé, doublé et de 2-3 mm de diamètre) tendu entre les pieux d'une même rangée (parallèlement à la direction du courant ou du talus et donc perpendiculairement aux branches). Si l'on désire utiliser moins de fil de fer, il est possible de plaquer la couche de branches au sol avec des branches de saule rigides, attachées en croix et directement fixées aux pieux.

■ Il est essentiel pour une reprise optimale que les branches soient pressées contre le sol, c'est pourquoi une fois le fil de fer ligaturé aux pieux, ces derniers seront définitivement enfoncés (battus mécaniquement) de manière à maintenir et à plaquer correctement la couche de branches.

■ Recouvrir le tapis de branches d'une couche plus ou moins régulière et fine (environ 5 cm d'épaisseur) de terre végétale de manière à laisser encore apparaître les branches.

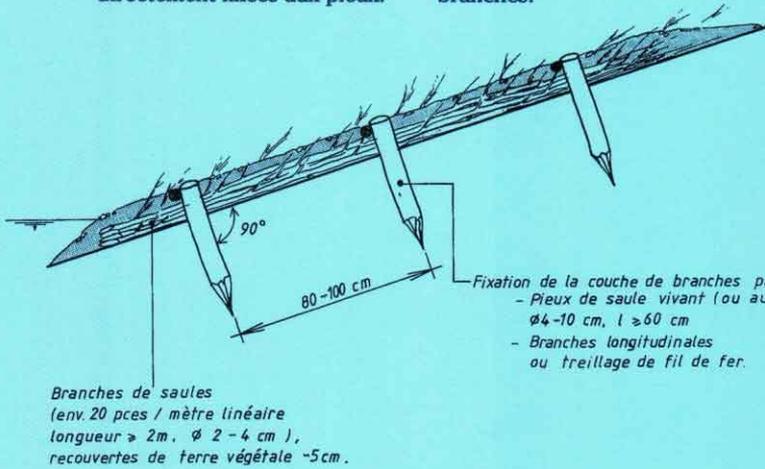
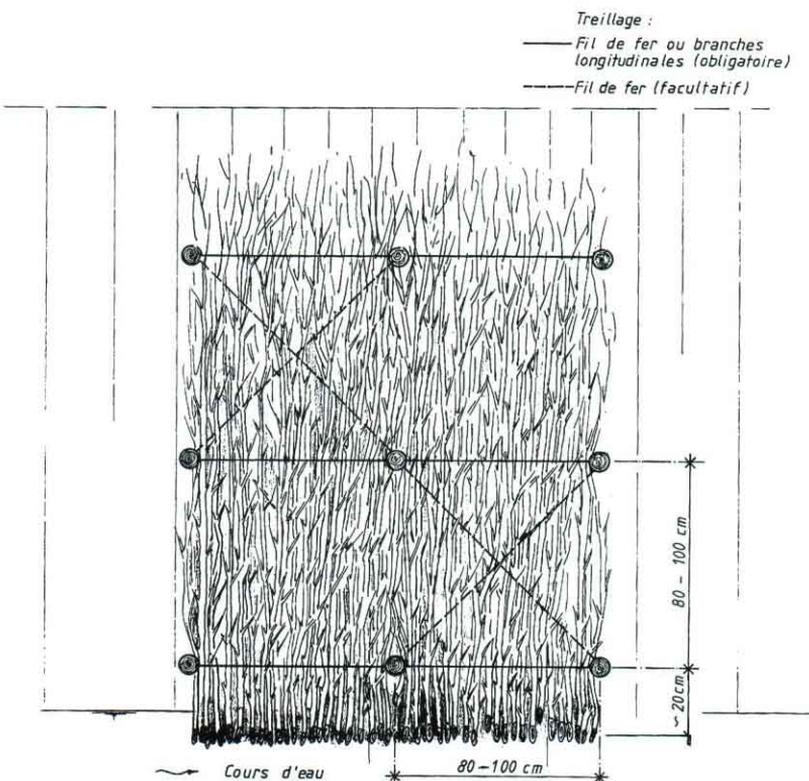


Figure 13.
Confection type
des couches de
branches vivantes



■ Selon le régime hydrologique du cours d'eau, une natte de protection sur le tout peut être souhaitable.

COÛTS

Les coûts sont à nouveau difficiles à estimer et très variables selon l'importance de

pieux de saule	(4 pces/ml)	50 - 90 F / pce	200 - 360,00 F
branches de saule	(20 pces/ml)	5 - 8 F / pce	100 - 160,00 F
fil de fer	(3 m/ml)	1 F / m	3,00 F
terre végétale	(2 m ² /ml)	10 - 20 F / m ²	20 - 40,00 F
Total aménagement d'un mètre de couche de branches à rejets			320 - 560,00 F

(non compris le *talutage ou apport éventuel de matériaux terreux en sous-couche : + 200,00 F).

Les coûts peuvent être fortement abaissés si on remplace les pieux de saule par d'autres types de fixateurs.

l'ouvrage et les régions. Ils peuvent être considérablement diminués si la possibilité existe de prélever les matériaux sur place en grande quantité.

Cependant un prix indicatif moyen au mètre linéaire comprenant la fourniture des matériaux et la confection de l'ouvrage est donné ci-dessous :

(Dans le Nord, des coûts d'env. 150,00 F/m² ont pu être avancés pour quelques ouvrages.)

PEIGNE

DESCRIPTION

Au pied d'une berge sapée, on entasse de manière enchevêtrée quantités de grosses branches, ramilles, troncs branchus et arbres solidement attachés de manière à former un ensemble végétal capable de filtrer les éléments en suspension dans l'eau. La densité des branches et des ramilles crée des séparations dans le courant qui traverse le peigne, réduit la vitesse d'écoulement et les sédiments fins peuvent alors se déposer et reconstituer la berge. On préférera le saule aux autres espèces.

CHAMPS D'APPLICATION

Convient pour lutter contre des niches d'arrachement, des *affouillements, des sapements de berge et des instabilités de pied. Le cours d'eau doit charrier et transporter des

éléments limono-sableux à chaque crue, même lors des plus petites (Q1).

AVANTAGES

- Effet immédiat de protection.
- Intervention peu coûteuse et rapide, applicable en cas d'urgence.
- Les saules, en produisant des nouvelles branches, augmentent l'effet de filtration.

DESAVANTAGES

- Utilisable uniquement sur des cours d'eau qui transportent beaucoup d'alluvions fines.
- Nécessite des crues fréquentes.

PREPARATION DU TERRAIN

Aucune préparation particulière du terrain n'est nécessaire.

du lit de plus de 80 cm (distance entre les pieux : 100-200 cm). Localiser la ligne des pieux là où l'on désire reconstituer le pied de berge.

MISE EN OEUVRE ET 'PHASAGE (figure 14)

■ Enfoncer, par battage mécanique des pieux de saule ou autre (longueur ≥ 200 cm, \varnothing 7-15 cm) de manière à ce qu'ils ne dépassent pas le fond

■ Entasser les branches, troncs et arbres parallèlement au sens du courant, éventuellement avec des éléments perpendiculaires, en dirigeant les grosses extrémités en aval. Une grande proportion de saules est souhaitable. Il faut veiller à ne pas mettre du peuplier (!).

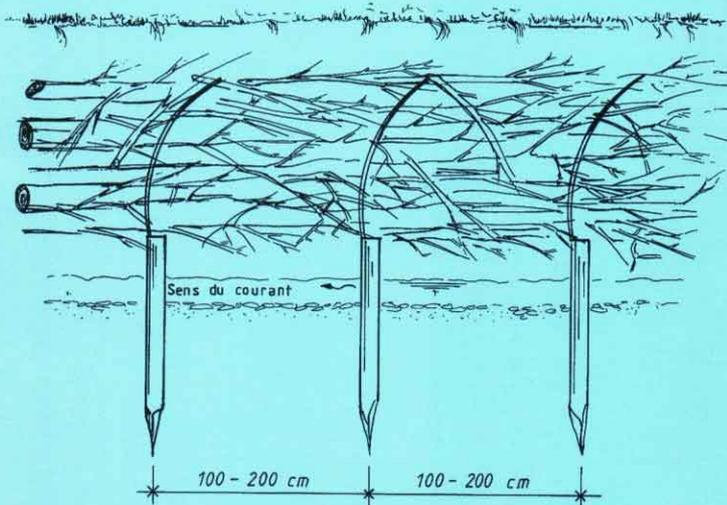
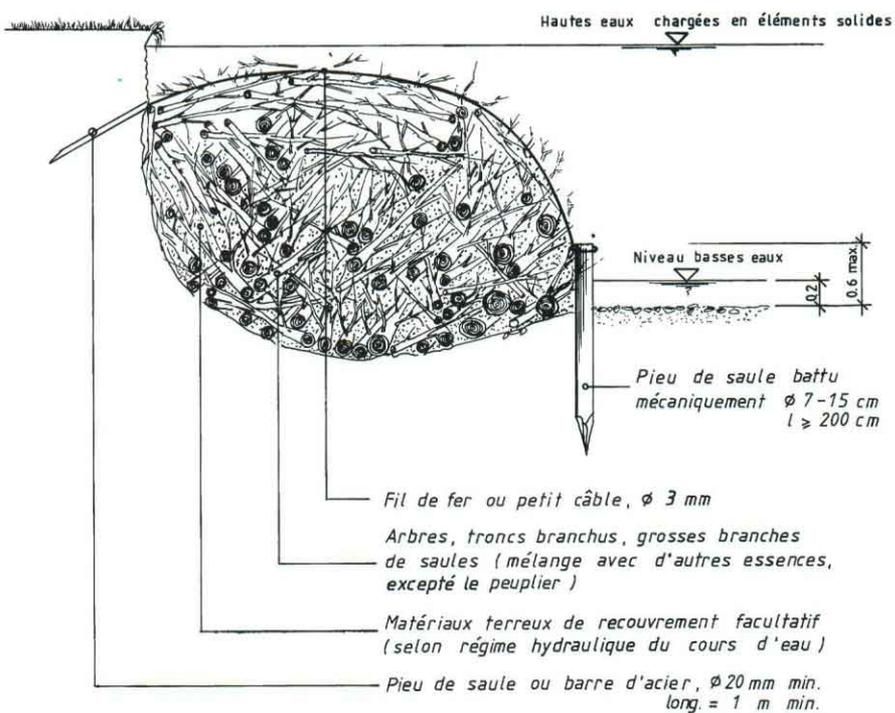


Figure 14.
Principe et
confection du
peigne



■ Il est possible d'intercaler une ou plusieurs couches de matériaux terreux entre les branches si l'on sait que le cours d'eau n'est pas très riche en éléments en suspension ou pour pallier à un manque de crue, selon l'état hydrique du *bassin versant (neige, etc.).

■ Enfoncer dans la berge (presque à l'horizontale) des pieux de saule ($\varnothing \geq 4$ cm) ou barres d'acier (longueur ≥ 100 cm, $\varnothing \geq 2$ cm).

■ Attacher solidement tout l'ouvrage avec du fil de fer galvanisé ou du petit câble ($\varnothing 3$ mm) tendu entre les pieux ou entre les barres d'acier fichées dans la berge et les pieux battus dans le lit.

■ Une fois le fil de fer ligaturé aux pieux (côté cours d'eau), ces derniers seront

définitivement enfoncés (battus mécaniquement) de manière à maintenir tout l'ouvrage le plus compact possible.

COÛTS

Les coûts sont difficiles à estimer et très variables d'un cas à l'autre (fonction du volume de la zone d'érosion à traiter). De plus, ce genre d'ouvrage peut tout à fait être réalisé, en ce qui concerne le remplissage, avec les produits d'entretien d'autres ouvrages ou des déchets de coupes effectuées dans les alentours. Cependant, un prix indicatif un mètre cube comprenant la fourniture des matériaux et la confection de l'ouvrage est donné :

pieux de saule	(1 pce/10 m ³)	50 - 100 F / pce	5 - 10,00 F
barre d'acier	(1 pce/10 m ³)	100 F / pce	10,00 F
branches, troncs branchus, arbres		50 F / m ³	50,00 F
matériaux terreux, attaches, etc.			80,00 F
Total aménagement d'un mètre cube de peigne			env. 150,00 F

PLANTATION

DESCRIPTION

Cette technique fait partie des opérations de végétalisation les plus simples et consiste à mettre en terre des espèces généralement ligneuses, élevées en pépinière, pourvues de racines nues ou au contraire munies d'une motte de terreau. Généralement, et pour des raisons déjà citées, cette technique ne s'applique qu'en sommet de berge pour les essences ligneuses de haut port. Des espèces buissonnantes et arbustives peuvent en revanche être plantées jusqu'à mi-pente dans la berge. En pied de berge, il est possible de procéder à la plantation de végétaux *hélrophytes, qui peuvent être prélevés dans le terrain lors de travaux de curage d'un étang, dans une *lône, une *noue, un bras mort, par exemple. On

aura pris soin de découper une motte de terre cubique d'environ 20 cm de côté, après avoir coupé ou non les organes aériens de la plante. Généralement, les plantations ne s'effectuent qu'en complément à d'autres techniques, mais rarement seules.

CHAMPS D'APPLICATION

- Pour *végétaliser la partie médiane et supérieure des berges.
- Pour *végétaliser des berges à faibles contraintes hydrauliques.
- Pour installer des végétaux *hélrophytes en courants peu agressifs.

AVANTAGES

- Intervention simple, nécessitant une préparation de terrain minimale.
- Etant donné que toutes les espèces végétales sont aptes à la plantation, cette technique permet d'apporter la diversité botanique souhaitée dans un aménagement.

DESAVANTAGES

- Champ d'application restreint, du moins pour des cours d'eau à fortes contraintes hydrauliques.
- Efficacité faible dans un premier temps.

PREPARATION DU TERRAIN

La plupart du temps, les plantations peuvent s'effectuer pratiquement sans préparation de terrain. Des travaux d'ameublissement du sol peuvent d'ailleurs rarement se réaliser sur une berge. Par contre un débroussaillage des plantes herbacées hautes est souvent nécessaire, afin de limiter la concurrence exercée sur les jeunes plants mis en place.

MISE EN ŒUVRE ET *PHASAGE

- Un trou préalable est creusé, plus ou moins important en fonction du sujet à planter, de manière à ce qu'on puisse installer le nouveau plant sans que les

racines soient comprimées au fond ou qu'elles se relèvent sur les côtés. Du matériel terreux doit se trouver au fond du trou.

- Des racines trop longues et encombrantes peuvent être taillées, mais le chevelu *racinaire est gardé intact.
- Les racines sont ensuite recouvertes de terre jusqu'au niveau du collet de la plante, à savoir au point de différenciation entre les racines et les organes aériens.
- Il est important qu'en recouvrant les racines, le matériau soit bien tassé, afin qu'aucun vide important ne se crée, car tout le réseau *racinaire doit être en contact direct avec la terre, pour assurer une bonne reprise.
- Les hautes tiges supérieures à deux mètres nécessitent généralement le tuteurage.
- Il est possible d'incorporer du compost ou d'introduire une pastille d'engrais dans le trou de plantation, mais cet apport est souvent superflu.

COÛTS

Le coût d'une plantation dépend beaucoup des fournitures et de la qualité des plants exigée. Quand au coût du travail uniquement, il peut s'étagger de 20,00 F à 100,00 F par pièce plantée, en fonction de la taille des plants, de l'importance du trou à creuser ou de la nécessité de mettre un tuteur.

Type	Fourniture	Plantation y.c. trou + arrosage	Total (approx.)
arbustes	15,00 F	5,00 F	20,00 F
plants forestiers	8,50 F	12,00 F	20,00 F
baliveaux 175-250	20 - 30,00 F	15 - 25,00 F	30 - 60,00 F
cépée 200/250	100,00 F	170,00 F	270,00 F
arbre fige 18/20	50 - 1 800,00 F	270,00 F	300 - 2 000,00 F

ENSEMENCEMENT

DESCRIPTION

La dispersion de graines d'herbacées peut se faire par l'intermédiaire de diverses méthodes : l'ensemencement à

sec, l'ensemencement hydraulique et l'épandage de fleur de foin sont les plus courantes. D'autres techniques, comme l'application de rouleaux de

gazon préfabriqué ou la plantation de mottes d'herbacées, sont peu utilisées dans l'aménagement des cours d'eau. Son action vise surtout à limiter le ruissellement et l'érosion en surface. Mais certaines herbacées possèdent un réseau racinaire suffisamment développé, pour qu'on puisse leur attribuer un rôle stabilisateur (cf. figure 3).

CHAMPS D'APPLICATION

Surtout valable pour assurer une stabilisation en surface, la plupart du temps, l'ensemencement accompagne d'autres techniques et souvent les plantations. Parfois, il est simplement destiné à fonctionner à très court terme, le temps que les rejets de boutures ou de branches recouvrent entièrement la surface à protéger (p. ex. sur les couches de branches à rejets). Hormis le semis hydraulique avec collage des graines et protection, appliqué seul, il ne suffit pas à la stabilisation de berges très pentues et ne résiste pas à des forces d'arrachement élevées.

AVANTAGES

- Il offre une colonisation végétale à haute densité, très régulière pour la technique du semis hydraulique.
- Il permet de végétaliser de grandes surfaces en peu de temps, surtout à l'aide de l'ensemencement hydraulique.
- Il offre la possibilité de garder certaines berges ouvertes, et d'apporter par endroit plus de lumière aux cours d'eau.
- Il assure une couverture protectrice de surface sur laquelle l'eau a peu d'emprise.

DESAVANTAGES

- Efficacité limitée en fonction des sols, de la pente et de la force d'arrachement du courant.

PREPARATION DU TERRAIN

L'ensemencement se réalise sur une surface partiellement ou totalement nue, dépourvue de végétation, soit après un apport de terre, après un dégrappage des matériaux en place ou sur une berge érodée dont on souhaite garder le faciès. Même des substrats bruts en sols pauvres peuvent être ensemencés, pour autant que le mélange de graines soit approprié. Un ensemencement sur une couverture végétale existante est voué à l'échec, de par la concurrence trop élevée exercée sur les jeunes plantules naissantes et par le fait que la graine n'arrive pas au sol généralement.

MISE EN OEUVRE ET PHASAGE

ENSEMENCEMENT À SEC

- Le mélange de graines est simplement épandu à la main. Pour de grandes surfaces (> 500 m²), on aura pris soin de diviser la surface en secteurs plus réduits et de peser chaque fois la quantité de graines correspondante.
- Pour des mélanges nécessitant une densité de semis très faible (5-15 g/m²), il est conseillé de mélanger les graines à du sable, sans quoi la densité ne sera jamais respectée.
- Si la topographie du terrain le permet et que le sol n'est pas trop humide, un roulage de la surface améliore les conditions de germination et de croissance.

FLEUR DE FOIN

- Une parcelle d'herbe dont les plantes dominantes sont au stade de la floraison est fauchée. Cette première opération doit s'effectuer le matin et de préférence par temps humide, afin de limiter les pertes.
- Ensuite, l'herbe est chargée et transportée, puis étendue à la fourche sur les parcelles prévues. En général l'herbe récoltée suffit à ensemencer une surface double de celle fauchée, mais si l'herbe est

très dense elle peut suffire pour une surface trois à cinq fois plus grande. On parle également de 0,5 à 2 kg de fleur de foin par mètre carré.

■ Une fois sèche, l'herbe épandue doit être laissée sur la parcelle, car elle agit contre l'évaporation et la brûlure des germes. Par contre, le foin sera évacué dès que les germes commenceront à *taller.

■ Cette méthode d'ensemencement ne peut se pratiquer que pendant une courte période de l'année, et ne convient pas pour de fortes pentes. De plus, elle exige beaucoup de manutention. Généralement, la fleur de foin utilisée manque de semences de plantes capables de coloniser des sols bruts.

ENSEMENCEMENT HYDRAULIQUE

■ L'eau est ici utilisée comme support qui permet l'épandage en un seul passage d'un mélange composé de graines, d'engrais, de *mulch (déchets organiques) et d'un produit naturel adhésif. L'équipement nécessaire à cette opération comporte une citerne munie d'une pompe et d'un malaxeur (hydroseeder), le tout installé sur camion ou tiré par un tracteur.

■ Cette méthode permet l'ensemencement de talus très raides non accessibles et des sols à substrat brut et rocheux. La capacité d'une telle technique est appréciable, puisque 10.000 à 20.000 m² peuvent être traités en une journée. La variabilité est fonction des accès, de la proximité d'une source d'eau et de la puissance du matériel.

■ Parmi les dizaines de techniques existantes, celle nécessitant le paillage des graines suivi de l'application d'un film bitumeux est aussi très répandue.

COÛTS

Les coûts peuvent varier de 4,00 F à 25,00 F / m², voire plus, fourniture comprise, en fonction des mélanges utilisés, des accès au chantier et de l'approvisionnement en eau. Les mélanges spéciaux contenant un grand nombre de *dicotylédones atteignent rapidement des prix très élevés en raison du prix des graines. La différence de prix entre l'ensemencement à sec ou hydraulique est généralement insignifiante.

CAISSON VEGETALISE A DOUBLE PAROI

DESCRIPTION

Les caissons présentent une structure faite de rondins de préférence en bois de *résineux. Cette structure est constituée par deux rangées parallèles de longrines sur lesquelles se fixent, à l'aide de tiges d'acier d'armature, des moises perpendiculaires aux longrines. Ces deux premiers étages de rondins constituent la base de la construction, qui se poursuit de la même manière jusqu'à la hauteur voulue. Au fur et à mesure du montage, le caisson est rempli de matériaux terreux, au moins dans la partie frontale, et des branches de saule aptes à rejeter sont couchées en rang serré entre deux étages de longrines.

Le caisson, de par sa structure en bois, offre une armature de soutien au talus et, de ce fait, offre une stabilisation immédiate. Les rondins protègent également les plantes pendant la période de croissance et ces dernières reprennent petit à petit la fonction de stabilisation au fur et à mesure du développement du réseau *racinaire et de la décomposition du bois. Avec le temps, le bois se conserve mieux si le caisson est fortement *végétalisé car les plantes maintiennent l'ombre et l'humidité nécessaires à sa pérennité. En cas de pourrissement, les racines occupent le volume manquant.

CHAMPS D'APPLICATION

- Pour des berges très raides et fortement sapées.
- Lorsque la berge fonctionne comme appui d'une infrastructure (route, voie ferrée, ...).
- Pour des terrains instables (glissement).
- Pour assainir et stabiliser des glissements.
- En remplacement de murs ou de *gabions.
- Lorsque la pente du cours d'eau et les forces tractrices sont élevées.

AVANTAGES

- Protection immédiate.
- Construction rapide et simple.
- Possibilité d'adapter la hauteur de l'ouvrage à toute situation.
- Ouvrage colonisable par n'importe quelle plante suivant les facteurs stationnels et les matériaux de remblais.

DESAVANTAGES

- Une bonne assise et une bonne fondation sont nécessaires pour la stabilité et la pérennité.
- Un ou des seuils sont parfois nécessaires, en complément, pour éviter le déchaussement de la base de l'ouvrage.

PREPARATION DU TERRAIN

Le caisson doit reposer sur une assise régulière et nivelée. Cette assise doit également être solide, résistante et ne pas se déformer. Dans un lit présentant une granulométrie dominante très grossière (cailloux ; galets), la préparation de cette assise peut se faire directement en travaillant et compactant le sol en place. Par contre, dans un substrat limoneux ou vaseux instable, un apport de tout-venant sera nécessaire. L'assise doit présenter une pente de 5 à 10 % orientée côté berge.

MISE EN OEUVRE ET

*PHASAGE (figure 15)

- Sur le terrain préparé, on pose les deux premières longrines.
- A chaque étage de rondins (longrines ou moises), le caisson est rempli de matériaux terreux, présents sur place ou amenés à pied d'oeuvre. Ces matériaux de remplissage doivent être compactés à la machine (godet de la pelle hydraulique ou rouleau léger), et un travail manuel complémentaire est nécessaire pour combler des vides sous les rondins.

■ Les moises placées perpendiculairement sur les longrines sont clouées à l'aide des tiges d'acier d'armature.

■ Entre deux étages de longrines et entre deux moises du même étage, des branches de saule capables de rejeter, sont couchées en rang serré, la base des branches à l'intérieur du caisson. Les branches ne doivent pas dépasser de plus de 20 à 30 cm le front du caisson.

■ Parmi les branches, on peut également intégrer des plants à racines nues que l'on couchera. Ils seront taillés de manière à ce que la croissance soit immédiatement verticale.

■ Pour la reprise des branches, il est important que chaque couche de matériaux terreux soit bien tassée, afin d'éviter les vides.

■ En cas de fortes arrivées d'eau de suintement ou lors d'un soutien de route, on peut prévoir une chemise drainante de galets, de graviers ou de tout-venant grossier, dans le fond et dans le dos du caisson. Les plantes jouent cependant un rôle non négligeable de drainage par les racines.

■ Il est envisageable d'incorporer un géotextile entre deux rangées de longrines, afin d'éviter l'évidement du caisson lorsque le diamètre des longrines est grand.

■ Si l'aménagement se réalise sur un long tronçon et que plusieurs caissons se succèdent, ils doivent s'emboîter sur environ 50 cm. Les caissons seront aussi assez courts pour offrir un pied de berge irrégulier et non rectiligne.

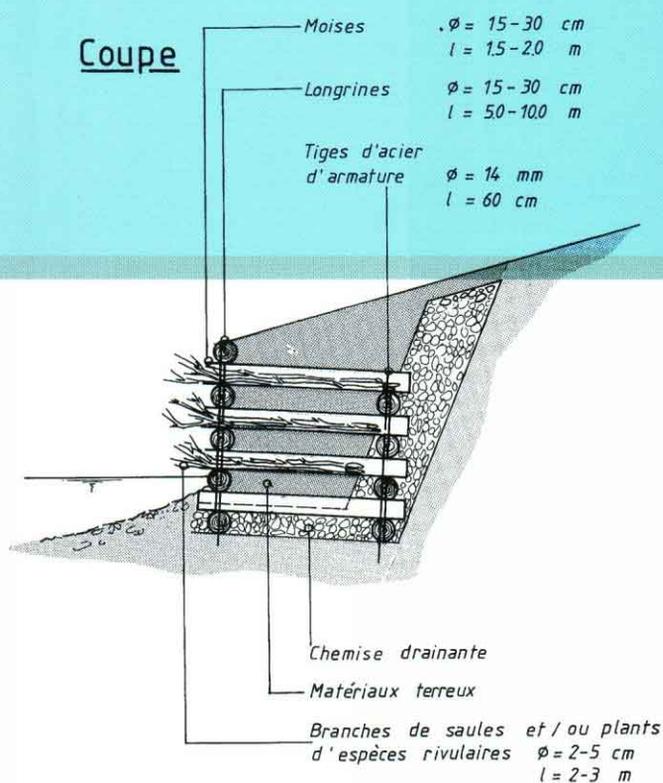
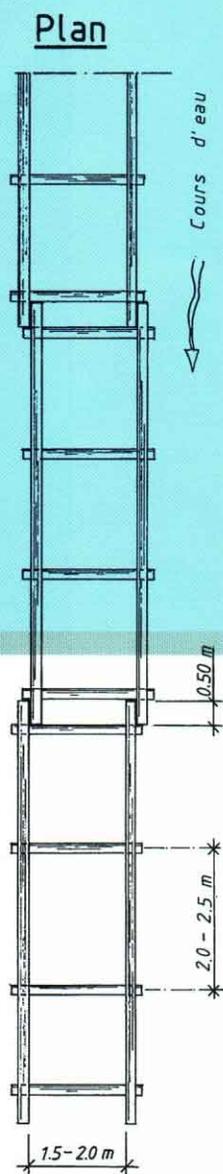


Figure 15.
Détails et principe
des caissons
*végétalisés à
double paroi



COUTS

Ils se calculent généralement soit au m^3 de bois utilisé, soit au m^3 d'ouvrage réalisé.

Les coûts sont très variables, en fonction de l'accessibilité, de la fourniture, etc.

Cependant, un coût avoisinant 1 600,00 à 2 500,00 F par m^3 de bois employé ou d'environ 240,00 à 500,00 F par m^3 d'ouvrage réalisé (travaux et toutes fournitures comprises) est régulièrement pratiqué.

GEOTEXTILES

Les *géotextiles sont des nattes faites de matériaux de synthèse (nylon, polyester, polypropylène, etc.) ou de fibres naturelles. Ils peuvent être tissés ou non-tissés et offrir des caractéristiques diverses. Les principales qui sont mises en jeu en protection de berge sont :

- l'ouverture de filtration,
- la *permittivité,
- la résistance à la traction, à l'allongement, au déchirement.

Les *géotextiles traditionnellement développés pour des constructions routières ou des drainages sont tous d'origine synthétique et ne sont que partiellement utilisables en *génie végétal. En effet, dans cette branche, leurs propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques ne sont pas les seuls critères déterminants de choix, puisqu'ils doivent également être aptes à la végétalisation, c'est-à-dire que tiges et racines doivent pouvoir les traverser. A cet effet, des essais d'aptitude sont recommandés, avant l'utilisation à grande échelle d'un *géotextile dont on ne connaît pas le comportement, ni celui de la végétation à son contact. Mis à part les ouvrages pour lesquels le *géotextile assure un rôle permanent comme élément d'armature, la durée d'efficacité requise pour le *géotextile est généralement 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 en plus, contribuent à la formation d'humus. Ils se composent généralement de jute, de fibre de coco, de laine de bois, de coton, de lin ou encore de roseaux et sont parfois doublés de fibres artificielles.

Les fonctions des *géotextiles dans les aménagements de cours d'eau peuvent se présenter comme suit :

Effet protection :

- contre les eaux de ruissellement et l'érosion

éolienne, jusqu'à ce que la végétation prenne le relais ;

- de la couche superficielle du substrat composant la berge, contre l'érosion due aux hautes eaux ;
- de la couche superficielle du substrat composant la berge contre un glissement.

Effet renforcement :

- par leur continuité, leur résistance à la déchirure et à la traction que le sol nu ne possède pas, ils améliorent les conditions de stabilité du talus, ou contribuent à la stabilité de l'ouvrage de protection ;
- ils affermissent les couches de sol peu cohérentes jusqu'à la pénétration complète des racines ;
- leur structure offre un support rugueux aux premières plantations et ensemencements ou au développement spontané de la végétation.

Effet filtre :

- ils limitent la migration des particules fines composant le substrat de certaines berges, lors de l'abaissement du niveau d'eau, et empêchent ainsi une érosion interne, pouvant provoquer une instabilité au niveau de l'ouvrage de protection.

Effet stimulation :

- ils permettent de protéger les graines, de maintenir de l'humidité et d'accumuler de la chaleur, propices à la germination et à la croissance végétale (effet de serre).

Dans le choix d'un ou de plusieurs *géotextiles, les contraintes physiques, la composition des sols et la capacité de pénétration des racines seront déterminants. On distingue trois principaux types de *géotextiles synthétiques.

LES TISSÉS :

tissus réalisés par l'entrecroisement de deux séries de fils parallèles. Ils peuvent être de composition monofilaments ou multifilaments.

AMELIORATION DE L'EFFICACITE PAR L'APPORT D'AUTRES MATERIAUX

LES NON-TISSÉS :

constitués de fibres réparties de manière aléatoire, et dont la cohésion est assurée par un traitement chimique, thermique ou mécanique.

LES EXTRUDÉS SEMI-RIGIDES :

structures à base de polymères, d'une haute résistance à la traction, plus communément appelés géogrilles.

Les tissés, pourvus de pores plus ou moins larges, n'entravent pas la croissance des végétaux et permettent aux semis d'avoir un contact rapide avec le sol. Cependant, des mailles trop petites étranglent relativement vite certaines racines de ligneux, diminuant la vitalité de la plante qui ne peut assumer complètement l'effet stabilisant attendu à moyen terme (fig. 16). Par contre, la faculté des plantes à s'enraciner au travers des non-tissés diminue avec l'épaisseur croissante de ce dernier. Souvent, les exigences relatives à la végétation ou celles qui incombent à la mécanique des sols et l'hydraulique sont opposés. Ainsi, un tissé à grandes mailles sera très favorable au développement de rejets de branches de saule ou à la croissance de végétation herbacée, mais remplira mal son rôle de filtre dans des

terrains composés de sédiments fins. Dans d'autres cas des rejets de plantes soulèvent un *géotextile aux mailles trop serrées, au lieu de la traverser. Ceci pour signifier que le choix du bon matériel n'est pas toujours simple, et qu'il est des situations où le *géotextile idéal n'existe pas.

D'une manière plus générale, le *génie végétal doit tendre vers l'utilisation de *géotextiles non synthétiques. Actuellement, des produits de surface putrescibles, non directement assimilables aux *géotextiles et appelés des nattes de couverture ou nattes de protection sont disponibles. Des nattes en fibres de coco et des tissus de jute, offrant des densités variables de 500, 730 et 1000 g/m², ont récemment été testés positivement dans la résistance aux crues et dans la protection de techniques végétales sur divers types de cours d'eau en Suisse et en France (voir chapitre «examen de quelques réalisations» et figures 23 a-b). Ces nattes ont l'avantage de s'alourdir lorsqu'elles sont sous l'eau, de garder longtemps une humidité propice à la croissance végétale, de jouer l'effet de "*mulch", de fournir de la matière nutritive en se décomposant.



Figure 16.
Effet d'étranglement
produit sur des racines de
saule ayant pénétré dans
les mailles fines d'un
*géotextile tissé.

On peut dresser une liste des critères de choix, que l'on tendra à satisfaire au mieux :

- rôle du *géotextile
 - ▶ élément d'armature
 - ▶ protection
 - ▶ renforcement
 - ▶ filtre
- la durée d'efficacité désirée ou exigée,
- les espèces végétales prévues dans l'aménagement et leur faculté de s'enraciner à travers le *géotextile,
- la composition granulométrique du sol,
- la teneur en substances nutritives du sol,
- les conditions d'humidité,
- le climat.

Le concepteur-projeteur doit clairement établir les paramètres physiques, chimiques et biologiques qui agiront sur le *géotextile. Les notions de résistance à la rupture, allongement à l'effort maximal, résistance au poinçonnement, résistance à la perforation, résistance au déchirement, ouverture de filtration, durabilité U.V., durabilité chimique, durabilité biologique, permittivité, perméabilité sont autant de notions qu'il sera nécessaire de prendre en compte dans le choix de la natte. Ces caractéristiques doivent être identifiées pour chaque produit selon des procédures d'essais normalisées [31]. La détermination de l'ouverture de filtration en fonction des caractéristiques granulométriques et de cohésion du sol sous-jacent est très importante. La perméabilité du produit sélectionné doit être supérieure de 10 à plus de 100 fois, selon la nature du sol, à celle du sol sous-jacent de façon à ce que l'eau ne se mette pas en charge en arrière du géotextile.

De plus, en dehors du choix, la pose sera aussi un des éléments de la réussite de l'ouvrage. Il n'y a pas de recettes à donner pour la mise en place si ce n'est que le *géotextile ne doit pas partir avec la première crue venue. Les points suivants sont à traiter de façon minutieuse dans la mise en oeuvre [31] :

- la procédure d'agrément et de contrôle du géotextile,
- les conditions de stockage et de manutention,
- la préparation du support,
- la mise en oeuvre du matériau d'apport,
- l'assemblage par recouvrement ou par couture dans le sens longitudinal ou transversal avec respect du sens des écoulements (cours d'eau et ruissellement),
- l'ancrage en tête par enfouissement dans une tranchée ou sous le remblai supérieur.

D'autre part, un *géotextile ne doit pas se décoller du sol dans les courbes s'il est mis dans le sens de la longueur, il ne doit être remblayé en surface ni avec des matériaux gelés, ni trop gros, ni coupants, ni pointus. Lors de l'incorporation d'un tuyau dans sa structure, un habillage tout autour du tuyau est nécessaire, car cet élément sera très perturbateur en crue. Des renseignements complémentaires peuvent être trouvés dans [31] et [32].

En ce qui concerne les coûts de mise en oeuvre, seuls trois types de *géotextiles putrescibles en fibres de coco et de jute sont décrits, tellement la diversité des nattes est grande (informations partiellement recueillies dans la documentation des fournisseurs).

Treillis de jute

densité : 500 g/m ²	fourniture :	8,00 F / m ²
densité : 730 g/m ²	fourniture :	10,00 F / m ²
densité : 1'000 g/m ²	fourniture :	11,00 F / m ²
agrafes de fixation : (2 pces/m ²)		2,00 F / m ²
mise en place :		7 - 20,00 F / m ²

Total aménagement d'un mètre carré de treillis de jute : 17 - 33,00 F / m²

Treillis en fibres de coco

densité : 400 g/m ²	fourniture :	30,00 F / m ²
densité : 900 g/m ²	fourniture :	50,00 F / m ²
agrafes de fixation : (2 pces/m ²)		2,00 F / m ²
mise en place :		7 - 20,00 F / m ²

Total aménagement d'un mètre carré de treillis en fibres de coco : 39 - 72,00 F / m²

Natte de fibres de coco

fourniture	10 - 20,00 F / m ²
agrafes de fixation : (2 pces/m ²)	2,00 F / m ²
mise en place :	7 - 20,00 F / m ²

Total aménagement d'un mètre carré de natte de fibres de coco : 19 - 42,00 F / m²

Remarque :

le treillis en fibres de coco est nettement plus cher que le treillis de jute mais son

utilisation n'est pas la même, sa résistance étant plus grande, ainsi que le temps nécessaire à sa décomposition.

BOIS

Mis à part le matériel vivant utilisé, les techniques végétales ont régulièrement recours au bois. Il s'agit principalement de rondins ou de pieux comme cité précédemment cf. «caisson végétalisé à double paroi» (p. 70).

LES RONDINS

Ils sont notamment utilisés pour la construction de caissons *végétalisés à double ou simple paroi, différents types de palissade, ou encore des seuils. Leur diamètre varie de cas en cas suivant les ouvrages. Le bois de *résineux est fortement recommandé, pour des rondins en contact avec l'air et l'eau, en raison de sa putrescibilité moins rapide. Le pin ou le mélèze sont des essences idéales pour les caissons, mais ne sont pas toujours disponibles. Du bois de feuillus peut cependant être utilisé pour les rondins situés à l'arrière d'un caisson, entièrement recouvert de terre. La fonction des rondins, dans le cas des caissons, est

d'apporter une armature de soutien à effet immédiat, mais généralement, cette fonction est reprise à long terme par la végétation.

LES PIEUX

Ils servent de support aux tressages et aux fascines, ou encore pour fixer des fascines. Un diamètre de 7 à 12 cm est alors suffisant. Il est impératif pour une bonne tenue des ouvrages précités, que ces pieux soient battus mécaniquement. Le choix de l'essence du bois dépendra de la volonté de voir ou non les pieux rejeter. Disons d'emblée que pour des pieux de cette taille, la reprise n'est pas garantie. Cependant, des pieux de saule et à bien moindre mesure d'aune sont susceptibles de rejeter. Leur prélèvement sera possible sur les lieux du chantier. Par contre, si la reprise n'est pas souhaitée, des pieux de chêne, d'acacia ou de châtaignier sont préférables, mais le peuplier sera à éviter absolument.