

**Guide de protection  
des berges  
de cours d'eau en  
techniques végétales**

*BERNARD LACHAT*



# **Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales**

*Par Bernard Lachat*

EN COLLABORATION AVEC

*Philippe Adam*

*Pierre-André Frossard*

*René Marcaud*

*Bureau d'études Silène-Biotec*

ILLUSTRATIONS

*Martine Saucy*

*Claude Surmont*

*Bureau Biotec*

**1 9 9 4**

*réédition 1 9 9 9*



# **préface**



*La loi sur l'eau de 1992 ordonne la gestion des cours d'eau sur l'écosystème et son équilibre : ainsi, le législateur reconnaît à la Nature une place qu'elle n'aurait jamais dû perdre. Car, les aménagements inconsidérés nuisent à l'environnement donc aux ressources en eau et, en définitive à l'homme lui-même.*

*L'état d'un cours d'eau résulte des actions et réactions permanentes de la nature et de l'homme. Un cours d'eau en "bonne santé" garantit le maintien des activités humaines, alors que des travaux hydrauliques abusifs (rectifications, recalibrages) réduisent la capacité auto-épuratoire de la rivière et l'alimentation des nappes souterraines. Une gestion équilibrée, fondée sur la connaissance de l'écosystèmes en son entier, participe à la lutte contre la pollution et préserve la ressource en eau. Il n'y a pas opposition entre économie et écologie, mais nécessaire convergence.*

*L'entretien des berges, aspect essentiel de la gestion, a été trop longtemps négligé ou, au contraire, conduit avec des procédés dévastateurs. Mais, un peu partout des riverains, des pêcheurs, des écologistes, des collectivités locales ont aujourd'hui la volonté de réagir. Les techniques anciennes se sont souvent perdues, mais pas partout. En France peut-être plus intensément en Suisse, Allemagne, Autriche, des chercheurs et des praticiens se sont efforcés de les recueillir, analyser, expérimenter, expliciter. Aujourd'hui, nous disposons d'un capital de connaissances important, et l'on peut parler de "génie*

*végétal" adapté à l'entretien des berges : il faut l'exploiter.*

*Au travers de ce guide, le ministère de l'environnement veut présenter des solutions concrètes aux problèmes que rencontrent les hommes de terrain. Ce guide se veut pratique. Il est le fruit d'expériences menées en des milieux naturels variés, qui ont montré que l'on peut redonner durablement vie et harmonie aux rivières.*

*Mais ce guide n'est pas un livre de recettes. Le choix des techniques de restauration doit se fonder impérativement sur un diagnostic, analysant avec minutie non seulement l'état physique et biologique du milieu mais les préoccupations des riverains et de tous ceux qui ont des intérêts liés à la rivière. Sans cette démarche préalable, point de réussite assurée dans la restauration, ni dans l'entretien qui doit suivre, faute de ruiner les effets de la restauration. Le diagnostic déterminera où il faut agir (parfois c'est le libre jeu de la dynamique fluviale qui rétablira, sans travaux, l'équilibre perdu) et dans quelle mesure.*

*Grande ambition, la reconquête du milieu aquatique n'est nullement une utopie. Elle exigera un effort tenace, inspiré par l'expérience et la connaissance. Le guide veut contribuer à les diffuser.*

*Le directeur de l'eau*



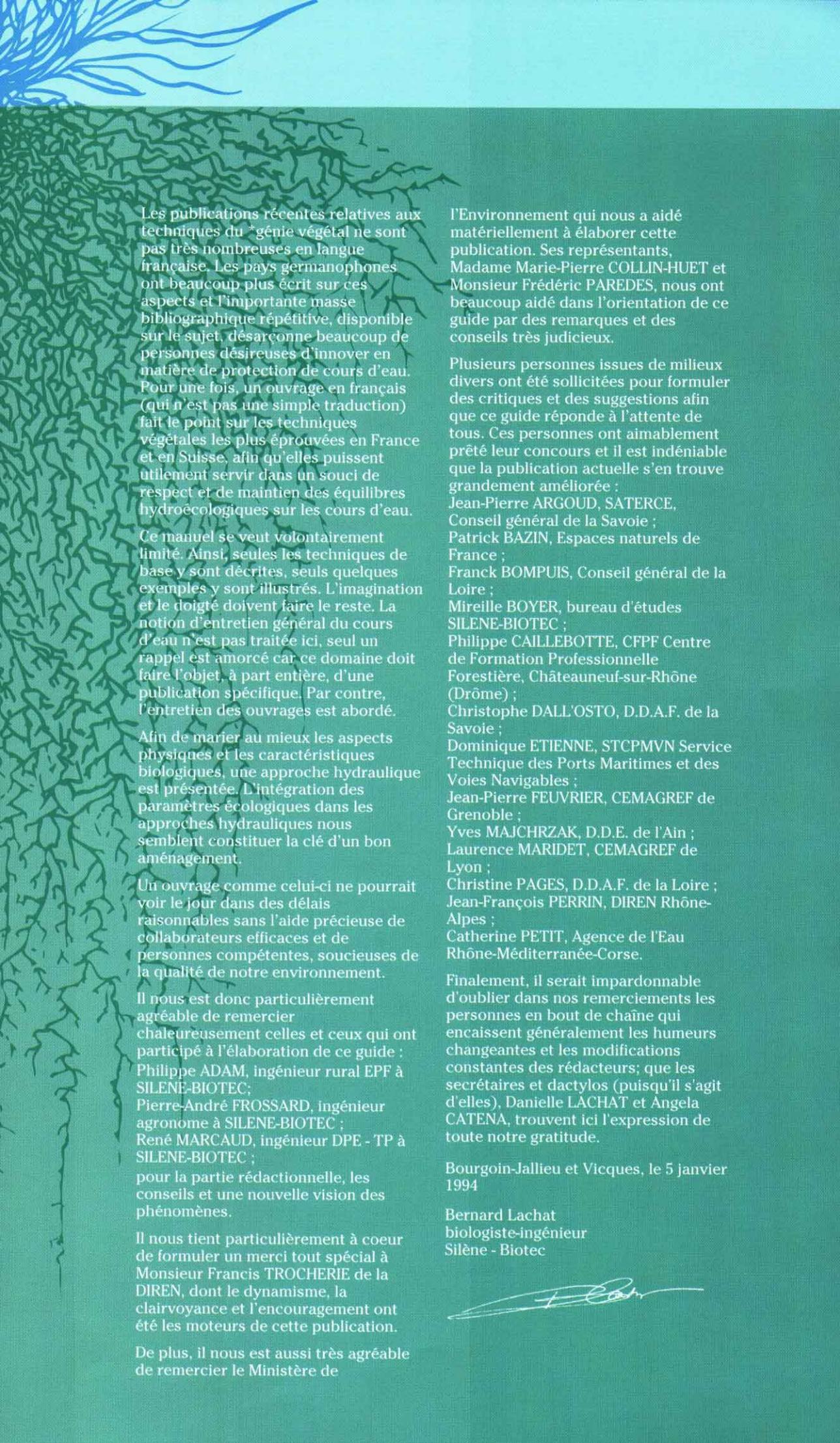
*Jean-Luc Laurent*



# avant propos

*Les mots précédés d'un astérisque (\*) sont expliqués dans le lexique.*

*Les numéros entre crochets sont des références bibliographiques.*



Les publications récentes relatives aux techniques du \*génie végétal ne sont pas très nombreuses en langue française. Les pays germanophones ont beaucoup plus écrit sur ces aspects et l'importante masse bibliographique répétitive, disponible sur le sujet, désarçonne beaucoup de personnes désireuses d'innover en matière de protection de cours d'eau. Pour une fois, un ouvrage en français (qui n'est pas une simple traduction) fait le point sur les techniques végétales les plus éprouvées en France et en Suisse, afin qu'elles puissent utilement servir dans un souci de respect et de maintien des équilibres hydroécologiques sur les cours d'eau.

Ce manuel se veut volontairement limité. Ainsi, seules les techniques de base y sont décrites, seuls quelques exemples y sont illustrés. L'imagination et le doigté doivent faire le reste. La notion d'entretien général du cours d'eau n'est pas traitée ici, seul un rappel est amorcé car ce domaine doit faire l'objet, à part entière, d'une publication spécifique. Par contre, l'entretien des ouvrages est abordé.

Afin de marier au mieux les aspects physiques et les caractéristiques biologiques, une approche hydraulique est présentée. L'intégration des paramètres écologiques dans les approches hydrauliques nous semblent constituer la clé d'un bon aménagement.

Un ouvrage comme celui-ci ne pourrait voir le jour dans des délais raisonnables sans l'aide précieuse de collaborateurs efficaces et de personnes compétentes, soucieuses de la qualité de notre environnement.

Il nous est donc particulièrement agréable de remercier chaleureusement celles et ceux qui ont participé à l'élaboration de ce guide :

Philippe ADAM, ingénieur rural EPF à SILENE-BIOTEC;

Pierre-André FROSSARD, Ingénieur agronome à SILENE-BIOTEC ;

René MARCAUD, ingénieur DPE - TP à SILENE-BIOTEC ;

pour la partie rédactionnelle, les conseils et une nouvelle vision des phénomènes.

Il nous tient particulièrement à coeur de formuler un merci tout spécial à Monsieur Francis TROCHERIE de la DIREN, dont le dynamisme, la clairvoyance et l'encouragement ont été les moteurs de cette publication.

De plus, il nous est aussi très agréable de remercier le Ministère de

l'Environnement qui nous a aidé matériellement à élaborer cette publication. Ses représentants, Madame Marie-Pierre COLLIN-HUET et Monsieur Frédéric PAREDES, nous ont beaucoup aidé dans l'orientation de ce guide par des remarques et des conseils très judicieux.

Plusieurs personnes issues de milieux divers ont été sollicitées pour formuler des critiques et des suggestions afin que ce guide réponde à l'attente de tous. Ces personnes ont aimablement prêté leur concours et il est indéniable que la publication actuelle s'en trouve grandement améliorée :

Jean-Pierre ARGOUD, SATERCE, Conseil général de la Savoie ;

Patrick BAZIN, Espaces naturels de France ;

Franck BOMPIUS, Conseil général de la Loire ;

Mireille BOYER, bureau d'études SILENE-BIOTEC ;

Philippe CAILLEBOTTE, CFPF Centre de Formation Professionnelle Forestière, Châteauneuf-sur-Rhône (Drôme) ;

Christophe DALL'OSTO, D.D.A.F. de la Savoie ;

Dominique ETIENNE, STCPMVN Service Technique des Ports Maritimes et des Voies Navigables ;

Jean-Pierre FEUVRIER, CEMAGREF de Grenoble ;

Yves MAJCHRZAK, D.D.E. de l'Ain ;

Laurence MARIDET, CEMAGREF de Lyon ;

Christine PAGES, D.D.A.F. de la Loire ;

Jean-François PERRIN, DIREN Rhône-Alpes ;

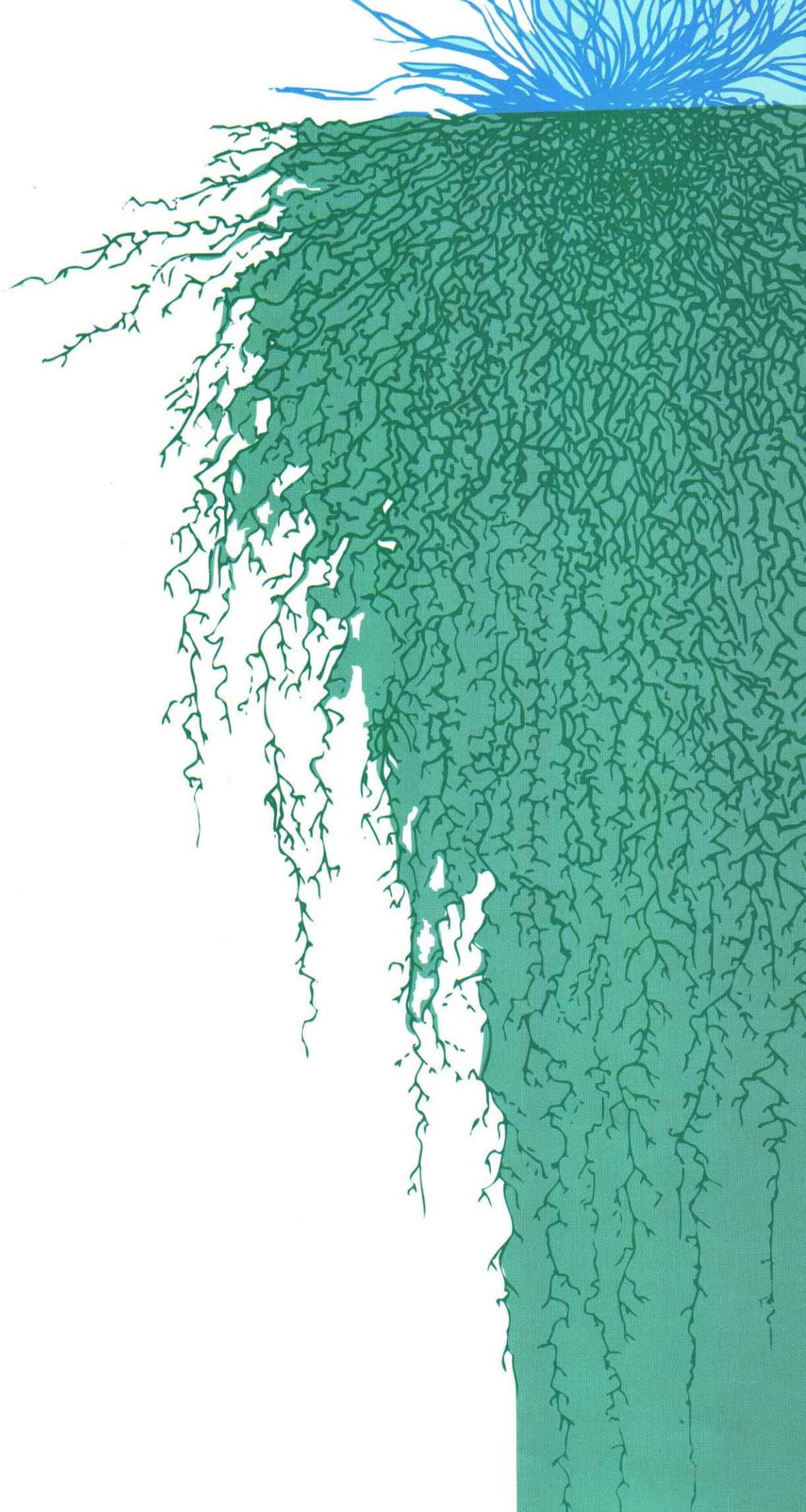
Catherine PETIT, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse.

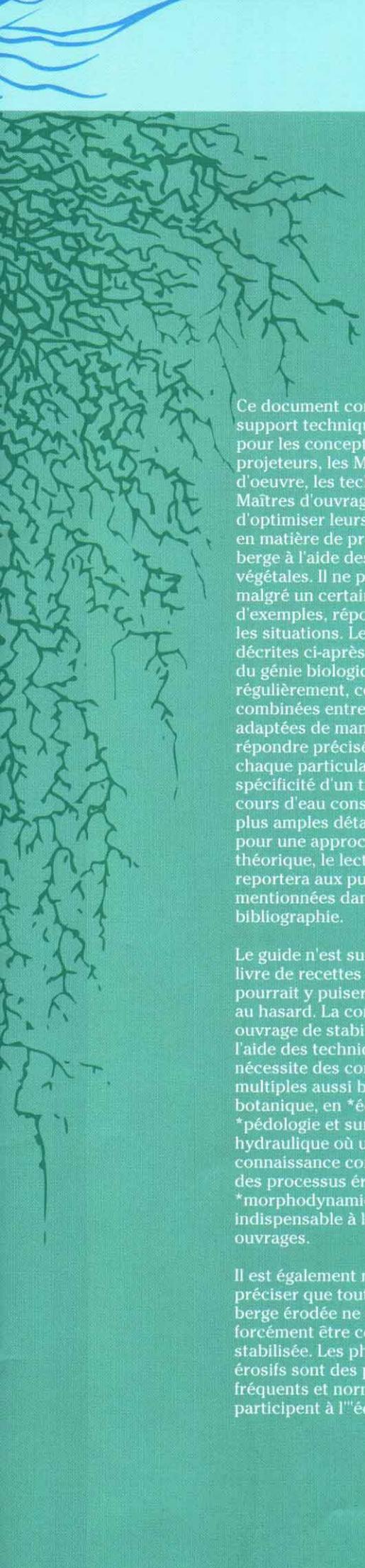
Finalement, il serait impardonnable d'oublier dans nos remerciements les personnes en bout de chaîne qui encaissent généralement les humeurs changeantes et les modifications constantes des rédacteurs; que les secrétaires et dactylos (puisqu'il s'agit d'elles), Danielle LACHAT et Angela CATENA, trouvent ici l'expression de toute notre gratitude.

Bourgoin-Jallieu et Vicques, le 5 janvier 1994

Bernard Lachat  
biologiste-ingénieur  
Silène - Biotec







Ce document constitue un support technique pratique pour les concepteurs-projeteurs, les Maîtres d'oeuvre, les techniciens et les Maîtres d'ouvrage afin d'optimiser leurs interventions en matière de protection de berge à l'aide des techniques végétales. Il ne prétend pas, malgré un certain nombre d'exemples, répondre à toutes les situations. Les techniques décrites ci-après sont la base du génie biologique et, régulièrement, celles-ci sont combinées entre elles ou adaptées de manière à répondre précisément à chaque particularité et spécificité d'un tronçon de cours d'eau considéré. Pour de plus amples détails ainsi que pour une approche plus théorique, le lecteur se reportera aux publications mentionnées dans la bibliographie.

Le guide n'est surtout pas un livre de recettes où l'on pourrait y puiser une solution au hasard. La conception d'un ouvrage de stabilisation à l'aide des techniques végétales nécessite des compétences multiples aussi bien en botanique, en \*écologie qu'en \*pédologie et surtout en hydraulique où une connaissance complémentaire des processus érosifs et \*morphodynamiques est indispensable à la réussite des ouvrages.

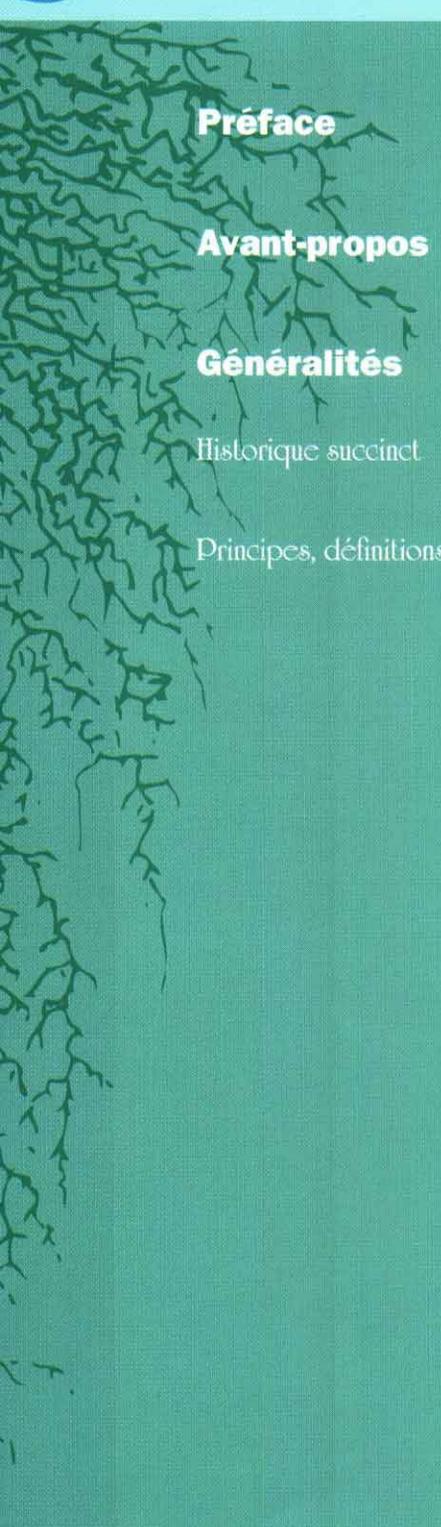
Il est également nécessaire de préciser que toute zone de berge érodée ne doit pas forcément être corrigée et stabilisée. Les phénomènes érosifs sont des phénomènes fréquents et normaux qui participent à l'"équilibre"

\*morphodynamique du cours d'eau. Une étude réalisée par des personnes compétentes doit, d'une part cerner les causes de l'instabilité ou de l'érosion et, d'autre part, évaluer les risques d'un éventuel maintien en l'état. Au même titre que les paramètres physiques, les composantes écologiques du milieu doivent être prises en compte dès le début des études et déboucher sur une synthèse d'ordre hydroécologique devant régir et guider les interventions éventuelles. Ce n'est que dans un deuxième temps que des solutions de stabilisation seront appliquées si nécessaire. On peut très bien imaginer des mesures de protection "passives", c'est-à-dire, par exemple, délimiter les zones de danger, y interdire les constructions, y interdire les cultures sensibles aux phénomènes hydrauliques, etc. Dans la mesure du possible, un minimum d'interventions doit être proposé, afin de ne pas détruire des équilibres écologiques et afin de laisser une marge de manoeuvre à la dynamique naturelle du cours d'eau. Une solution alternative à la correction des berges de cours d'eau est de ne procéder à aucun aménagement et d'acquiescer les terrains riverains concernés en bordure du cours d'eau.

Ce guide vise à familiariser avec le \*génie végétal tous les corps de métier touchant à l'eau courante dans la nature.



# **sommaire**



## Préface

## Avant-propos

## Généralités

Historique succinct

12

Principes, définitions et buts

16

Le cours d'eau, un système dynamique  
et biologique unique

16

Végétation rivulaire : stable ou fragile ?

18

Le rôle de la végétation dans la  
stabilisation naturelle des berges

19

Actions physiques  
positives de la végétation

20

Actions physiques  
"négatives" de la  
végétation ligneuse

21

Comment définir le génie végétal ?

22

Un principe fondamental du génie végétal :  
l'entretien

23

Un outil précieux : la carte de synthèse  
hydroécologique

24

Quels sont les buts du génie végétal ?

26

Quels sont les avantages du génie végétal ?

26

Quelles sont les limites du génie végétal ?

27

Le génie végétal n'est pas de la décoration !

28

Les végétaux "indésirables"

29

## Méthodes de calculs pour le dimensionnement des ouvrages végétaux

30

Détermination des paramètres  
hydrauliques courants

32

Rappel de la formule générale  
de Manning-Strickler

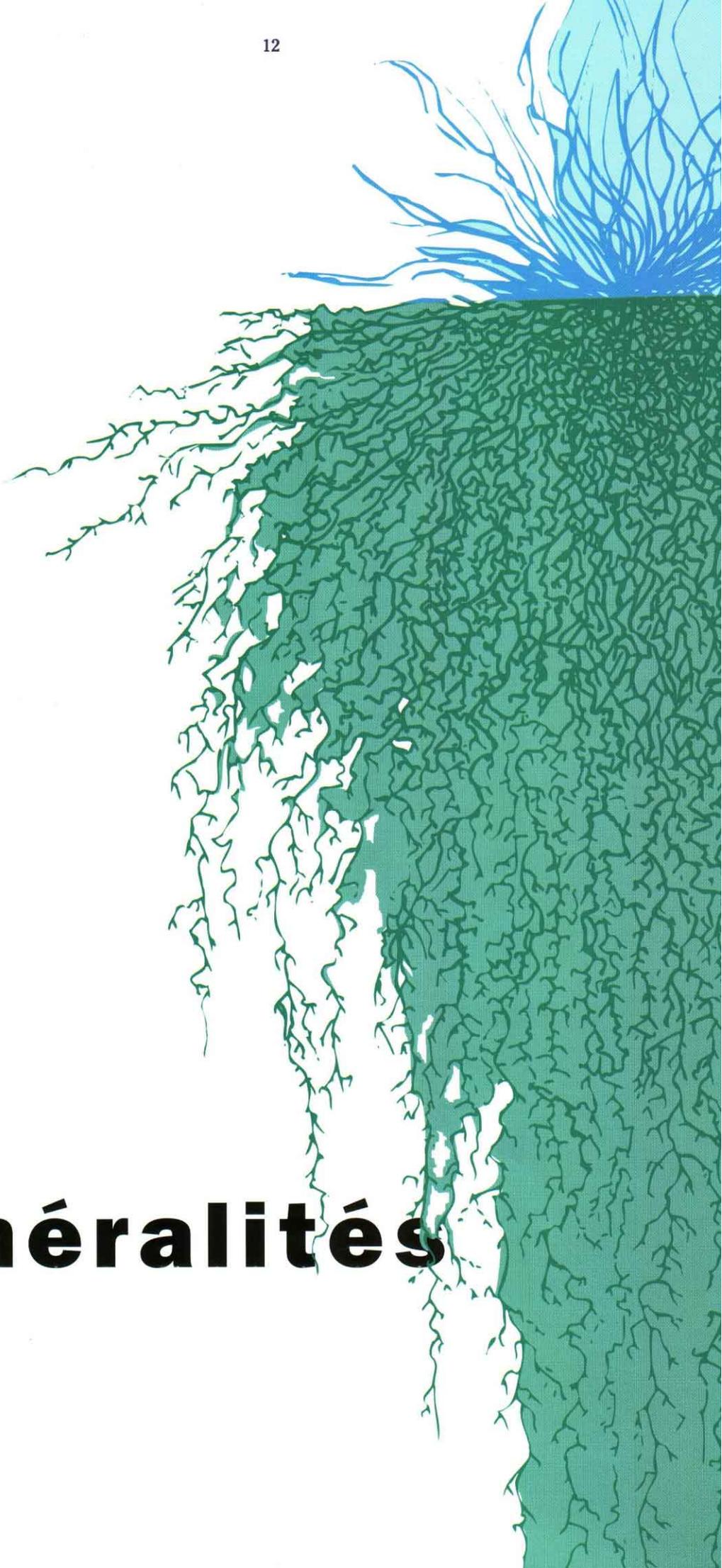
32

Calcul de la hauteur d'eau pour  
un débit de référence

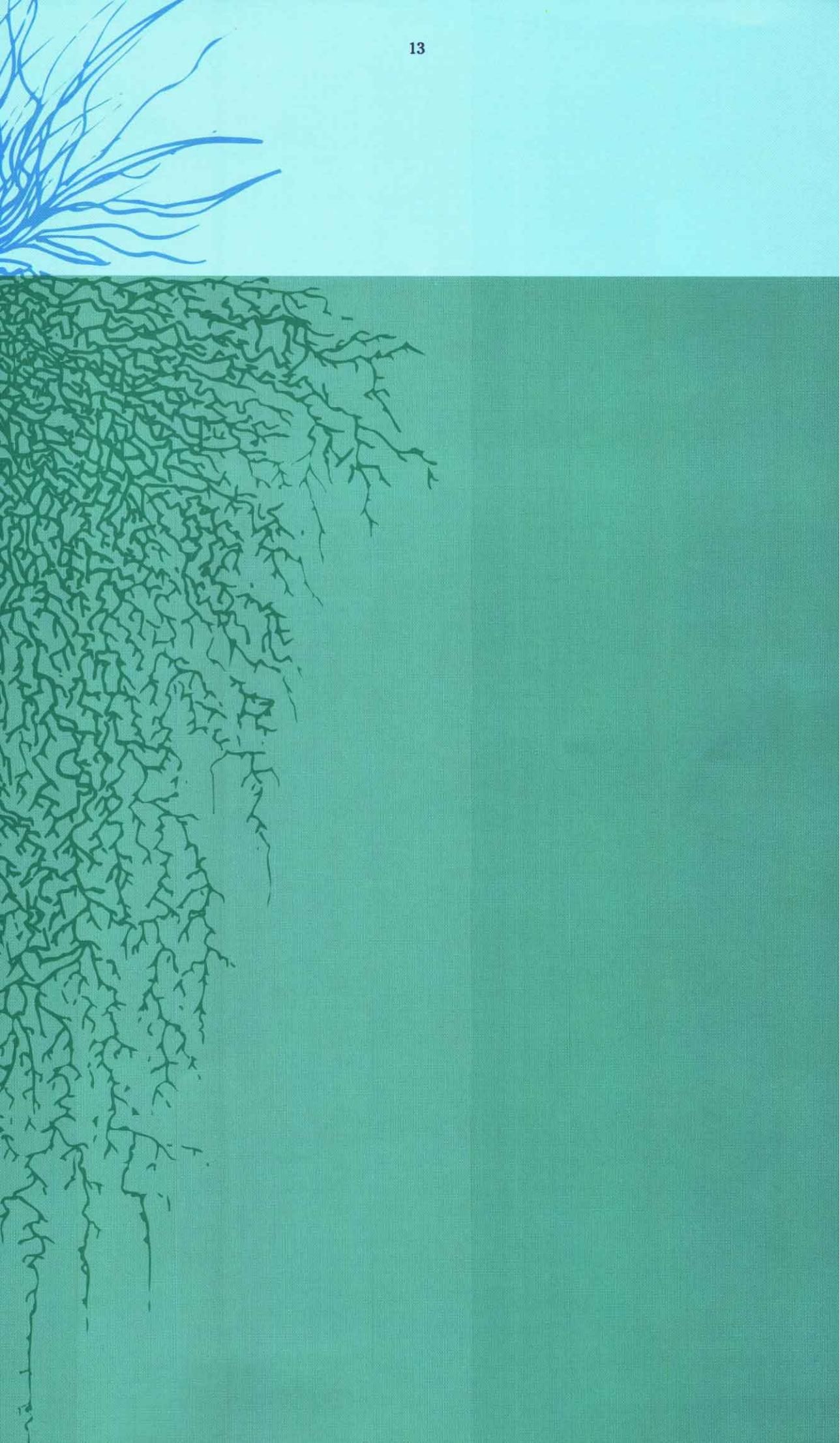
33

Calcul de la force tractrice	34
Formule générale	34
Force tractrice critique (formule générale)	34
Force tractrice critique sur les berges	35
Force tractrice en fonction de la vitesse de l'eau	35
Conclusion sur les méthodes de calculs pour le dimensionnement des ouvrages végétaux	36
<b>Conditions de réussite des techniques végétales</b>	38
Facteurs stationnels	40
Facteurs botaniques	41
Les causes d'échec liées à la mise en oeuvre	43
Qualité générale de mise en oeuvre	44
Facteurs humains	46
<b>Les techniques</b>	48
Généralités	50
Calendrier	52
Description des techniques	53
Boutures	53
Lit de plans et plançons (= boutures)	55
Tressage	56
Fascine	59
Couche de branches	62
Peigne	64
Plantation	66
Ensemencement	67
Caisson végétalisé à double paroi (description, champs d'application, avantages, désavantages, préparation du terrain, mise en oeuvre et *phasage, coûts)	70
Amélioration de l'efficacité par l'apport d'autres matériaux	72
Géotextiles	72
Bois	75
Les rondins	75
Les pieux	75

<b>Entretien des aménagements</b>	76
Végétation herbacée	78
Végétation buissonnante et arbustive	79
Végétation arborescente	80
<b>Examen de quelques réalisations</b>	82
La Sarne (Jura Suisse)	84
Le problème de base	84
Solutions proposées	84
Appréciation	86
L'Ognon (Département de Haute Saône)	89
Le problème de base	89
La solution proposée	89
Appréciation	91
Le Rhône (à Lyon)	93
Le problème de base	93
La solution proposée	93
La Birse (Jura Suisse)	98
Le problème de base	98
La solution proposée	99
Appréciation	101
Autres exemples illustrés	104
<b>Conclusion</b>	108
<b>Lexique</b>	110
<b>Bibliographie</b>	116
<b>Annexes</b>	120
A1. Domaine d'application des protections végétales sur les berges	122
A2. Description et connaissance des espèces non indigènes indésirables sur les cours d'eau	124
A3. Détermination des coefficients de rugosité "n" et "Ks" et force tractrice	128
A4. Valeurs du coefficient de rugosité en cours d'eau naturels	132
A5. Détermination de l'angle interne de frottement de divers matériaux non cohérents	134
A6. Clés de détermination simplifiées pour les saules basées sur différents critères morphologiques	135



**généralités**



Si le concept d'utilisation des végétaux en protection et stabilisation des sols, appelé \*génie végétal, est contemporain à cette seconde moitié du 20ème siècle, il n'en demeure pas moins qu'il puise sa source dans des techniques et observations ancestrales. Quelques reliques de savoir conservées dans la mémoire collective et dans d'anciennes publications auxquelles se sont ajoutés les connaissances scientifiques modernes et les moyens mécaniques actuels, ont pu engendrer cette renaissance. Une constante demeure cependant. Car, si l'application de certaines techniques a été, à l'origine, l'oeuvre de pionniers qui, par leur travail, vivaient en contact permanent avec la nature et savaient l'observer, cette observation du végétal et de son comportement est aujourd'hui toujours nécessaire à celui qui veut appréhender un problème et le résoudre à l'aide des techniques végétales.

Aux impacts sur le paysage laissés par les grands travaux ferroviaires et routiers du 19ème et du 20ème siècle, est apparu l'aménagement végétal des talus, pour lesquels on s'est souvent contenté de gazons et de plantations d'acacias. Les protections contre les glissements de terrain et les chutes de pierres ont été réalisées avec des constructions coûteuses. Il en va de même des constructions paravalanches ou d'endigement des torrents de montagne. Cette lutte contre les éléments, propre aux régions de montagne, associée aux conditions extrêmes du relief et du climat, ont fortement influencé la renaissance des techniques végétales. En effet, la répétition régulière de la démolition des ouvrages à cause d'incidents météorologiques, rendait leur

efficacité très partielle et insatisfaisante, le coût de leur remplacement exorbitant. C'est alors que l'idée d'une protection à l'aide d'une couverture végétale est intervenue.

A l'orée des années 50, un nom a été associé au renouveau des techniques végétales, en raison des nombreuses publications qui portent son nom. Il s'agit de Dr. Hugo Meinhard Schiechtl, qui a été amené à développer des solutions économiques et surtout efficaces, avec des plantes vivantes, pour résoudre des problèmes de glissements de terrain notamment dans les Alpes autrichiennes. Pour ce faire, il pouvait s'appuyer sur bon nombre de pionniers, surtout allemands, dont nous nous abstenons d'en dresser une liste exhaustive. Le but de ses travaux était de développer des méthodes de construction, en exploitant les capacités naturelles de la flore indigène.

Aux préoccupations économiques des ouvrages de protection qui ont fait resurgir les techniques végétales, sont venus s'agglomérer les problèmes environnementaux, et du même coup une certaine conscience à l'égard de la protection de l'environnement qui a également renforcé la crédibilité du \*génie végétal.

En France, un phénomène curieux est à relever à propos de la conservation d'un certain savoir dans l'application des techniques. En effet, la renaissance de leur utilisation s'est appuyée sur des exemples émanant d'Allemagne, de Suisse ou d'Autriche. Pourtant, à la fin du siècle dernier, P. Demontzey, conservateur des forêts, publiait des études très détaillées traitant du reboisement en montagne [1], de même que des



aménagements liés aux torrents [2]. De nombreuses techniques y sont décrites jusqu'au coût de chaque phase de réalisation. Il est notamment question de fascinage et clayonnage, et de l'utilité de diverses essences. De nombreuses réalisations sont citées, principalement dans les Alpes. Heureusement, les écrits restent pour témoigner de l'importance que l'on vouait déjà à des techniques parfois proches de celles décrites dans le présent guide, plutôt inspirées du génie forestier cependant et adaptées aux conditions climatiques et topographiques de la montagne. Il est surprenant de constater qu'à peine plus d'un siècle plus

tard, l'application de tout un savoir soit tombé dans l'oubli et qu'un Autrichien, en l'occurrence Schiechtl, cite Demontzey, ignoré de beaucoup de Français. Au niveau des Travaux publics, des textes anciens existent aussi à propos de l'utilisation des végétaux en construction [3].

Bien sûr, les techniques ont bien évolué depuis le siècle dernier, notamment grâce à un engouement certain et à de nombreuses expérimentations, en conditions limites, faites depuis une vingtaine d'années essentiellement en Suisse, en Autriche, en Allemagne et en Italie du Nord.

## LE COURS D'EAU, UN SYSTEME DYNAMIQUE ET BIOLOGIQUE UNIQUE

Un cours d'eau n'est pas uniquement une masse d'eau en mouvement, résultant du drainage de toutes les eaux de surface ou d'infiltration dans un \*bassin versant. C'est un \*écosystème complexe composé d'un \*biotope (regroupant toutes les composantes non vivantes et spatiales correspondant à l'environnement physique d'un cours d'eau) et d'une \*biocénose (englobant l'ensemble des \*communautés d'êtres vivants, qu'elles soient végétales ou animales). Une modeste synthèse des rôles et des fonctions que peut jouer le cours d'eau est illustrée par la figure 1, selon [4], modifiée et complétée.

Dans l'environnement physique (ou \*biotope) agissent des facteurs que l'on qualifie d'\*abiotiques. Ceux-ci, regroupant l'ensemble des \*facteurs physico-chimiques, peuvent être :

- de nature climatique (température, lumière, hygrométrie, pluviométrie, etc.),
- de nature hydrologique et hydro-géomorphologique (vitesse, courant, capacité de transport, érosion, pH, teneur en oxygène, en substances dissoutes, etc.),
- de nature édaphique, relatifs aux sols (texture, structure, matière minérale, etc.),
- de nature topographique, liés au relief (pente, sinuosité, etc.).

Tous ces facteurs régissent la qualité et la quantité des eaux dans le cours d'eau.

A grande échelle, la topographie de la région traversée, le type de sous-sol, l'utilisation des terrains riverains et l'efficacité de leur drainage (naturel ou artificiel), auront une influence prépondérante sur la \*morphodynamique.

La \*biocénose quant à elle est composée de \*producteurs (végétaux aquatiques et semi-aquatiques, végétation des berges), de \*consommateurs (invertébrés, poissons, amphibiens) de même que de

toute la faune terrestre inféodée aux cours d'eau comme les mammifères, oiseaux, reptiles, invertébrés, et de \*décomposeurs (bactéries, champignons). Toutes les \*interactions de ces êtres vivants sur le milieu et sur eux-mêmes sont qualifiées de \*biotiques.

"L'\*écosystème rivière" s'est formé au cours d'une longue évolution et son état d'"équilibre" est la conséquence de longs processus d'adaptation. Ses deux composantes que sont le \*biotope et la \*biocénose évoluent ensemble.

Le \*biotope remplira d'autant plus de fonctions (alimentation, abri, etc.) et sera d'autant plus attrayant pour un grand nombre d'êtres vivants, qu'il présentera des faciès différents. Ainsi, des alternances de rapides (zones lotiques) et de calmes (zones lentiques) auxquels correspondent des profondeurs, des températures, une granulométrie, un taux d'oxygène et des substrat différents, apporteront la diversité nécessaire à la vie. La diversité sera également liée aux zones d'ombres et de lumière, ainsi qu'aux débris végétaux provenant des boisements riverains.

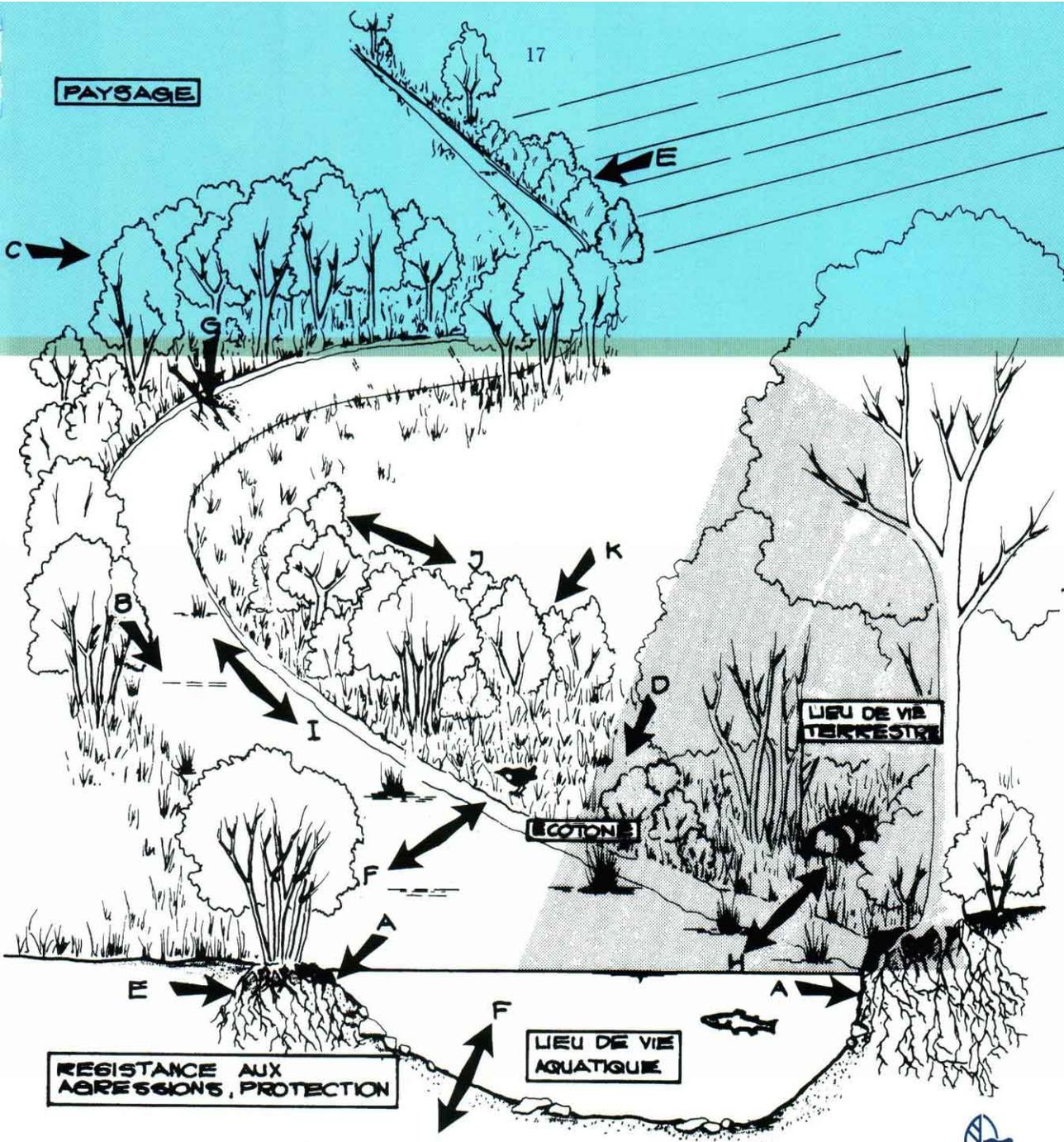
Les \*communautés d'êtres vivants présentes constituent un descripteur de la qualité du \*biotope et des \*biocénoses. Les êtres vivants réagissent directement aussi bien à des modifications des ressources trophiques, de leur composition intrinsèque, de la qualité de l'eau qu'à des phénomènes hydrologiques et morphologiques. Toute intervention conduisant à des pollutions chimiques, physiques ou \*microbiologiques, à la destruction des structures morphologiques et à la modification artificielle trop forte des débits provoque des impacts négatifs immédiats.

Il faut bien noter que les conditions de vie, l'\*écosystème et tous les

Figure 1.  
Fonctions  
et actions  
de la \*ripisylve  
et de l'eau  
sur une rivière.

- A** Protection physique de la berge, abris, caches.
- B** Régulation des crues par dissipation de l'énergie du courant.
- C** Effet brise-vent.
- D** Ombrage des eaux.
- E** Barrage à l'érosion agricole, élimination des nitrates, fixation des phosphates.
- F** Echange avec les aquifères.
- G** Production de matière organique.
- H** Echanges entre écosystèmes terrestre et aquatique.
- I** Effet corridor.
- J** Structure - guide pour la faune terrestre et ailée.
- K** Effet refuge.

## PAYSAGE



processus écologiques changent de façon continue en eau courante, à mesure que l'on se déplace, des sources à l'embouchure. Les composants de la \*biocénose seront différents en fonction de la variabilité du milieu le long du continuum fluvial. La rivière est un milieu vivant fonctionnel dont la richesse des \*interactions entre tous les éléments constitutifs évolue avec le temps. Les nombreuses interrelations et la dépendance de "l'\*écosystème rivière" d'avec les \*écosystèmes terrestres qui le bordent ne permettent pas, en aménagement, de considérer un cours d'eau en se limitant à son \*lit mineur, car cet \*écosystème est bel et bien formé de rives, de berges

et du cours d'eau lui-même. La gestion de la rivière ne passe pas uniquement par l'eau mais aussi par la gestion des sols. Ces deux éléments sont inséparables.

L'aménagement des cours d'eau ne peut donc se faire qu'à un niveau global, même si la maîtrise des \*bassins versants dans leur intégralité n'est pas encore réalité. C'est le but à atteindre. Mais la prise en compte des zones alluviales constituent déjà un point de départ important pour une gestion intégrée des cours d'eau, dans la mesure où elles dirigent les \*interactions entre les milieux aquatiques et leur environnement terrestre.

## VEGETATION RIVULAIRE : STABLE OU FRAGILE ?

Caractérisée à la fois par une fragilité apparente et une remarquable stabilité en terme de constance, la végétation \*rivulaire étonne également par sa diversité. Mais cette diversité n'est pas un appareil cosmétique gratuit ; elle est au contraire très fonctionnelle, puisqu'il s'agit là d'un reflet de l'exceptionnel pouvoir d'adaptation de ce type de végétation à des conditions de vie pouvant brusquement changer. La végétation \*rivulaire est composée de diverses formations et de très nombreuses \*associations végétales disposées en mosaïque sérielle, allant des groupements de plantes aquatiques et semi-aquatiques, jusqu'à ceux des arbres de haut port. Toutes ces associations ont une fonction et une place bien précise sur le profil transversal d'un cours d'eau (fig. 2).

Ainsi, bras morts, vasières, \*atterrissements récents, gravières, berges de \*lit mineur ou terrasses de \*lit majeur, sont autant de milieux qui abritent une végétation différente qui leur est propre. Au gré des crues qui érodent, détruisent ou au contraire déposent du matériel, des lambeaux de certaines formations disparaîtront (d'où la fragilité apparente) alors que d'autres, composées de plantes \*pionnières, s'installeront sur les nouveaux \*atterrissements, et amorceront le mécanisme des successions végétales. Celles-ci, en fonction de leur position sur le terrain et de la fréquence de crues, seront plus ou moins rapidement

interrompues. Le perpétuel renouvellement, ajouté à la vigueur exceptionnelle de certaines plantes, et particulièrement des ligneux de la zone à bois tendre, confère au cours d'eau une grande constance, de même qu'un certain "équilibre" dans la répartition et l'importance des différentes \*associations végétales. Ainsi les crues régissent la zonation de la végétation, notamment par les facteurs suivants :

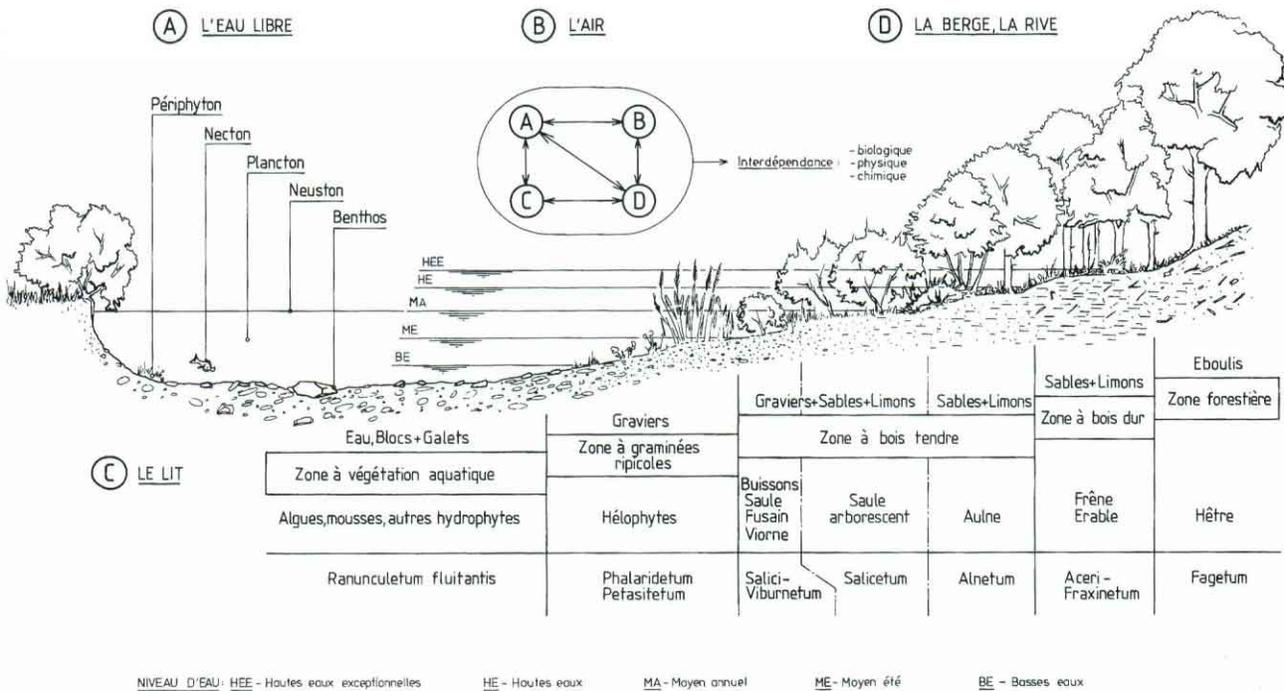
- pouvoir érosif,
- pouvoir sédimentaire,
- fréquence, apparition saisonnière, périodicité,
- durée,
- violence (puissance),
- quantité d'eau (débit),
- turbulence de l'écoulement.

A ces facteurs s'ajoutent également toutes les conditions de croissance propres à la végétation, à savoir :

- le climat,
- l'ensoleillement,
- le contact avec des eaux capillaires,
- la granulométrie du substrat,
- la richesse du sol en éléments nutritifs,
- les interventions \*anthropiques.

Les limites de cette zonation ne sont pas tirées au cordeau et les paliers sont souvent le lieu d'imbrication de plusieurs associations. Mais sur les rives encore naturelles, là où le cours d'eau possède de la place et où les interventions humaines sont limitées, cet étagement de la végétation est très distinct.

*Figure 2.  
Zonation  
typique  
des séries végétales  
sur un  
cours d'eau  
et interrelations des  
éléments  
constitutifs.  
D'après [5]*



NIVEAU D'EAU: HEE - Hautes eaux exceptionnelles

HE - Hautes eaux

MA - Moyen annuel

ME - Moyen été

BE - Basses eaux



Seine - Biotec

## LE ROLE DE LA VEGETATION DANS LA STABILISATION NATURELLE DES BERGES

Par la structure même de leurs parties aériennes et souterraines, de même que par leur emplacement sur le profil transversal d'un cours d'eau, les végétaux fournissent des actions différentes, protectrices ou néfastes, selon les espèces. Une protection naturelle est d'autant plus efficace que les groupements \*rivulaires composant la couverture végétale sont adaptés à l'effet complexe de l'ensemble des \*facteurs écologiques. Pour pouvoir

résister aux crues, les espèces les plus touchées par ce phénomène doivent développer des systèmes de racines très performants pour leur ancrage. Ainsi, des plantes herbacées \*rivulaires peuvent avoir des racines qui s'installent jusqu'à 2,50 m (fig. 3).

D'une manière générale on peut énumérer comme suit, de façon non exhaustive, les actions physiques de la végétation ainsi que les modes possibles d'implantation :

## ACTIONS PHYSIQUES POSITIVES DE LA VEGETATION

PLANTES AQUATIQUES OU  
\*HYDROPHYTES

### Effets protecteurs :

- réduction de la vitesse du courant et, de ce fait, de sa puissance d'érosion ;
- protection du lit contre l'érosion lors des crues, par plaquage des plantes au sol.

### Mode d'implantation :

- peu d'expériences entreprises à ce jour en cours d'eau.

PLANTES SEMI-AQUATIQUES OU  
\*HÉLOPHYTES

### Effets protecteurs :

- fixation du sol sous l'eau avec leurs racines et \*rhizomes ;
- obstacle perméable formé par leurs organes aériens immergés, diminuant par frottement (frein) l'énergie du courant ou les ondes liées aux vagues ;
- capacité de se plier sous l'effet de la crue et de se trouver ainsi plaquées au sol pour offrir une protection sous forme de tapis.

### Mode d'implantation :

- plantation de mottes découpées, après fauchage ou non des organes aériens ;

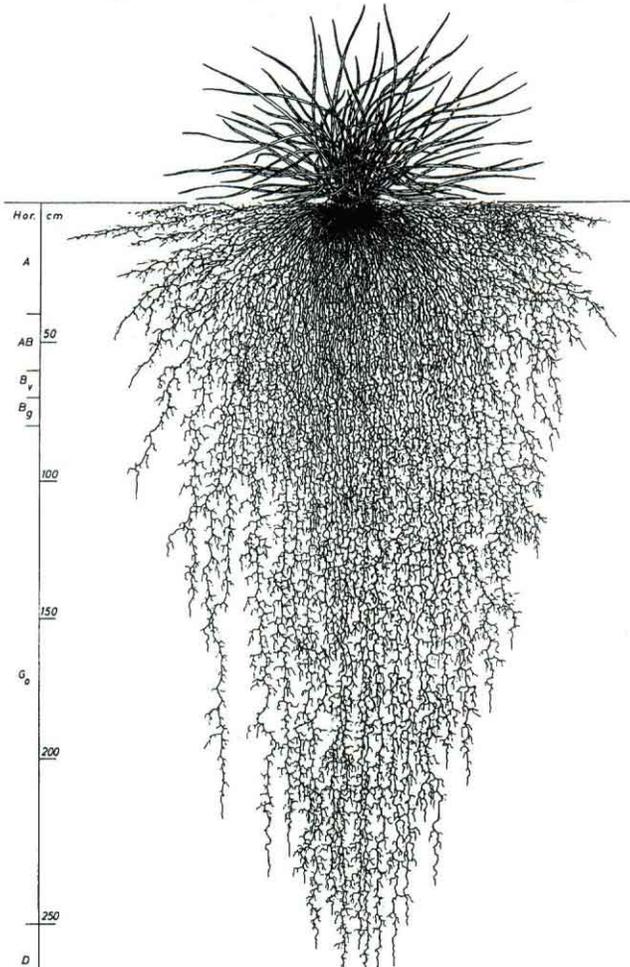
- plantation de \*rhizomes ;
- plantation de boutures (p. ex. le roseau *Phragmites australis*) ;
- ensemencement pour certaines espèces (p. ex. la Baldingère *Phalaris arundinacea* ou la Glycérie *Glyceria maxima*) ;
- fascines confectionnées à l'aide de mottes.

GROUPEMENTS D'ARBUSTES ET  
BUISSONS (ZONE À BOIS BLANCS)

### Effets protecteurs :

- fixation du sol par les racines empêchant celui-ci d'être emporté au-dessus et au-dessous du niveau de l'eau ;
- résistance élastique par les parties aériennes des végétaux buissonnants et arbustifs, souples et denses, divisant le courant, réduisant sa vitesse par frottement et de ce fait sa puissance d'érosion ;
- action identique en temps de crue, où les arbustes les plus reculés reprennent le même rôle ;
- haut pouvoir de régénération des espèces composant la zone à bois blancs leur permettant, lors de dégâts infligés par les crues, de former des rejets

Figure 3.  
Système \*racinaire  
de la \*graminée  
Fétuque Faux  
Roseau  
(*Festuca  
arundinacea*).  
D'après [6]



neufs rapidement. Ce même pouvoir permet de développer, avec les saules, des méthodes de construction fondées sur des structures vivantes.

**Mode d'implantation :**

- plantation (toutes les essences) ;
- boutures (saules) ;
- fascines (saules) ;
- tressage (saules) ;
- couche de branches à rejets (saules) ;
- lit de plants et \*plançons (branches de saule + plants à racines nues d'autres essences) ;
- caisson en rondins, \*végétalisé (branches de saule + plants à racines nues d'autres essences).

GROUPEMENTS D'ARBRES (ZONE À BOIS DURS)

**Effets protecteurs :**

- stabilisation du sommet de berge par le système \*racinaire ;
- capacité de remplir partiellement les rôles des arbustes et buissons lors de grandes crues ;
- rôle de filtre, par accumulation de matériel, des arbres tombés naturellement (p. ex. par la foudre) et restés sur place dans l'eau, et frein au courant.

**Mode d'implantation :**

- plantation uniquement (procédés techniques

rarement nécessaires car les zones concernées sont moins exposées à l'érosion).

GROUPEMENTS DE HAUTES HERBES OU \*MÉGAPHORBIAIES

**Effets protecteurs :**

- protection de la couche superficielle de terre contre le ruissellement ;
- consolidation de la rive par \*stolons ou systèmes \*racinaires, là où les boisements ne sont pas souhaitables ;
- aucun soin exigé, contrairement aux prairies.

**Mode d'implantation :**

- plantation de mottes ;
- repiquage de \*stolons et \*rhizomes ;
- ensemencement.

PELOUSES ET PRAIRIES

**Effets protecteurs :**

- action réservée pour la partie supérieure des (berges) rives ;
- formation d'un tapis protecteur par l'enchevêtrement des racines et des \*stolons ;
- protection active car les \*graminées se couchent sans offrir d'emprise à l'eau.

**Mode d'implantation :**

- ensemencement à sec ;
- ensemencement hydraulique.

**ACTIONS PHYSIQUES "NEGATIVES" DE LA VEGETATION LIGNEUSE**

Il ne s'agit ici que des actions "négatives" d'un point de vue physique sur la berge. En contrepartie, les avantages biologiques (et parfois même physiques) que procurent les situations décrites sont très importants, parfois indispensables, au bon fonctionnement hydroécologique. D'une manière générale, les impératifs d'écoulement des crues doivent tenir compte du rôle joué par la végétation ligneuse.

■ Dans le \*lit mineur, il peut y avoir des gros troncs sans végétation périphérique buissonnante, créant des turbulences très actives au pouvoir érosif dévastateur.

- Une position malencontreuse d'un arbre ou d'un groupe d'arbres sur le tracé, peut provoquer également des turbulences.
- Les arbres penchés et les souches trop avancées dans la section du cours d'eau peuvent provoquer turbulences et \*affouillements.
- Les arbres très hauts et très proches du lit possédant un enracinement superficiel peuvent, lors de grands vents, provoquer un effet de bras de levier sur la berge conduisant au déchaussement de la souche et à l'arrachement de la berge.

## COMMENT DEFINIR LE GENIE VEGETAL ?

Le \*génie végétal est une science hybride dans la mesure où il fait appel à des connaissances issues d'horizons divers. Disons que ses fondements puisent dans la connaissance de la physiologie végétale et, plus particulièrement, dans le mode de croissance et de développement de certaines espèces végétales. Ainsi, sur des modèles naturels de mécanismes de croissance, connus et observés, il développe des procédés qui permettent, parfois à grande échelle, de résoudre des problèmes de protection des sols contre l'érosion. Et c'est précisément dans le développement des techniques et leurs applications que réside son

essence propre. En d'autres termes, non seulement il exploite comme modèle les capacités naturelles du végétal, mais il utilise ce dernier comme matériel de base à la construction d'ouvrages.

Le \*génie végétal aide l'écologue et l'ingénieur à résoudre des problèmes techniques d'érosion de sols grâce à l'utilisation des végétaux. De par les exigences écologiques des végétaux, les domaines d'activités possibles sont les talus (chemin, route, voie ferrée, ravin, versant, etc.), les berges (cours d'eau, étang, lac, etc.) et les zones diverses à réaménager naturellement.

### GENIE VEGETAL

Techniques applicables aux pentes et talus

Techniques applicables aux berges de cours d'eau, d'étang et lac

Techniques applicables au réaménagement de sites et au paysage

La réussite de son entreprise nécessite encore la maîtrise d'un large éventail de connaissances, aussi multiples que variées. Botanique, géobotanique, \*phytosociologie et \*écologie végétale en sont les principales pour ce qui est de la maîtrise de la composante vivante. Mais physique,

mécanique et dynamique des sols, connaissance des matériaux auxiliaires, géologie, \*pédologie et surtout hydraulique dès que l'on touche aux cours d'eau, sont autant d'outils indispensables à la réussite de l'application des techniques développées.

## UN PRINCIPE FONDAMENTAL DU GENIE VEGETAL : L'ENTRETIEN

Si tant est qu'il faille intervenir sur le cours d'eau, l'entretien réfléchi et pondéré avec le respect du cours d'eau et de ses caractéristiques morphologiques et écologiques propres doit être prôné avant toute chose.

Dans le même ordre d'idée, le \*génie végétal exclut de ses principes l'intervention à tout prix. Par exemple, une niche d'érosion présentant une falaise ne nécessite pas forcément une intervention, si aucun enjeu ne semble être menacé dans l'environnement proche du \*lit majeur. Les berges garderont ainsi une morphologie plus variée qui augmentera leur capacité d'accueil pour la faune. Et chaque fois que la possibilité est offerte, il faut saisir l'opportunité de laisser suffisamment de place au cours d'eau, afin que, régi par la périodicité des crues, il puisse exprimer toute son originalité.

En laissant libre cours à sa dynamique si intéressante, modelée par les crues, les érosions et les sédimentations, on conserve le caractère propre au cours d'eau, composé de l'alternance des rapides et des calmes, des variations de granulométrie et de profondeur, de l'éphémère apparition d'associations \*pionnières ou encore de la zonation typique de la végétation.

Les zones alluviales sont sans aucun doute parmi les plus agressées. De plus en plus d'atteintes qualitatives sont portées non seulement à la qualité de l'eau, mais également aux structures et à la \*morphodynamique des cours d'eau. Les surfaces agricoles, industrielles, urbaines ou de loisirs se rapprochent sans cesse des cours d'eau. Les rectifications

et protections rapprochées par digues réduisent ainsi les zones alluviales qui voient du même coup leur pouvoir de régulation de crue disparaître, ce qui accroît considérablement les dangers des inondations. Dans les \*bassins versants, l'assèchement et l'assainissement de grandes surfaces réduisent le pouvoir tampon de ces dernières et augmentent également le danger des crues.

L'apparente sûreté des endiguements fait oublier les fonctions primordiales des zones alluviales et négliger du même coup leur entretien. C'est alors que la végétation, malgré ses facultés naturelles à protéger les berges, peut poser de nombreux problèmes. En effet, des arbres penchés ou déracinés, des troncs mal placés et non entourés de buissons, une végétation lacunaire dans un méandre ou trop luxuriante à d'autres endroits peuvent être à l'origine de turbulences violentes, d'\*affouillement, de réduction de gabarit, d'embâcles, et provoquer de ce fait une dégradation importante de l'état des berges et une tendance plus prononcée aux crues. C'est alors la végétation qui est en cause, mais la raison véritable de cette situation dégradée est en fait l'état défectueux des boisements, lié à un manque d'entretien.

Convaincu de l'efficacité de la stabilisation engendrée par les végétaux adaptés à leur milieu, le \*génie végétal a pour principe de base de favoriser une protection naturelle des berges, en conservant la végétation existante. Cependant, un mauvais état sanitaire des boisements \*rivulaires, des espèces mal adaptées à leur

situation sur la section du cours d'eau, d'autres non indigènes et envahissantes, peuvent engendrer des mesures d'assainissement, traduites par l'élimination sélective d'une partie de la végétation. Et c'est dans cet

entretien que réside la première démarche du \*génie végétal. Les techniques à proprement parler n'intervenant que dans le cas de dégradations constatées des berges.

## UN OUTIL PRECIEUX : LA CARTE DE SYNTHESE HYDROECOLOGIQUE

Lorsqu'un projet (entretien et/ou aménagement) porte non pas sur un petit secteur de rivière, mais sur un tronçon de plusieurs kilomètres ou un cours d'eau entier, il est utile d'avoir une représentation synthétique de cet objet, afin de pouvoir définir clairement, quels types d'interventions sont nécessaires. Un diagnostic général est alors dressé, par l'intermédiaire d'investigations de terrains en relevant précisément sur un fond de carte toutes les informations utiles, et en mettant en évidence les potentialités, les atouts et les problèmes. Ce premier travail fera ensuite l'objet d'une cartographie, où seront symbolisés tous les éléments dignes d'intérêt. Y figureront notamment les renseignements suivants :

- 1. Morphologie du lit :**  
seuil naturel ; \*pool ; banc de galets ; banc de sable ; affleurement rocheux ; île ; \*atterrissement ; vasière ; bras mort ; gravière ; etc.
- 2. Végétation riveraine :**  
la localisation des différentes formations végétales, avec indications des espèces ligneuses et, éventuellement, les espèces dominantes pour les formations herbacées, de même que les espèces végétales envahissantes, indésirables et exotiques. Il est également possible de citer l'\*association végétale, lorsqu'elle est typique.

### 3. Ouvrages hydrauliques et arrivées d'eau :

barrage ; seuil artificiel ; écluse ; rejet d'eaux usées ; embouchure de drainage ; prise d'eau ; pont ; passerelle ; passage à gué ; etc.

### 4. Ouvrages de stabilisation existants :

\*gabion ; enrochement ; technique végétale ; etc.

### 5. Etat sanitaire des berges :

niche d'érosion ; affaissement de berge ; embâcle ; tronc abattu ; arbre penché ; souche ; trous de \*rat musqué et de \*ragondin ; etc.

### 6. Surfaces riveraines, d'influence \*anthropique :

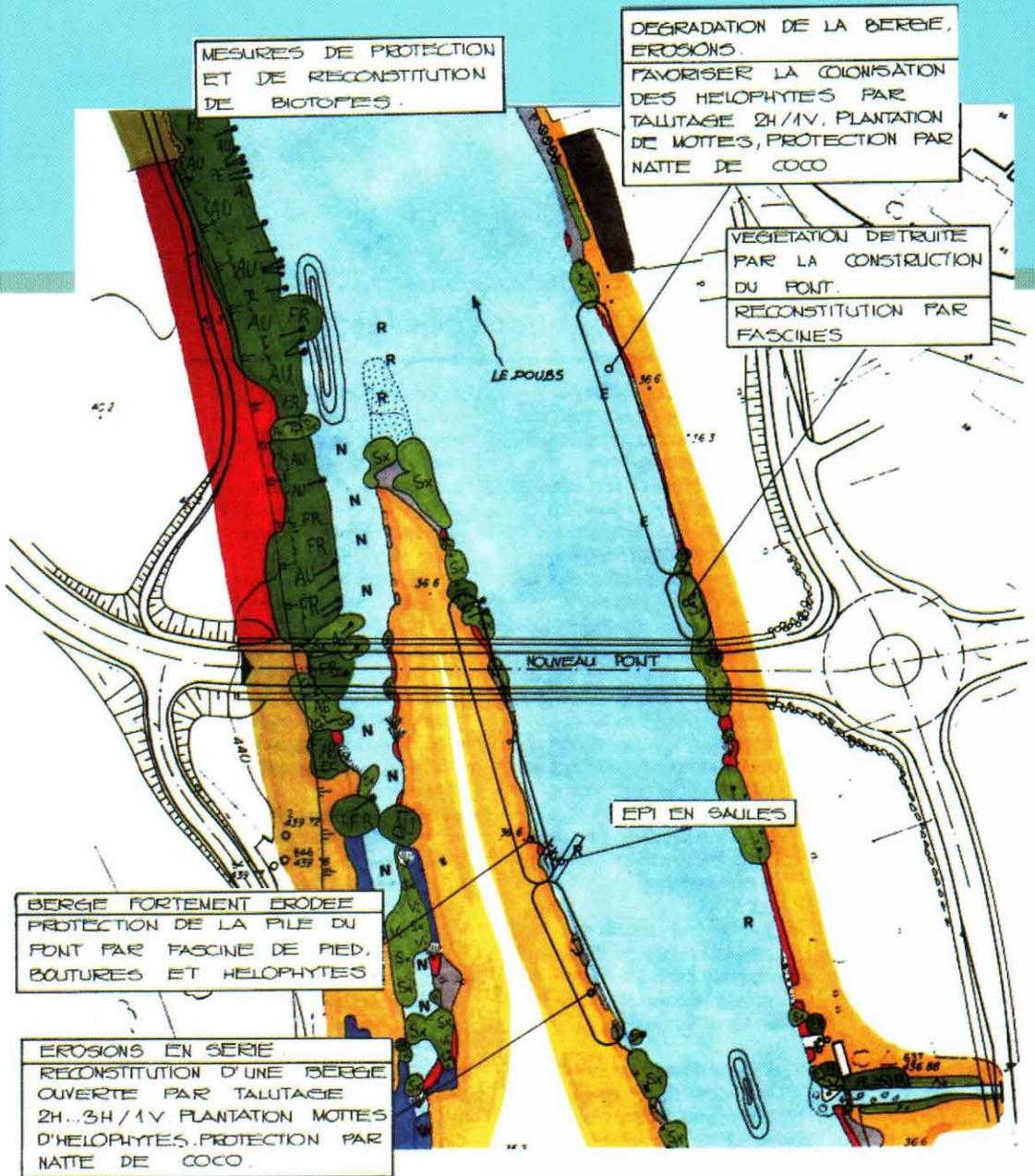
surface agricole ; milieu urbain ; parc ; zone industrielle ; etc.

On choisira parmi les symboles utilisés, les plus parlants, aussi bien du point de vue de la couleur que du graphisme afin qu'à la lecture de la carte, les caractéristiques et la personnalité du cours d'eau soient immédiatement comprises.

Par la suite, après maturation du projet, on peut y greffer les interventions d'entretien et les ouvrages à réaliser, également en les symbolisant. Il est généralement préférable, pour faciliter la lecture et aérer le graphisme, de choisir pour cette dernière opération, un fond de carte différent.



Figure 4.  
Exemple de carte synthétique avec légende orientée sur les structures végétales et plan d'intervention sommaire.



Végétation arborescente

AB Aubépine  
 AU Aulne  
 CHE Chêne  
 EC Erable champêtre  
 EPI Epicea  
 ES Erable sycomore  
 FR Frêne  
 NO Noyer  
 NY Noyer  
 PE Peuplier  
 PO Pommier  
 PDI Pairier  
 SX Saule  
 TI Tilleul

Végétation herbacée

Prairie  
 Mégaphorbiaie  
 Culture  
 Rudérale  
 Hélophytes  
 - Petasites  
 - Phalaris  
 - Festuca  
 - Sparganium  
 - Prairie humide à Scirpus  
 - Iris  
 - Nuphar  
 - Ranunculus fluitans  
 - Elodea

Végétation arbustive

Ab Aubépine  
 Cha Charme  
 Co Cornouiller  
 Ec Erable champêtre  
 Egl Eglantier  
 Epi Epicea  
 Es Erable sycomore  
 Ex Exotiques  
 Fr Frêne  
 Fu Fusain  
 Li Lilas  
 Me Merisier  
 Ne Nerprun  
 No Noyer  
 Pr Prunellier  
 Su Sureau  
 SX Saule  
 Tr Troène  
 Vi Viorne

Seuil

Banc de galets  
 Banc de graviers, sable, vase  
 Banc de galets immergé  
 Banc de sable immergé  
 Banc de marne

Pool

Direction principale du courant  
 Bloc, enrochement visible  
 Arbre, arbuste penché  
 Vieille souche  
 Déchets végétaux  
 Remblais pierreux + déchets  
 Ecoulement latéral  
 Berge érodée

Gabions

Mur droit maçonné  
 Mur penché maçonné  
 Talus, digue

Escalier, échelle

Plongeur

## QUELS SONT LES BUTS DU GENIE VEGETAL ?

Lorsqu'il est question de \*génie végétal, les premiers objectifs mis en exergue font allusion au caractère particulièrement respectueux de ses méthodes pour l'environnement. Tendances tout à fait compréhensibles puisque c'est précisément cet aspect qui lui vaut tout l'engouement exprimé en sa faveur.

Cependant, il s'agit de ne pas perdre de vue que toute technique végétale n'a aucune raison d'être si elle ne remplit pas les buts principaux attendus, à savoir :

- offrir une solution efficace à un problème de protection des sols (érosion, glissement, etc.) ;
- engendrer un coût de réalisation raisonnable, dont le montant reste à la mesure du problème constaté et des avantages procurés.

Partant de là, il est alors intéressant de constater que les techniques proposées par le \*génie végétal visent à poursuivre une quantité d'objectifs que l'on peut

qualifier de secondaires, mais qui en fait constituent l'essentiel de leur intérêt comparativement aux procédés habituellement utilisés par le génie civil. On peut les énumérer comme suit :

- considérer le cours d'eau comme un complexe formé d'un lit, de berges et de rives, le tout étroitement 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 en des lieux où elle n'existe pas naturellement ;
- respecter une distribution étagée de la végétation, du pied au sommet de berge, régie par les conditions hydriques et hydrauliques ;
- intégrer l'ouvrage dans son site ;
- minimiser l'impact occasionné par l'implantation d'un ouvrage de stabilisation.

## QUELS SONT LES AVANTAGES DU GENIE VEGETAL ?

L'utilisation de plantes vivantes à la place de matériaux de construction inertes, comme des enrochements, apporte une série d'avantages dont voici les principaux :

- les techniques végétales acquièrent une efficacité de stabilisation croissante, au fur et à mesure du développement des plantes car elles sont vivantes. Leur résistance aux forces d'arrachement est comparable, voire supérieure après quelques années, aux techniques minérales habituelles (voir tableaux 1 et 2) ;

- elles opposent une résistance souple aux forces du courant, permettant de mieux dissiper l'énergie ;
- elles sont également souples dans leur application, car leur grande diversité, les possibilités de les combiner ou de les joindre à des matériaux auxiliaires (bois, \*géotextile, etc.) leur confèrent une grande capacité d'adaptation, répondant aux besoins de chaque cas particuliers ;
- elles favorisent l'autoépuration du cours d'eau au niveau des racines ;
- elles ne perturbent pas les relations entre le cours d'eau et les nappes phréatiques ;

Tableau 1.  
Valeurs de  
résistance à la  
force  
d'arrachement  
de quelques  
matériaux et  
techniques en  
cours d'eau

Matériaux et techniques	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> )
Sable fin ( $\leq 0,2$ mm)	2
Petit gravier ( $< 2$ cm)	12
Gazon quelconque, longtemps immergé	15-18
Gazon préfabriqué	25-30
Gazon quelconque, peu immergé	25-50
Petits galets	40-60
Fascine de roseaux	50
Saules, 1-2 ans	50-70
Gazon jeune, bonne qualité	60-80
Saules, $> 2$ ans	100-140
Herbacées sur *géotextile tissé	120
Pavé-gazon	160
Tressage de saule, pieux battus	180
Enrochement	200
Pieux dans enrochement en vrac	250
Fascine de saule (pieux battus)	250
Couche de branches à rejet	300
Boutures interstitielles	350
Saules, 20 ans	800

- elles contribuent à maintenir ou à restaurer une grande diversité botanique et faunistique par la variété de supports et d'habitats qu'elles offrent du lit jusqu'aux rives ;
- elles fournissent l'ombre nécessaire à maintenir la fraîcheur de l'eau et à limiter la croissance de plantes aquatiques envahissantes telles que les algues filamenteuses ;
- elles contribuent à conserver ou à restaurer le

- patrimoine paysager et génétique d'une région ;
- elles sont peu coûteuses en fourniture, car les matériaux de base peuvent souvent être prélevés sur place ;
- les ouvrages eux-mêmes sont susceptibles de fournir le matériel végétal (branches, baguettes, pieux, boutures) pour d'autres ouvrages après quelques années de croissance.

## QUELLES SONT LES LIMITES DU GENIE VEGETAL ?

Malgré les nombreux avantages que procurent les techniques végétales, il existe des facteurs limitants, directement liés aux conditions de croissance des végétaux : altitude, lumière, type de substrat, régime des eaux, etc.

Les torrents de montagne regroupent typiquement plusieurs facteurs limitants qui rendent parfois l'application des techniques végétales très problématique : substrat rocheux, limite altitudinale de la végétation, régime torrentiel, pente du cours d'eau et énergie élevées.

D'une manière générale et après avoir analysé le comportement d'ouvrages lors d'événements exceptionnels

(tableau 1 et [7, 8]), on admet une limite d'utilisation des techniques végétales, au sens strict, à partir d'une pente de cours d'eau de 3 % sous 1 m de hauteur d'eau (cf. calcul de la force tractrice p. 34 et annexe A1).

De plus, on distingue encore les points suivants :

- l'efficacité de la stabilisation n'est pas maximale dès la finition de l'ouvrage (voir tableau 2). Cependant, les limites inférieures peuvent être augmentées par l'utilisation judicieuse de géotextiles et par une mise en oeuvre plus conséquente des moyens de fixation ;
- certains types de réalisation sont exigeants en main-d'oeuvre.

Tableau 2.  
Valeurs de  
résistance à la  
force  
d'arrachement  
en fonction de la  
croissance des  
végétaux  
(en N/m<sup>2</sup>).  
(D'après [9])

Plantation	A la finition	1ère période de végétation	2ème période de végétation	3ème période de végétation
Plantation	0	10	30	>30
Engazonnement	10	30	30	30
Couches de branches à rejet	50	150	300	>300
Tapis de buissons	32	40	100	300
Plantations consolidées	15	–	75	120
Pieux dans enrochement en vrac	50	–	100	250
Matelas de fascines vivantes	100	200	–	>300
Boutures interstitielles	75	100	300	>350

■ les entreprises spécialisées et la main-d'oeuvre qualifiée sont encore peu nombreuses à ce jour ;

■ les ouvrages peuvent nécessiter un entretien après plusieurs années de végétation, afin de limiter l'encombrement de gabarit du cours d'eau et de maintenir un état buissonnant de la

végétation en certains points de la section du cours d'eau. Cette dernière remarque mérite d'être pondérée car le prélèvement de matériel végétal peut être l'occasion d'une taille d'un ouvrage de \*génie végétal ancien. D'autre part, il faut tenir compte de la grandeur et de la capacité du cours d'eau.

## LE GENIE VEGETAL N'EST PAS DE LA DECORATION !

Si la capacité d'intégration d'un ouvrage dans le paysage est un des nombreux atouts qu'offre le \*génie végétal, il ne faut pas voir dans l'utilisation de matériel vivant la seule volonté de produire un effet cosmétique. Les végétaux sont avant tout utilisés pour leurs fonctions biotechniques, à savoir :

- absorption des contraintes mécaniques ;
- stabilisation du sol au moyen des racines ;
- drainage du sol par \*évapotranspiration et formation de cavités ;
- protection contre les contraintes météorologiques (vents violents, ensoleillement excessif, glissement de neige, etc.) ;
- amélioration du sol en substances humiques.

Ainsi, il ne faudrait pas voir dans l'habillage de \*gabions

ou d'enrochements avec de grosses boutures de saule l'application d'une technique végétale digne de ce nom. Par contre, on peut considérer que l'effet d'esthétique et d'intégration d'un aménagement est en fait le résultat d'un équilibre naturel, retrouvé au fil des années. Et il est possible d'influencer positivement ce mécanisme de réhabilitation par un choix approprié des végétaux, leur disposition judicieuse sur la section du cours d'eau, dictée par la fonction qu'ils sont appelés à remplir. Les structures végétales, composantes importantes du paysage, ont une histoire, empreinte ou non d'une influence \*anthropique. Leur situation n'est jamais le fruit du hasard et encore moins celui d'une volonté quelconque de créer un beau paysage.

Regroupées en \*associations végétales composées d'essences parfaitement adaptées au milieu, elles ont trouvé un état d'équilibre régi par le phénomène de la concurrence intraspécifique, qui traduit justement les conditions environnementales locales. Qu'elles soient encore dans une phase évolutive ou au contraire qu'elles aient atteint une composition stable, les formations

végétales remplissent toutes des fonctions bien déterminées, pourvues ou non d'intérêt direct pour les activités humaines. C'est de cet équilibre qu'est composé le paysage végétal et c'est ce qui crée l'impression d'esthétique. Toute tentative de recréer un paysage dans le seul but de produire un effet cosmétique paraît hasardeuse et compromise.

## LES VEGETAUX "INDESIRABLES"

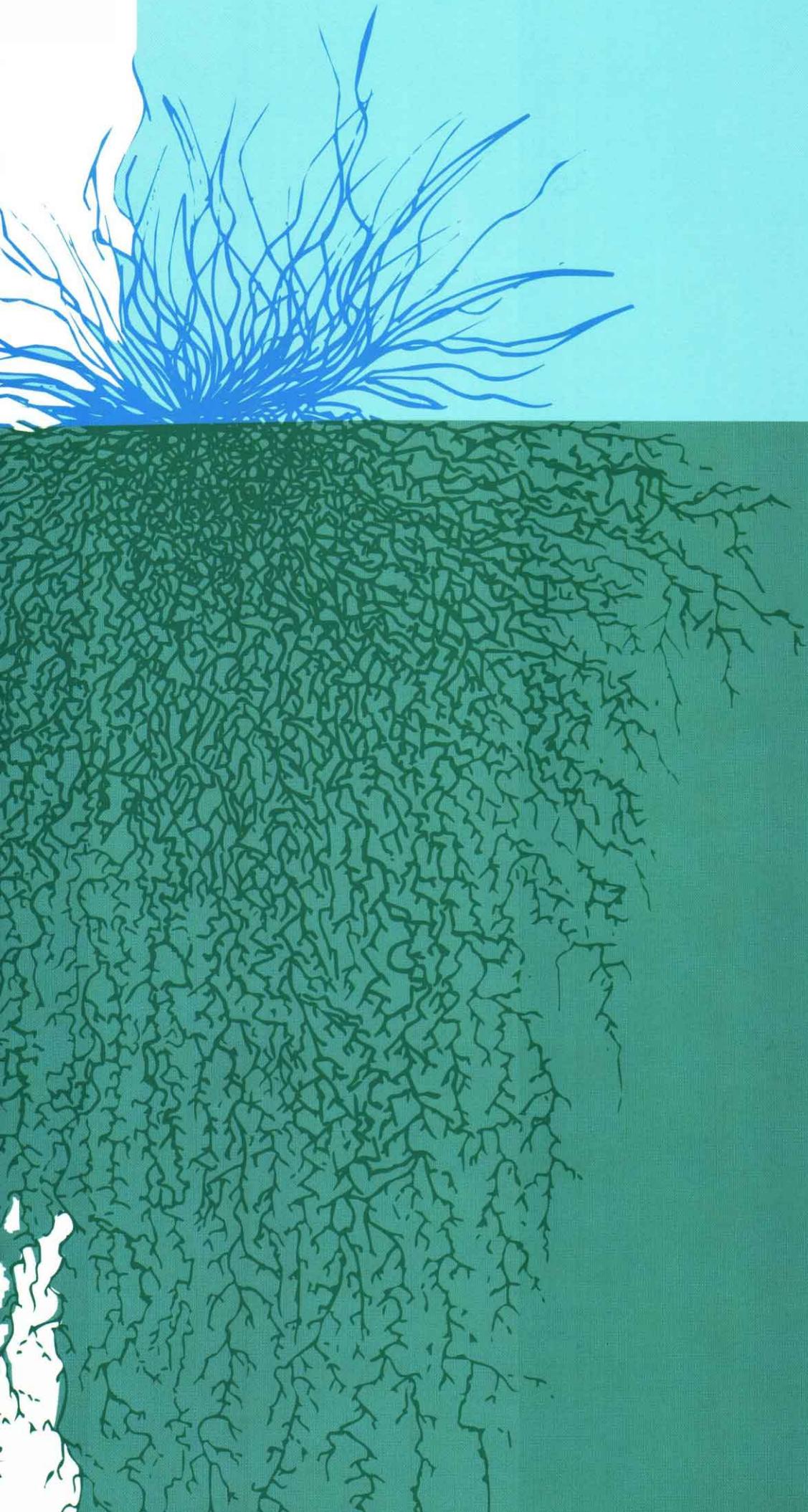
Il existe dans toute l'Europe des essences végétales originaires d'autres continents, introduites volontairement par l'homme à des fins ornementales, ou accidentellement. Certaines de ces essences ont la fâcheuse tendance à se propager spontanément dans la nature, et à s'y développer. Généralement, elles présentent un comportement très agressif et un développement exubérant. Elles forment avec le temps des massifs purs, desquels est exclue progressivement la flore indigène. Bon nombre de cours d'eau en sont infestés. Sur la base d'observations régulières, on peut dire intuitivement que le phénomène se caractérise par une évolution exponentielle marquée, du moins pour certaines espèces. Cette propagation est inquiétante à plus d'un titre :

- étant donné leur fort pouvoir colonisateur et leur comportement agressif, ces végétaux excluent la flore indigène et banalisent la diversité botanique de la \*phytocénose \*rivulaire ;
- les espèces de la faune spécifiquement tributaires de la flore indigène disparaissent aussi ;
- de par la structure de leurs organes aériens et souterrains, leur pouvoir stabilisateur est généralement mauvais ;
- ils peuvent compromettre des projets de revégétalisation des berges avec des espèces autochtones.

Les espèces indésirables les plus fréquentes sont décrites en annexe A2. Des renseignements précieux sur ces plantes ont été collectés dans [10, 11].

# **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  $\tau$  est utilisée, appelée plus communément force tractrice ou force d'arrachement :

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

avec :

$\rho$  : poids unitaire de l'eau  
(10 000 N/m<sup>3</sup>)

R : rayon hydraulique (m)

I : pente du cours d'eau

$\tau$  : force tractrice (N/m<sup>2</sup>)

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  $\tau_0$ , 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] :

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

$\tau_0$  : 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  $\lambda$  :

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

avec :

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

- $\tau_0$  = force tractrice critique sur le fond
- $\tau_0'$  = force tractrice critique sur la berge
- $\lambda$  = coefficient
- $\varphi$  = angle de la berge avec l'horizontale
- $\theta$  = 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.

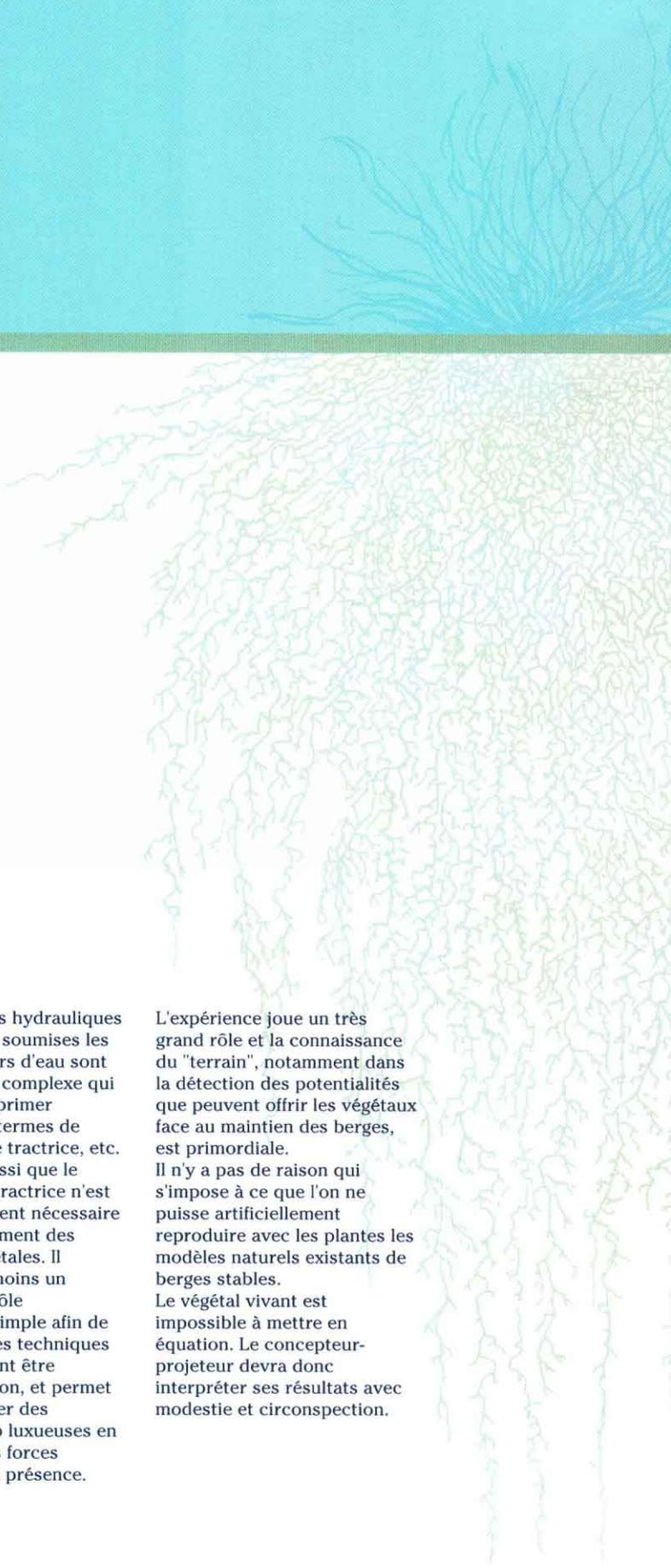
# CONCLUSION SUR LES METHODES DE CALCULS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES VEGETAUX

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.





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

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.

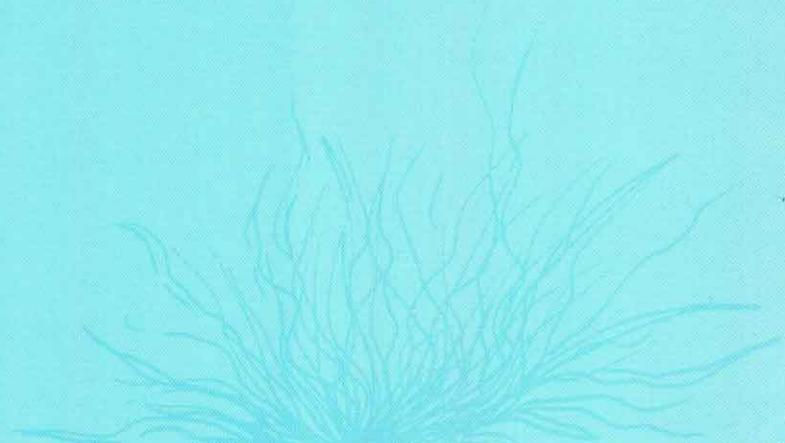
Le choix des végétaux est déterminant dans la réussite des ouvrages. La règle est de travailler avec des essences indigènes, adaptées aux conditions locales de croissance et qui satisfont au mieux les facteurs stationnels énumérés plus haut. La littérature donne souvent des listes [5, 14]. Pour des interventions 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.

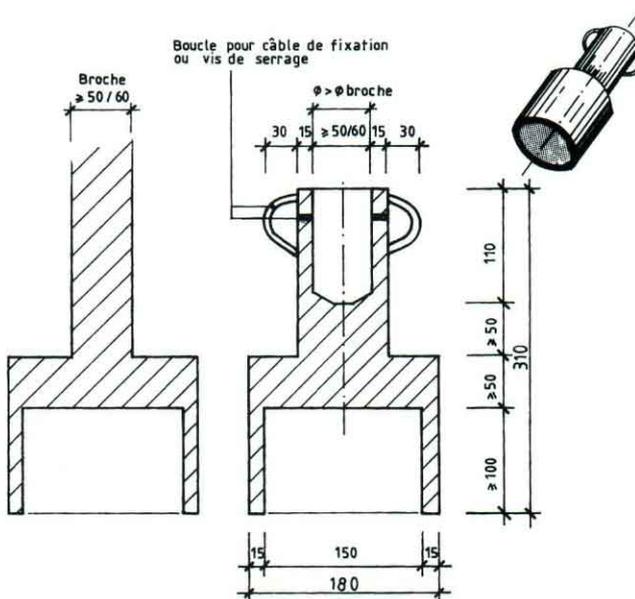


Figure 5.  
Exemples de cloche pour le battage mécanique des pieux

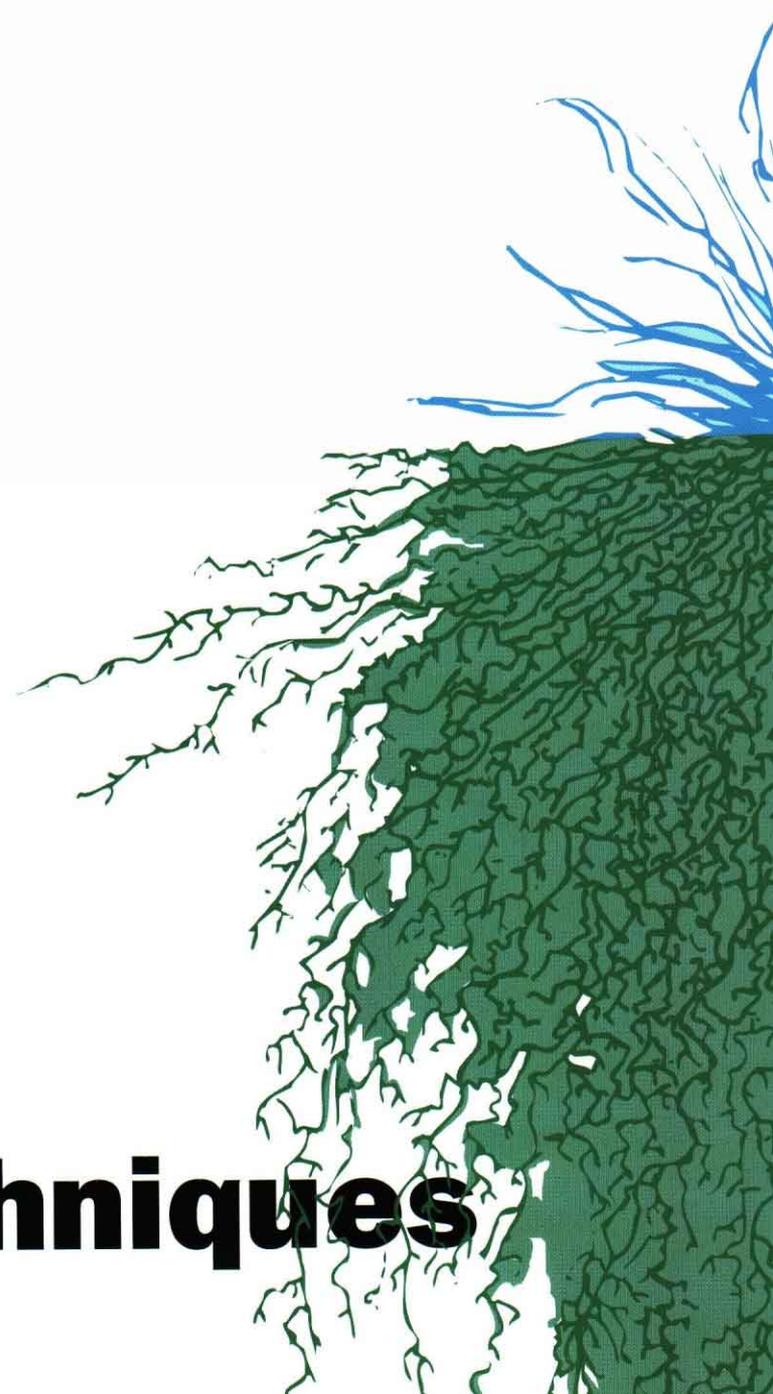
## FACTEURS HUMAINS

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.

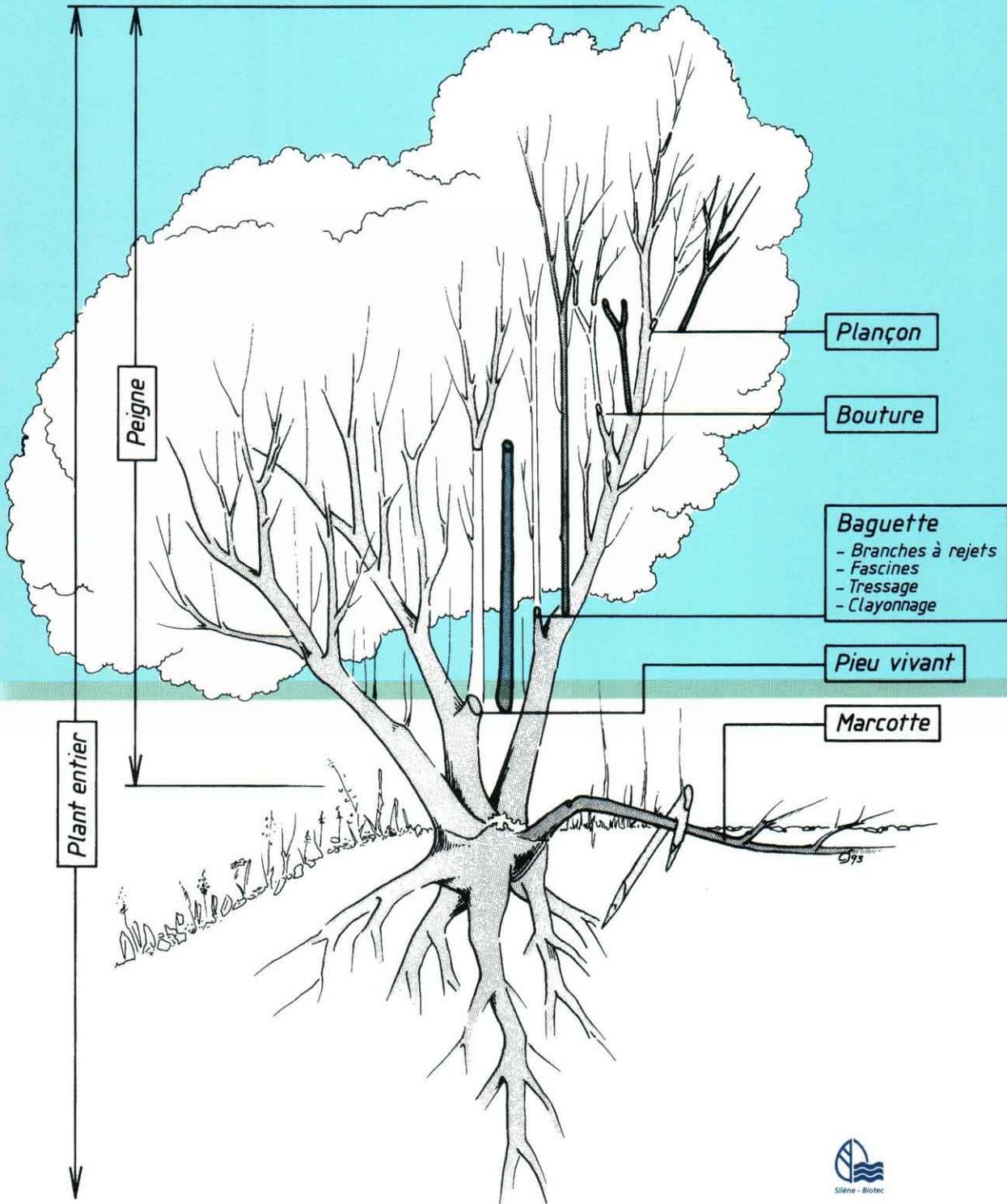


Figure 6.  
Les différentes parties  
de saule utilisées pour  
les techniques de  
protection végétales.  
D'après [5]

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	
		Mottes Rhizomes				Bouturage				Mottes Rhizomes				
	Hélophytes	Soins aux boutures												
	Entretien	Fauchage												
	Aménagements	Ensemencement + Protection												
Techniques végétales herbacées	Fauchage													
Entretien	Désherbage													
Aménagements	Bouture, plançon, tressage, fascine, couche de branches, peigne, caisson						Bouture, plançon, tressage, fascine, couche de branches, peigne, caisson							
	Plantations				Plantations									
Techniques végétales ligneuses	Taille													
Entretien	+ + + + + + + - - - - - - - - - + + + + +													
Faune terrestre	Nidification													
	Reproduction Vertébrés													
Végétation existante	Entretien													
		+ = 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/m<sup>2</sup>).
- 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.

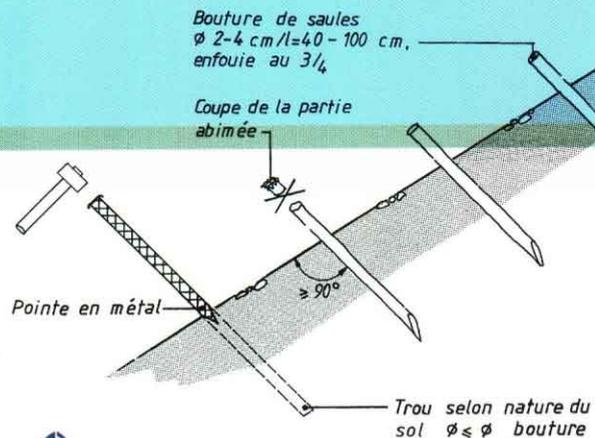


Figure 8.  
Le bouturage du saule.

### 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.

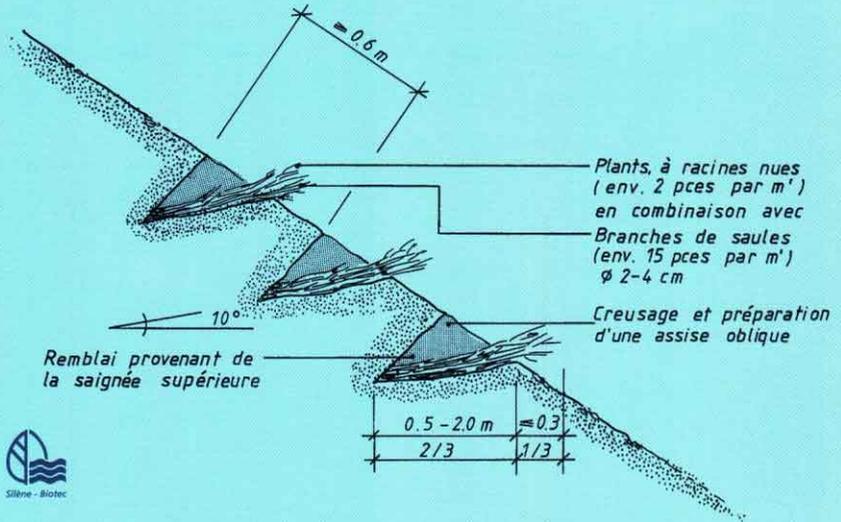
## PREPARATION DU TERRAIN

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.

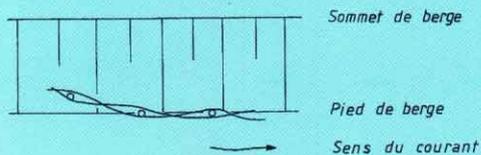
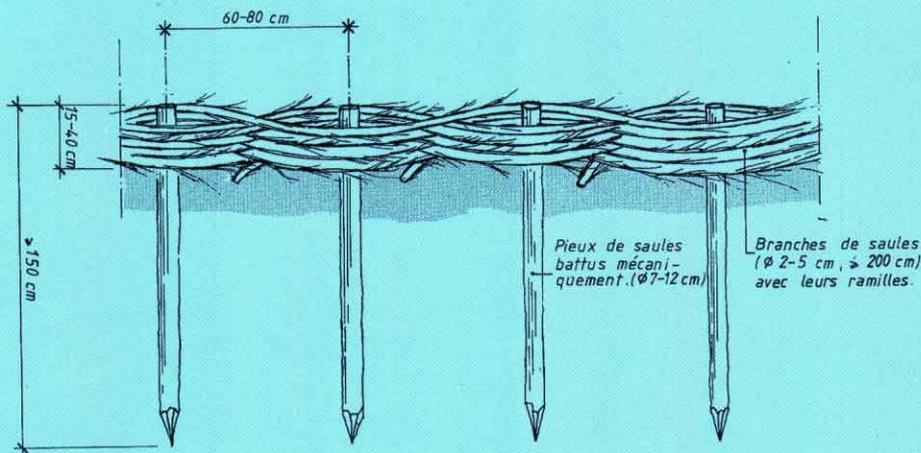


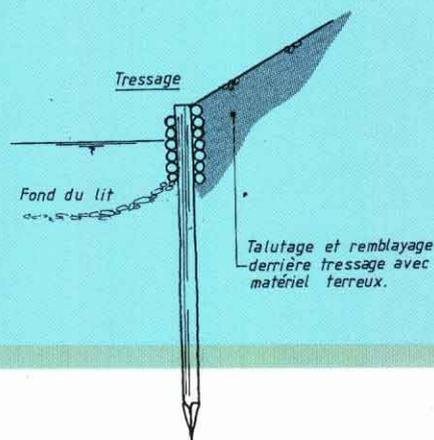
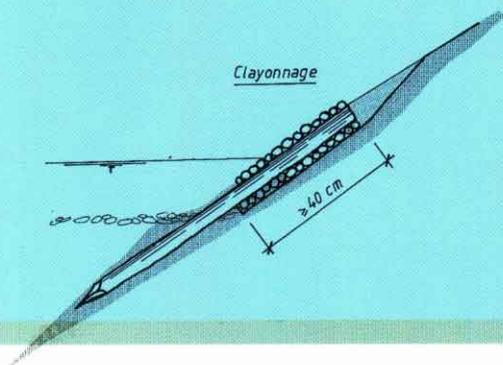
Figure 10. Détails du tressage



Vue longitudinale



Coupes



**COÛTS**

Le 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 :

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

## 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)

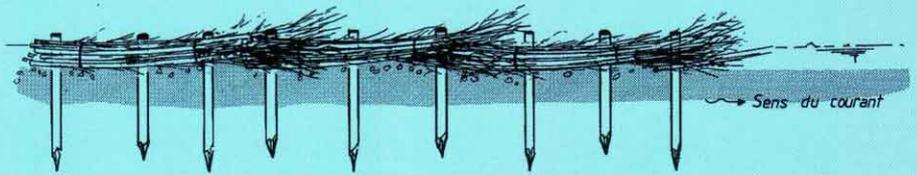
- Confection de la fascine sur la rive ou sur le lieu de prélèvement des saules ; branches de saule (longueur  $\geq 200$  cm,  $\varnothing$  2-5 cm) attachées solidement ensemble tous les 80 cm environ avec du fil de fer galvanisé ( $\varnothing$  2-3 mm), de manière à former un fagot (longueur 200-400 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  $90^\circ$  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

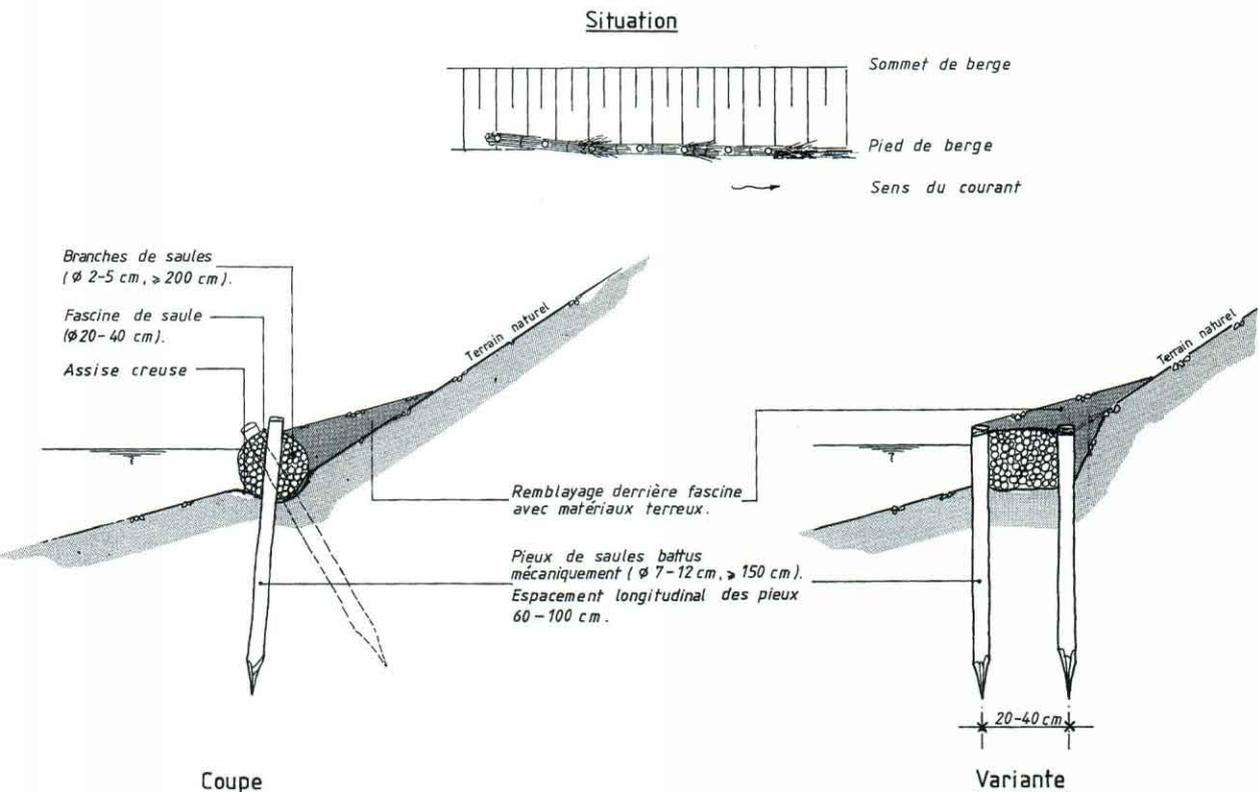
Les coûts sont difficiles à estimer et très variables suivant la longueur de l'ouvrage et les régions. Ils peuvent être considérablement diminués si la possibilité existe de prélever le matériel sur place. Cependant, un prix indicatif moyen au mètre linéaire comprenant la fourniture des matériaux, le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

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

(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  $\geq 2$  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  $\geq 60$  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.

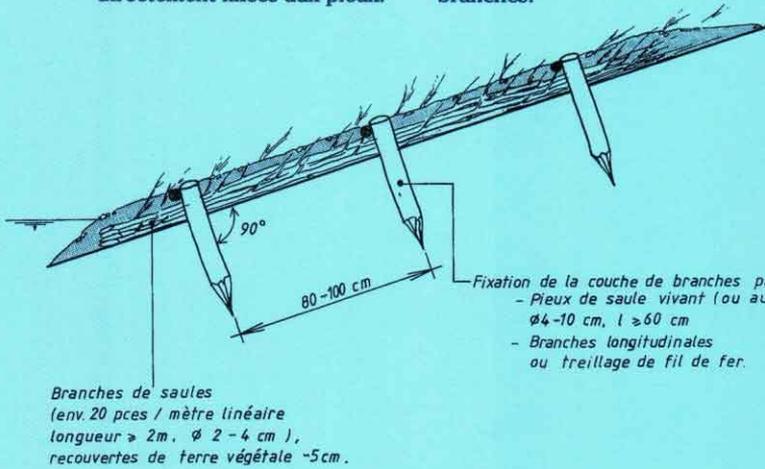
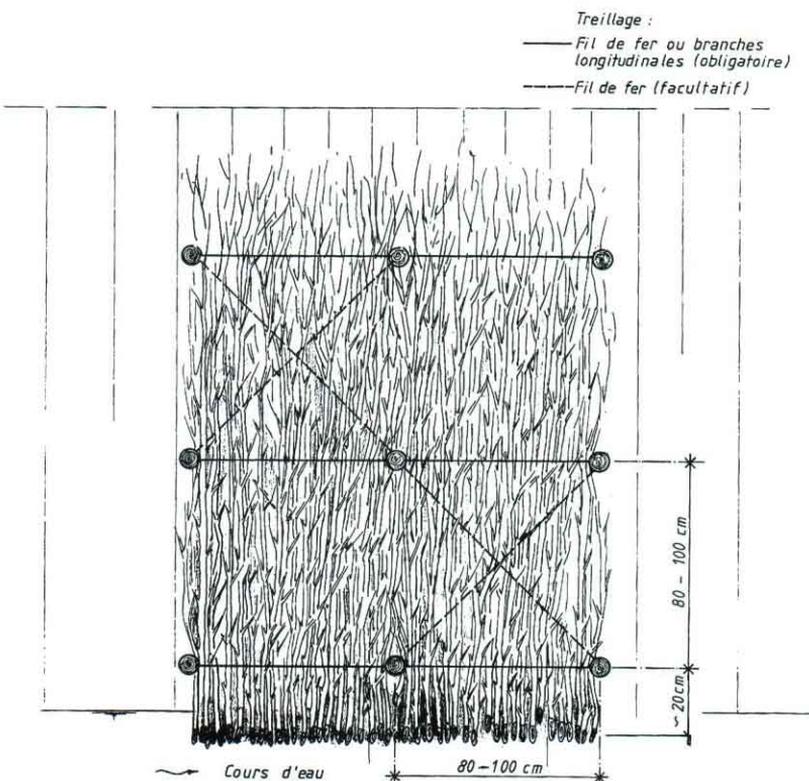


Figure 13.  
Confection type  
des couches de  
branches vivantes



■ 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

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

(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/m<sup>2</sup> 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  $\geq 200$  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 (!).

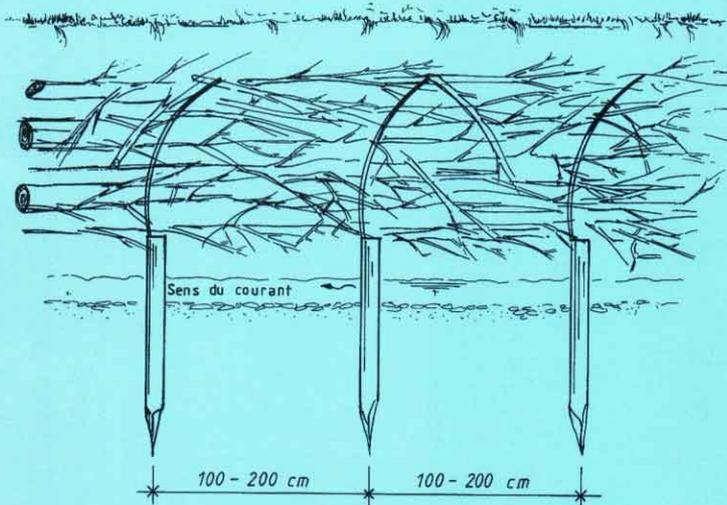
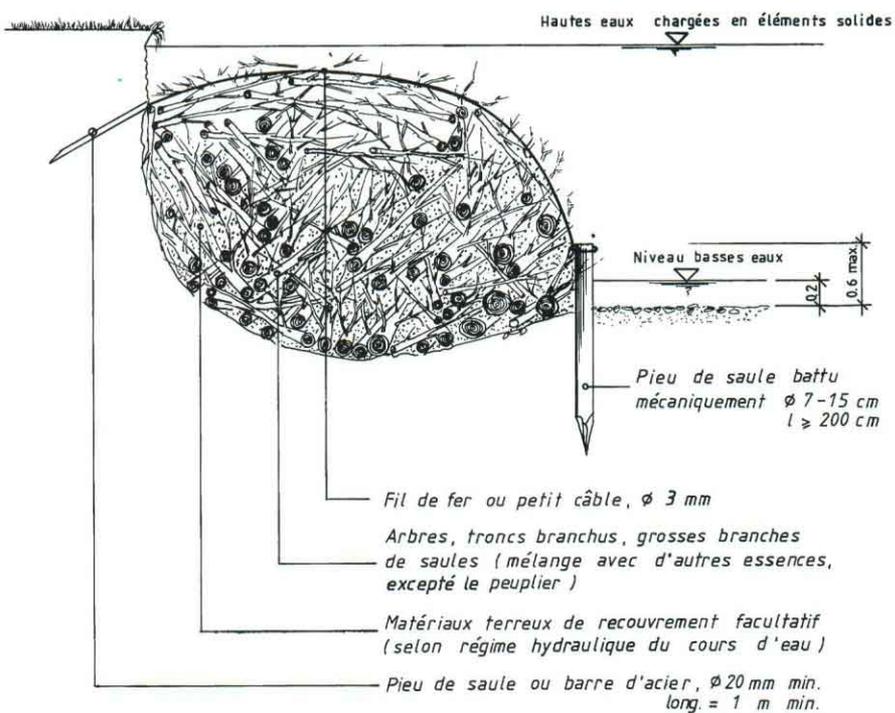


Figure 14. Principe et confection du peigne



■ 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  $\geq 100$  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 :

<b>pieux de saule</b>	(1 pce/10 m <sup>3</sup> )	50 - 100 F / pce	5 - 10,00 F
<b>barre d'acier</b>	(1 pce/10 m <sup>3</sup> )	100 F / pce	10,00 F
<b>branches, troncs branchus, arbres</b>		50 F / m <sup>3</sup>	50,00 F
<b>matériaux terreux, attaches, etc.</b>			80,00 F
<b>Total aménagement d'un mètre cube de peigne</b>			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'étagé 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 m<sup>2</sup>), 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/m<sup>2</sup>), 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 m<sup>2</sup> 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 / m<sup>2</sup>, 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.

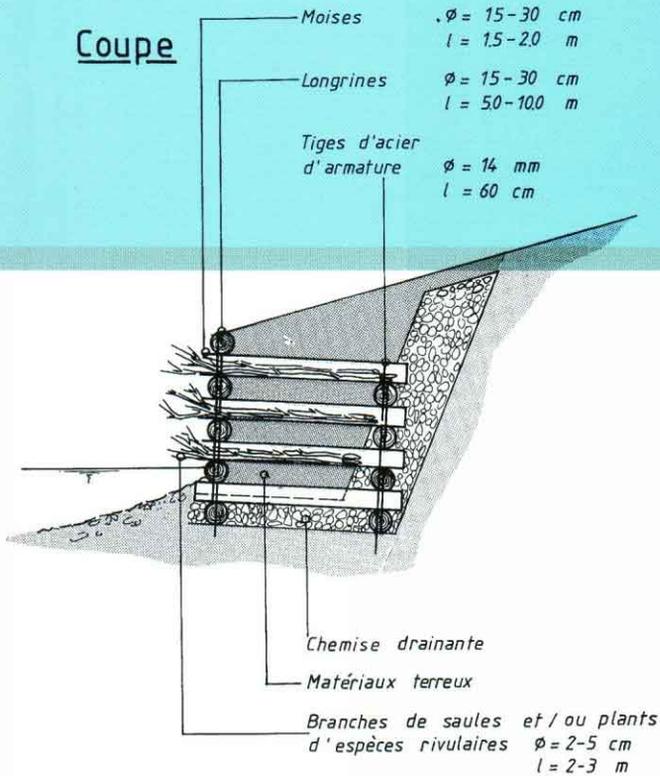
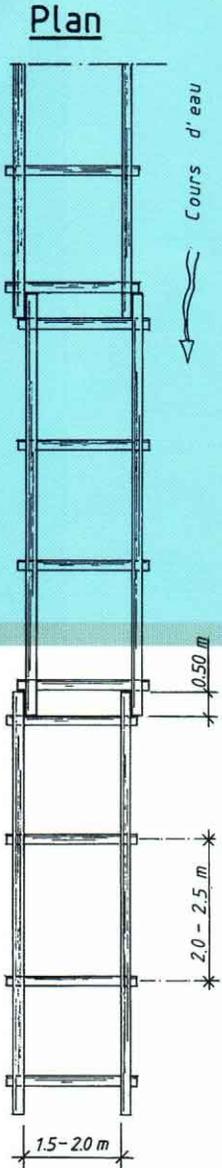


Figure 15. Détails et principe des caissons \*végétalisés à double paroi



## COUTS

Ils se calculent généralement soit au m<sup>3</sup> de bois utilisé, soit au m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup> de bois employé ou d'environ 240,00 à 500,00 F par m<sup>3</sup> 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.

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

**Total aménagement d'un mètre carré de treillis de jute :** 17 - 33,00 F / m<sup>2</sup>

**Treillis en fibres de coco**

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

**Total aménagement d'un mètre carré de treillis en fibres de coco :** 39 - 72,00 F / m<sup>2</sup>

**Natte de fibres de coco**

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

**Total aménagement d'un mètre carré de natte de fibres de coco :** 19 - 42,00 F / m<sup>2</sup>

**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).

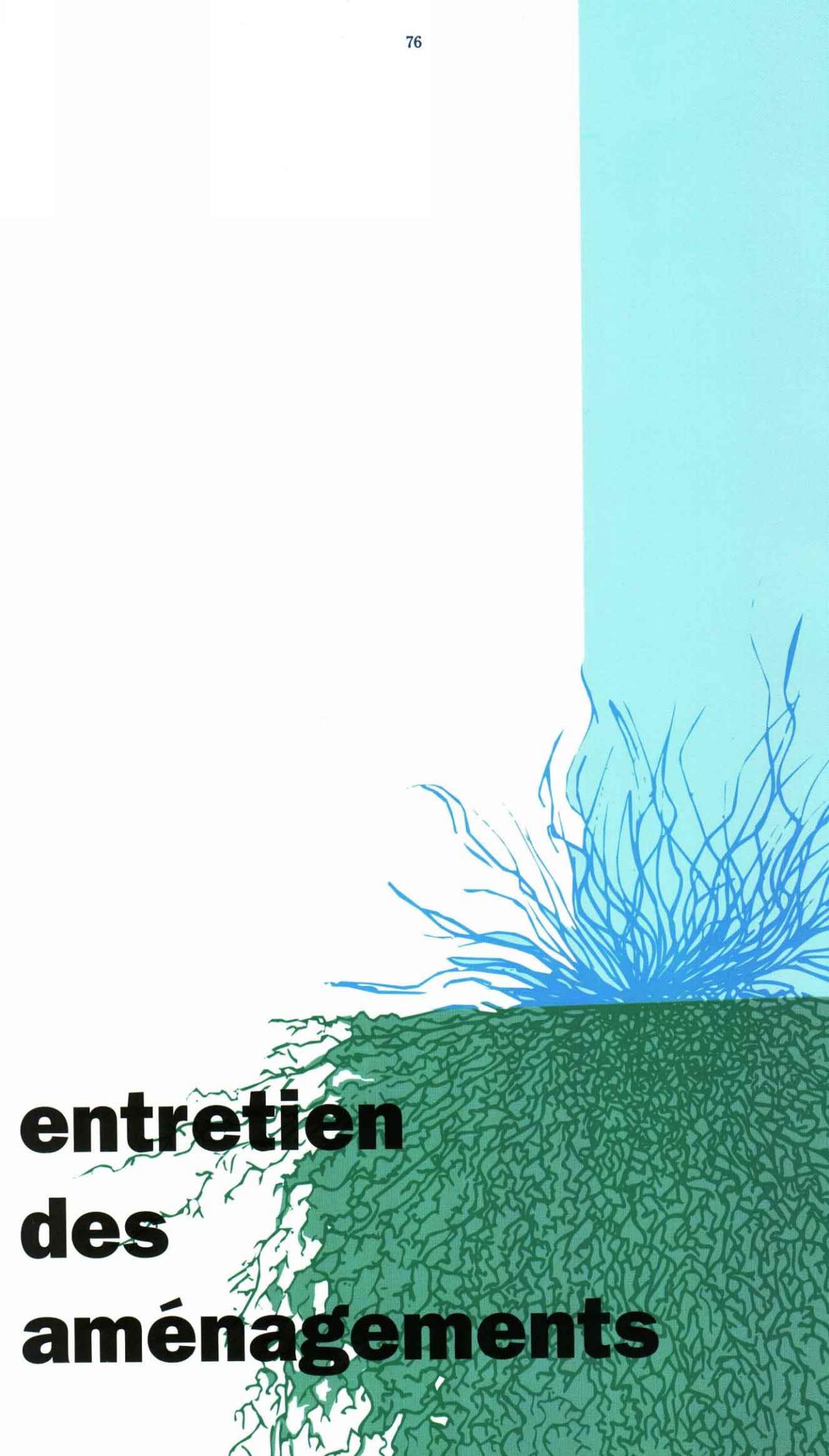
**LES RONDINS**

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.

A stylized illustration of a grass tuft and soil profile. The grass is rendered in a vibrant blue color, with long, thin blades radiating from a central point. Below the grass is a cross-section of soil, depicted in a dark green color with a dense, intricate pattern of lines representing roots and soil structure. The background is split into a white left half and a light blue right half.

# **entretien des aménagements**



Comme pour les ouvrages du génie civil et selon les cours d'eau, les ouvrages réalisés en techniques végétales nécessitent un entretien plus ou moins régulier. La fréquence des interventions dépend surtout de la position de l'ouvrage dans le profil transversal du cours d'eau et de sa relation avec le gabarit de ce dernier. Mais elle dépend également de la situation de l'ouvrage dans son contexte environnemental.

Les raisons les plus fréquentes qui motivent un entretien d'ouvrage, sont les suivantes :

- le gabarit du cours d'eau est trop encombré par une végétation devenue exubérante et l'écoulement est fortement ralenti, provoquant une montée des eaux ;

- la volonté de maintenir une formation végétale à un certain stade (herbacé ou buissonnant), plus

efficace selon les buts fixés ou facilitant l'accès à l'eau ;

- l'approvisionnement en matériaux, destinés à d'autres réalisations en techniques végétales ;

- permettre la croissance de certaines espèces par coupe sélective d'autres.

D'une manière générale, un entretien d'ouvrage (tous les 5 à 10 ans) est extrêmement bénéfique aux plantes, s'il est fait entre septembre et mars. En effet, cette opération stimule la croissance, renforce les souches et les racines, rajeunit l'ouvrage qui trouve une nouvelle vitalité. Seul l'entretien mécanique par la fauche et la taille sélective peuvent correspondre à des actions respectueuses du cours d'eau pour autant qu'elles soient pratiquées correctement. C'est pourquoi il n'est pas envisagé ici l'utilisation d'autres procédés.

Une fois un ensemencement réalisé, la fréquence de son entretien dépendra avant tout des deux critères suivants :

- l'évolution souhaitée de la surface ensemencée ;
- la composition botanique du mélange utilisé (bien que celle-ci devrait déjà être établie en fonction du premier critère).

Si on désire garder ouverte et dépourvue de ligneux une certaine surface de rive, une fauche annuelle voire tous les deux ans est un degré d'intervention minimum pour lutter contre l'embroussaillage spontané.

Pour satisfaire à une certaine notion d'esthétisme, notamment en milieu urbain, des rives pourront être fauchées jusqu'à six reprises durant une période de végétation. Conscient de cette situation, on aura pris soin de choisir un mélange à dominance de ray-grass anglais (*Lolium perenne*), fétuque et pâturin des prés (*Festuca pratensis*, *Poa pratensis*), de même que trèfle blanc (*Trifolium repens*), toutes des espèces supportant un rythme de coupe élevé.

Généralement, on profite d'apporter une diversité biologique supplémentaire avec l'ensemencement, et on choisira des mélanges riches en espèces, tout en favorisant celles qui sont les plus efficaces dans la stabilisation. Les mélanges s'inspirent alors des associations \*rivulaires locales, existantes sur les berges naturelles. Une à deux fauches annuelles seront alors suffisantes, suivant l'association, si l'on désire maintenir la diversité botanique. Toute intervention supplémentaire provoquera à relativement court terme, une banalisation de la flore.

Il arrive fréquemment qu'un ensemencement se réalise au dessus d'un ouvrage plus conséquent (fascine, tressage, etc.) Il s'agira alors de veiller à ce que les déchets de fauche ne soient pas déversés sur la végétation buissonnante naissante de l'ouvrage. Les déchets en décomposition sur un tressage par exemple, n'ont pas l'effet fertilisant qu'on pourrait attendre. Au contraire, cela étouffe et fait périr la végétation en place, ce qui remet directement en question la stabilité de la berge. D'une manière générale, cette mauvaise habitude de stocker des déchets végétaux sur des berges est à proscrire, même sur des berges non aménagées, car cela constitue souvent l'origine de gros problèmes :

- la végétation en place périclète et la protection de surface de la berge n'est plus assurée ;
- les matériaux s'accumulent en pied de berge et dévient le courant qui va entamer la berge opposée ;
- les déchets sont emportés par les crues et forment des embâcles en aval ;
- les jus de fermentation sont toxiques pour la faune aquatique.

Dans des plantations denses, l'herbe est éventuellement fauchée une à deux fois la première année, pour assurer la reprise des jeunes plants qui, dans certains cas, peuvent être trop fortement concurrencés. La nécessité de cette intervention dépend de la hauteur des plants utilisés lors de la plantation. Par la suite, on abandonne la végétation aux libres mécanismes de la concurrence \*interspécifique et des modifications de composition, du moins en milieu naturel.

# VEGETATION BUISSONNANTE ET ARBUSTIVE

Généralement, c'est dans la berge que réside souvent l'essentiel des travaux d'entretien. En effet, pour les ouvrages situés en pied (tressage ou fascine), un développement trop exubérant n'est pas toujours souhaité, du moins dans de petits cours d'eau qui pourraient présenter des risques d'obstruction du gabarit.

Les espèces de saule à développement arborescent (*Salix alba* et *Salix fragilis*) sont à éviter dans des ouvrages de pied de berge. Pour des raisons de disponibilité des fournitures ou de confusion lors des prélèvements (qui se font en hiver !), il est parfois difficile de les éviter.

Des sujets qui présenteraient donc un tel port sont indésirables, à cause des grosses turbulences que provoquent les troncs, ainsi que le risque de déchaussement plus élevé et toutes les conséquences qui s'ensuivent (instabilité de la berge, déviation du courant, érosion accrue, embâcles, etc.).

La taille des saules de pied de berge a également pour but de faire gagner les aménagements en efficacité. En effet, des peignes denses de branches souples sont préférables à de gros troncs espacés.

La taille ne doit pas se faire à hauteur d'homme en réduisant la couronne des arbustes, mais il s'agit de procéder à un recépage (coupe à 5 ou 10 cm du sol) sélectif des plus grosses tiges, ou de celles qui pourraient entraver l'écoulement du cours d'eau, et favoriser l'accumulation des embâcles. Avec les branches les plus souples, il est également possible de

procéder au \*marcottage. Les tiges aériennes, après flexion, plaquage au sol et recouvrement de terre sur la berge, sont fixées avec des agrafes ou des boutures entrecroisées. Elles forment ainsi des rejets, plus haut dans la berge et fixent le sol avec de nouvelles racines.

Sur les positions plus retirées de la berge, les travaux d'entretien doivent dépendre du développement souhaité de la végétation mise en place, et plus particulièrement des saules, qui proviendront généralement de boutures ou lits de \*plançons :

- veut-on garder artificiellement une végétation \*pionnière à long terme ?
- veut-on voir succéder naturellement aux saules d'autres essences \*rivulaires ?

L'entretien sera dirigé de manière différente, dans l'une ou l'autre option. Dans le premier cas on procédera à un recépage. Pratiquement, il s'agit, par une section propre et légèrement inclinée afin de diminuer les risques de pourriture, de sectionner les tiges à ras de terre ou à 10 ou 15 cm au-dessus du sol si la strate herbacée peut concurrencer en lumière le ligneux. L'intervention doit se répéter dans un intervalle de 3 à 10 ans. Dans le second cas, l'entretien se basera sur des principes empruntés à la sylviculture et plus précisément au concept de la forêt jardinée, à la différence près que le but ici n'est pas de produire du bois. On effectuera donc des coupes sélectives, dans l'idée que les saules devront progressivement être remplacés par d'autres essences (aulne, frêne, érable, etc.).

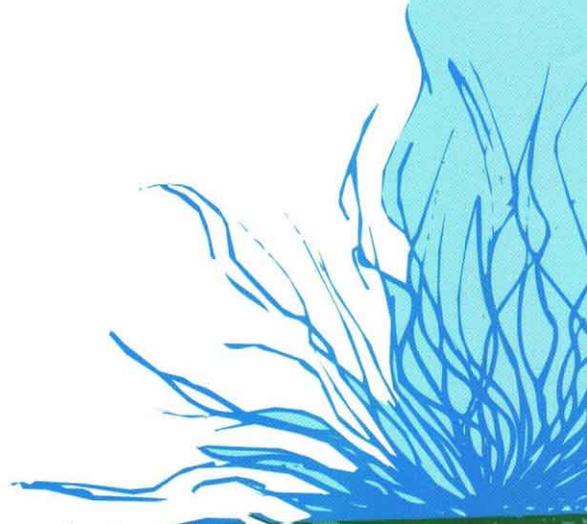
# VEGETATION ARBORESCENTE

Dans les aménagements, la végétation arborescente est généralement destinée à être plantée en sommet de berge ou au-dessus du niveau de crue de plein bord. Il peut s'agir de boutures de saule d'espèces arborescentes ou de plantation d'autres essences. Dans des conditions où les riverains ne désirent pas jouer du bois et afin de favoriser la faune \*rivulaire, plutôt que de brûler ou d'évacuer les déchets de coupe, un dépôt du bois hors niveau de crue \*cinquantennale fournit nourriture, caches, abris et

diversification du milieu. Si le développement de la végétation et sa disposition sur la berge ont bien été appréhendés lors de la réalisation du projet, l'entretien de la végétation arborescente devrait se limiter à des travaux mineurs :

- éliminer un arbre penché ou déchaussé ;
- éliminer un arbre placé trop bas sur la berge ;
- redonner plus de lumière à un cours d'eau très fermé.

# **examen de quelques réalisations**



Les exemples ci-après ont été sélectionnés pour les raisons suivantes :

- 1.** Chacun a été motivé par une problématique de base différente (érosion, glissement de terrain, création d'un boulevard, déplacement du cours d'eau, etc.).
- 2.** Chacun a été approché et analysé différemment, car les données scientifiques (hydraulique, sol, faune, flore, etc.) étaient soit inexistantes, soit existaient partiellement ou totalement.

La méthodologie a donc été adaptée à la disponibilité de certaines données.

- 3.** Chacun a bénéficié de techniques végétales différentes.
- 4.** Chacun correspond à des types de rivières complètement différents.
- 5.** Chacun se situe dans des régions suisses et françaises différentes.
- 6.** La plupart ont des âges différents.
- 7.** Chacun renseigne différemment sur la réussite ou les problèmes constatés.

## LE PROBLEME DE BASE

La rivière Sorne est un cours d'eau du canton du Jura dans le nord-ouest de la Suisse. Affluent de la Birse, elle parcourt une longueur totale de 29,6 km avec une superficie totale de \*bassin versant égale à 208,5 km<sup>2</sup>.

Le tronçon étudié se situe sur la commune de Courfaivre où le \*bassin versant compte environ 156 km<sup>2</sup> soit les 3/4 de la surface totale. Il a une longueur égale à 35 m, se situe sur la berge gauche de la rivière et est caractérisé par une zone d'érosion marquée d'environ 25 m et d'une zone de glissement (éboulement d'une dizaine de mètres de longueur et environ 3 mètres de hauteur). La pente générale du cours d'eau est de 17,4 ‰ alors qu'elle est de 5 ‰ sur le tronçon étudié.

Le cours supérieur de la Sorne est très "sauvage" et coule à travers de nombreuses formations rocheuses (gorges, cluses). Le tronçon concerné est plus en aval, en plaine, et se situe juste après un pont qui crée une contraction et un seuil qui accélère l'écoulement.

La pluviométrie est environ égale à 1.400 mm/an aux abords de la source (950 m d'altitude), alors qu'elle est d'environ 1.000 mm/an dans la région du tronçon étudié (450 m d'altitude).

De manière générale, les débits de la Sorne sont faibles, étant considérablement influencés par les phénomènes \*karstiques. Toutefois, lors de la crue exceptionnelle du 23 juin 1973, le débit de la Sorne a été mesuré à 100 m<sup>3</sup>/s à Delémont (confluence avec la Birse) ; un calcul de proportion rapporté à la surface du \*bassin versant a permis d'évaluer le débit de projet égal à 75 m<sup>3</sup>/s à l'endroit étudié.

La Sorne a été fortement corrigée en amont de Courfaivre. L'accélération des courants a provoqué une érosion accrue des berges et du lit. Des enrochements se trouvent "pendus" à plus d'un mètre au-dessus du fond du lit. L'agriculture étant assez intensive, celle-ci laboure jusqu'au sommet de berge, contribuant à détruire la \*ripisylve protectrice.

Le manque d'entretien du \*lit mineur et les coupes systématiques en sommet de berges ont favorisé aussi la dégradation des zones encore naturelles. Toute la plaine est considérée comme zone inondable car les phénomènes de remontées de nappes souterraines et des engorgements superficiels sont souvent plus fréquents que les débordements du cours d'eau.

## SOLUTIONS PROPOSEES

Les aménagements en techniques végétales proposés ont été de deux natures différentes, en fonction de la nature des sols, des contraintes hydrauliques et des paramètres physiques (érosion et glissement). L'ensemble des travaux a été réalisé en avril 1993 :

ZONE ÉRODÉE (figure 17)

- travaux forestiers et de nettoyage (défrichage de buissons, abattage de 2 arbres

et dessouchage, évacuation des matériaux et déchets) ;

- réglage de la pente de la berge ;
- battage mécanique des pieux de saule (longueur 150 cm, espacés de 60-100 cm) ;
- mise en place d'un tressage en pied de berge, hauteur ~ 30 cm (branches de saule capables de rejeter), fixation aux pieux ;
- remblai de terre végétale derrière le tressage et réglage (apport extérieur) ;

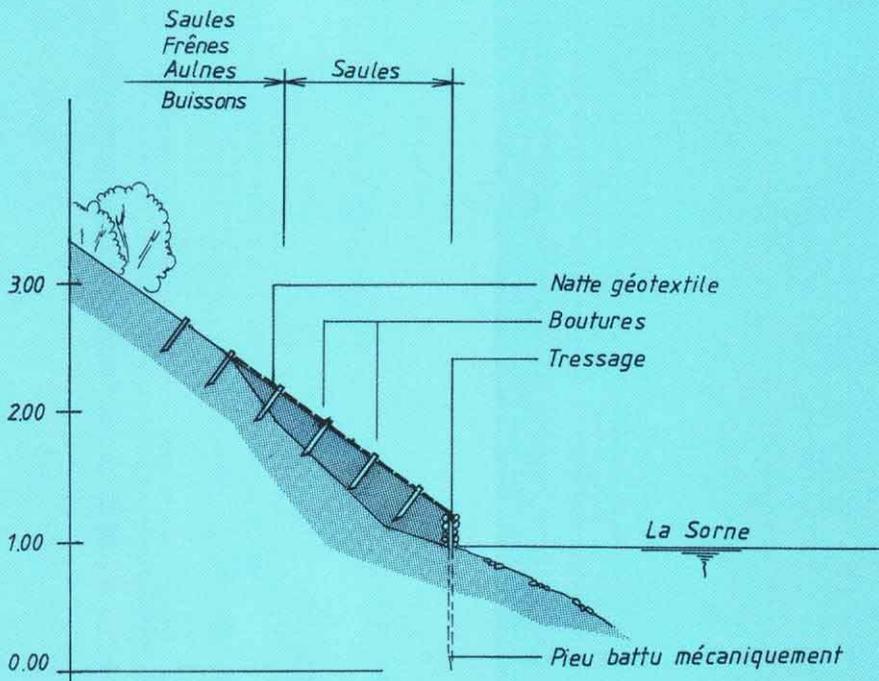


Figure 17.  
Techniques  
végétales  
proposées pour la  
zone érodée de la  
Sorne à  
Courfaivre



- mise en place d'une natte en jute tissée (type Sifor S 1.000 g/m<sup>2</sup>) de manière à couvrir la berge et éviter le ravinement en cas de crue durant les deux premières périodes végétatives (fixée par des agrafes métalliques en U, longueur totale 60 cm) ;

- mise en place de boutures de saule (longueur 60-80 cm, diamètre 2-5 cm, enfouies aux 3/4, 5 pièces/m<sup>2</sup>) ;

- ensemencement manuel des surfaces travaillées (mélange type Hydrosta soleil, 30 g/m<sup>2</sup>) ;

- des plantations d'essences \*rivulaires ont été prévues mais la saison étant déjà avancée, elles seront réalisées durant l'automne-hiver 93-94.

#### ZONE DE GLISSEMENT (figure 18)

- terrassements : déblais à la machine (pelle hydraulique) des matériaux de manière à dégager une bonne assise en bordure du cours d'eau (mise en dépôt latéral de matériaux) ;

- réalisation d'un caisson en rondins (\*résineux) à double parois (longueur 11 m, profondeur 2 m, hauteur 1,20 m, diamètre des rondins 20 cm) ; rondins fixés les uns aux autres par des aciers d'armature (diamètre 14-16 mm, longueur 60 cm) ;

- réalisation d'une chemise drainante derrière le caisson pour évacuer l'eau et diminuer la poussée de l'ouvrage (matériaux calcaires anguleux 40-150 mm ou graviers-galets, compactés légèrement par couche) ;

- remplissage du caisson par les déblais du dépôt latéral ;

- au fur et à mesure du montage du caisson, pose de branches de saule capables de rejeter incorporées dans la structure (longueur des branches ≥ 2 m, Ø - 2 cm, 15 pièces/m) ;

- le remblayage du talus sur caisson et la mise en forme se fait par l'apport de matériaux terreux ;

- au fur et à mesure du remblayage du talus par des matériaux terreux, un lit de \*plançons est réalisé en branches de saule capables de rejeter (longueur 50-60 cm, Ø env. 2 cm ; 15 pièces/m enfouies aux 3/4 et inclinées à 10°) ;

- le haut de berge est complété par la mise en place d'une natte en jute tissée, plantée de boutures de la même manière que pour la zone érodée ;

- ensemencement manuel des surfaces travaillées.

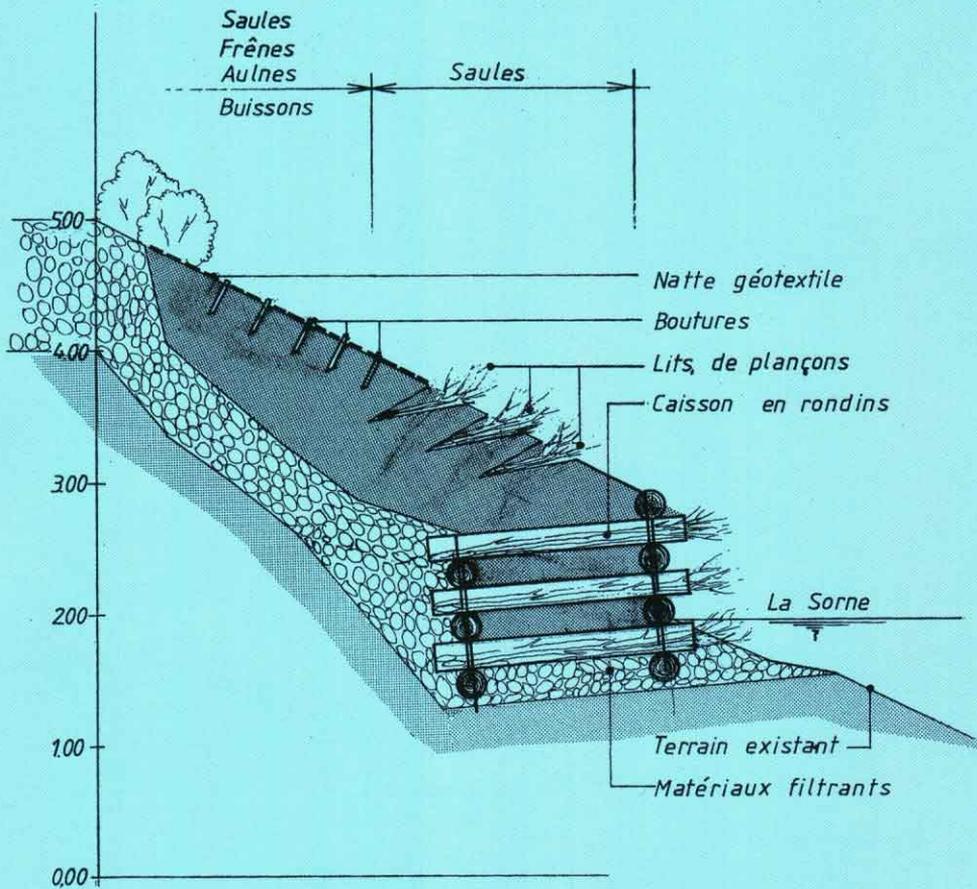


  
 Figure 18.  
 Techniques  
 végétales  
 proposées pour la  
 zone de  
 glissement de la  
 Sorne à  
 Courfaivre

## APPRECIATION

La réalisation très récente de cet ouvrage ne permet pas de tirer de conclusions définitives quant à son comportement. Cependant, des points positifs sont à constater :

- un excellent développement de la végétation, notamment des lits de branches du caisson ainsi que du lit de \*plançons, ceci malgré une réalisation relativement tardive en avril 1993. Ce n'est possible qu'en respectant des temps d'attente minimum entre le prélèvement des branches de saule et leur utilisation, de même qu'un entreposage correct durant l'attente (endroit ombragé, base des branches au contact de l'eau) ;

- un bon comportement de l'ouvrage lors des hautes eaux, dont la fréquence a été très soutenue pendant les mois de septembre et octobre 1993.

Alors qu'il n'était pas prévu au départ, la mise en place d'un filet de jute s'est avérée nécessaire sur la zone des boutures et de l'ensemencement. Il est vrai que l'effet stabilisateur des boutures est faible juste après la réalisation. C'est donc essentiellement dans le but d'assurer la stabilité la première année que le filet de jute est utilisé. Son emploi devrait être systématique dans des situations identiques.

Figure 19 a-b.  
La Sorne à Courfaivre.  
Illustrations  
photographiques de  
l'évolution de la berge  
aménagée  
(Photos : B. Lachat et  
P.A. Frossard,  
Silène-Biotec)

Le développement des branches du caisson et du lit de \*plançons forme un massif de saules dense et compact. Etant donné l'ampleur relativement faible de l'ouvrage, cette "monoculture" de saules n'est pas particulièrement choquante. Mais pour des travaux identiques sur plusieurs dizaines voire centaines de

mètres, il faut profiter de l'occasion que donnent ces deux techniques (caisson \*végétalisé + lit de plants et \*plançons) pour varier les essences utilisées, puisque des plants à racines nues peuvent être couchés parmi les branches. Dans le cas présent, la diversité a été apportée par les plantations en sommet de berge (voir figure 19).



a) Etat de la berge avant les travaux (30.3.93) :

Zone d'érosion marquée et zone de glissement. Les matériaux glissés ont été emportés par les crues. La berge a été nettoyée en vue des travaux.

Noter le caractère semi-urbain du site.

b) Développement de l'ouvrage (22.9.93), cinq mois après.



Figure 19 c-d.  
La Sorne à Courfaivre.  
Illustrations  
photographiques de  
l'évolution de la berge  
aménagée  
(Photos : B. Lachat,  
Silène-Biotec)

c) *Durant les travaux, détail du caisson (23.4.93) :*

*Réalisation de lits de \*plançons au-dessus du caisson \*végétalisé.*

*Transition entre l'ouvrage en tressage de saule et le caisson \*végétalisé.*

*Protection derrière le tressage avec une natte de jute.*



d) *Six mois après (4.10.93) :*

*Les boutures dans le caisson et les \*plançons ont vigoureusement rejétés, conférant une solidité supplémentaire à l'ouvrage et une "ambiance" de vie caractéristique.*



## LE PROBLEME DE BASE

Le tronçon étudié sur la rivière l'Ognon a une longueur de 1.300 m, est situé en aval de la commune d'Autrey-le-Vay et est géré par le Syndicat d'Aménagement de la Haute Vallée de l'Ognon.

La rivière, très méandreuse, présente une allure \*morphodynamique très variée : peu d'endroits sont stables. De longs tronçons présentent de fortes érosions, provoquant des dépôts de graviers qui se végétalisent rapidement et qui augmentent l'effet de détournement du cours d'eau.

La pluviométrie est abondante dans la région de la source de l'Ognon (1.500-2.000 mm par

an) et de bon nombre de ses affluents, alors qu'elle atteint environ 1.000 mm par an dans la partie juste en amont du secteur étudié (à 65 km de la source). Les inondations sont fréquentes à la fin du printemps, en été (orages) et durant l'automne, alors que la période sèche se situe en hiver et au début du printemps.

La pente générale du cours d'eau est de 9 ‰, celle du tronçon d'étude d'environ 1,16 ‰. L'écoulement, rapporté à l'ensemble du tronçon étudié, est fluvial.

Les données disponibles ont permis d'établir les débits caractéristiques suivants :

**Moyenne sur 1 jour :**

**Q1 = 93 m<sup>3</sup>/s    Q2 = 102 m<sup>3</sup>/s    Q5 = 130 m<sup>3</sup>/s    Q10 = 148 m<sup>3</sup>/s**

**Moyenne sur 3 jours :**

**Q1 = 68 m<sup>3</sup>/s    Q2 = 76 m<sup>3</sup>/s    Q5 = 102 m<sup>3</sup>/s    Q10 = 118 m<sup>3</sup>/s**

Les valeurs de débits sur 3 jours renseignent sur les niveaux et durée de submersion.

Les crues présentent une montée rapide et un étalement assez lent. Les débordements sur le site concerné sont fréquents avec des hauteurs d'eau atteignant 50 à 70 cm sur les terrains avoisinants.

Très peu d'informations sur les débits et hauteurs d'eau moyens étaient disponibles. Mais, selon les conditions naturelles rencontrées, déterminer un débit de projet ne semblait pas être utile puisque, logiquement, il faut considérer et maintenir la zone bordant le cours d'eau comme inondable.

En ce qui concerne le secteur étudié, les berges sont soit complètement dénudées de leur végétation typique et adaptée, soit meublées avec des essences de culture inappropriées telles que le peuplier, ce qui crée une situation tendant à renforcer l'érosion dans les deux cas.

L'exemple illustré par la figure 21 montre une rive agricole complètement déboisée où les derniers arbres isolés dans le \*lit mineur se déchaussent. L'autre rive est occupée par une plantation de peupliers qui tombent régulièrement et entravent l'écoulement en déviant le courant sur les deux berges.

## LA SOLUTION PROPOSEE

En ce qui concerne le lit, les bancs de galets ont été partiellement arasés, un grand seuil à effet directif a été réalisé (rampe en enrochements incurvée de manière à conserver un niveau d'eau minimum à l'étiage et cintrée côté amont de manière à dévier au centre l'écoulement qui se dirigeait contre la berge). Des épis

(enrochements) ont également été implantés dans des courbes externes de manière à guider l'écoulement vers l'intérieur du \*lit mineur et à ralentir la vitesse de l'eau sur une certaine portion, favorisant ainsi la sédimentation différenciée des granulats.

En ce qui concerne la berge droite de l'Ognon (courbe

externe), initialement quasiment verticale sur deux à trois mètres de hauteur, les aménagements suivants ont été réalisés :

- \*talutage de la berge avec pente 3/2 à 3/1 ;
- confection d'un solide pied de berge en fascines de saule, surmonté de boutures (figure 20, variante 1) dans la majeure partie du tronçon corrigé et d'une couche de branches de saule vivantes (figure 20, variante 2) dans les endroits où les forces d'arrachement sont les plus importantes, soit juste en amont du seuil par exemple ;
- ensemencement hydraulique de la berge travaillée.



Figure 20.  
Coupe type des solutions réalisées pour protéger la berge droite de l'Ognon

REMARQUES :

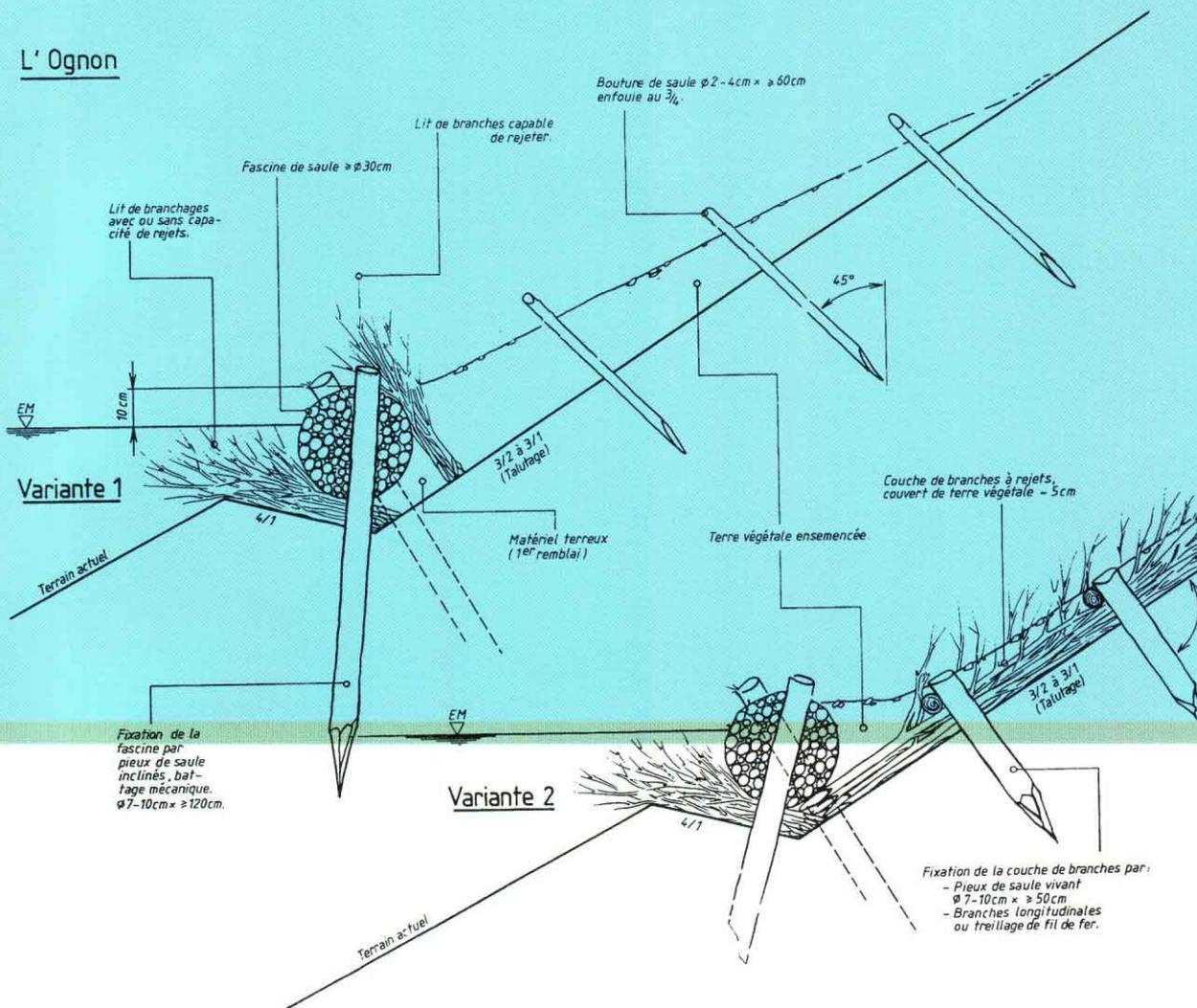
- il n'a pas été nécessaire de procéder à un apport de terre végétale suite au \*talutage de

la berge en vue de la préparation de l'ouvrage en techniques végétales, car le substrat très limono-terreux de toute la berge présentait de bonnes conditions pour les végétaux ;

- un lit de petites branches a été placé sous la fascine afin d'éviter un déchaussement de l'ouvrage par le dessous, ceci en raison de la granulométrie très fine du substrat ;

- afin de réaliser un pied de berge végétal le plus stabilisant possible, un lit de branches capables de rejeter a été placé derrière la fascine. Le niveau d'étiage n'étant pas connu très précisément, les branches placées ainsi, presque verticalement, ont toujours les pieds dans l'eau et, sauf en cas de crue, ont toujours le nez hors de l'eau (condition de réussite de l'ouvrage).

## L' Ognon



## APPRECIATION

L'aménagement ayant été réalisé au début du printemps 1993, il est possible d'en tirer un certain nombre de leçons. En effet, si initialement le projet et la motivation permettaient de garantir toutes les conditions de réussite, un certain nombre d'éléments liés à la réalisation ont conduit à un ouvrage qui est satisfaisant, mais qui aurait pu être beaucoup plus performant :

- des difficultés administratives liées au choix de l'entreprise et au financement des travaux ont provoqué un retard notable dans le début des opérations (1ère réunion d'implantation des ouvrages et début de chantier le 13 avril 1993 !), de sorte que les végétaux commençaient déjà à débouarrer, perdant ainsi une bonne partie de leur énergie ;
- les saules étaient abondants sur le site, mais répartis sur de longs tronçons et surtout sur des propriétés non touchées par les aménagements. Ceci fait que l'essentiel des végétaux utilisés ont été prélevés à l'avance et ailleurs,

puis transportés (env. 150 km) avant d'être mis en place, leur capacité de rejets étant ainsi réduite. Il paraît alors essentiel de préciser à l'avenir, dans le cahier des charges pour l'entreprise, que les saules doivent être prélevés un maximum sur place et que le temps entre le prélèvement et la mise en place ne devrait pas excéder deux jours. Même si pour les administrations (DDAF, syndicats intercommunaux, etc.) cela demande du temps et que négocier le prélèvement de saules avec les propriétaires des terrains concernés est parfois gênant et difficile, il faut le faire. La qualité de l'ouvrage réalisé en techniques végétales en est directement dépendante.

Finalement, l'ouvrage se comporte bien. Des compléments sont encore à apporter par rapport au projet, à savoir la reconstitution d'une \*ripisylve en sommet de berge pour amener à long terme une protection complémentaire à la stabilité de la berge. La figure 21 illustre l'évolution des ouvrages.

Eventuellement boutures de saule jusqu'au sommet de berge

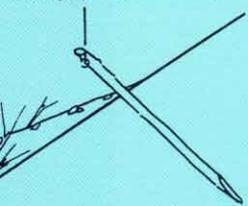


Figure 21 a-c.  
L'Ognon à Autrey-  
le-Vay.  
Illustrations  
photographiques  
de l'évolution de  
la berge  
aménagée  
(Photos :  
B. Lachat,  
Silène-Biotec)

a) Avant les travaux (30.4.91) :  
Les berges sont soit complètement dénudées de leur végétation  
typique adaptée, soit meublées avec des essences de cultures  
inappropriées tel que le peuplier, situation tendant à renforcer  
l'érosion dans les deux cas.



b) Pendant les travaux (22.4.93) :  
\*Talutage des berges et confection d'un solide pied en fascines  
de saule fixées à des pieux battus mécaniquement. Au fond on  
devine la construction du seuil à effet directif en complément  
aux techniques végétales.



c) Après les travaux (26.8.93) :  
La berge nouvellement \*végétalisée retrouve sa  
résistance naturelle face à l'érosion.



## LE PROBLEME DE BASE

Le schéma directeur de l'agglomération lyonnaise, approuvé en avril 1990, a mis en évidence la nécessité de réaliser le bouclage routier du boulevard périphérique. Le site est stratégique par le rôle de son entrée nord-est de Lyon et par les possibilités offertes de prolonger la ville le long du fleuve. Le Rhône constitue une forte image de marque à l'échelle de l'agglomération lyonnaise et doit représenter un élément fédérateur pour les différents grands projets sur le site. L'aménagement des berges et du lit du Rhône ont toute leur importance non seulement pour des questions hydrauliques et d'implantation d'ouvrages routiers, mais également pour des questions de revalorisation paysagère du site.

Afin de permettre la réalisation des ouvrages précités, le Rhône sur le secteur concerné (tronçon pont Poincaré - pont Churchill) voit son lit rétréci par un aménagement remblayé sur le cours d'eau d'environ 30 m de largeur et approfondi de 5 - 6 m sous le pont Poincaré. Cela laisse une berge gauche du fleuve neuve, artificielle et entièrement nue, dont la mission confiée était de la \*végétaliser, de manière à se rapprocher le plus possible du modèle d'une berge naturelle et caractéristique de la \*ripisylve, sur une longueur de plus de 600 mètres. Les différentes études hydrauliques existantes liées aux grands projets sur le site ont permis de connaître un certain nombre de données

nécessaires au dimensionnement des ouvrages en techniques végétales :

- température annuelle moyenne à Lyon : 11,5° C ;
- total des précipitations annuelles : 829,4 mm ;
- superficie du \*bassin versant : 20.300 km<sup>2</sup> dont 37 % au-dessus de 1.000 m ;
- pente de la ligne d'eau sur le tronçon étudié : 0,5 ‰ ;
- le Rhône en amont de Lyon est marqué par l'influence montagnarde avec des eaux fraîches et bien oxygénées ;
- la région lyonnaise se situe à l'interface entre plusieurs influences climatiques, qu'il est difficile d'analyser ici ; ainsi, si le premier trimestre de l'année (hiver) est la période la plus sèche à Lyon (161,3 mm de pluie), c'est aussi la période où le Rhône connaît ses plus grandes crues (d'octobre à janvier). Les grosses crues sur le Rhône se sont toujours produites par une grande crue de l'Ain (débit moyen de 200 m<sup>3</sup>/s) ;
- les vitesses varient généralement de 0,13 à 2,3 m/s et peuvent atteindre 4 m/s en cas de grande crue ;
- les débits caractéristiques du Rhône sur le tronçon étudié sont les suivants :
 

Q <sub>étiage</sub>	=	220 m <sup>3</sup> /s,
Q <sub>semi-permanent</sub>	=	515 m <sup>3</sup> /s,
Q <sub>1</sub>	=	1.460 m <sup>3</sup> /s,
Q <sub>2</sub>	=	2.200 m <sup>3</sup> /s,
Q <sub>10</sub>	=	3.200 m <sup>3</sup> /s,
Q <sub>100</sub>	=	4.400 m <sup>3</sup> /s,
Q <sub>1000</sub>	=	5.500 m <sup>3</sup> /s;
- la différence de niveau entre Q<sub>étiage</sub> et Q<sub>100</sub> est d'environ 6 mètres.

## LA SOLUTION PROPOSEE

### CALCUL DE FORCE TRACTRICE

Afin de déterminer quel type d'aménagement en techniques végétales de protection de berge peut être mis en oeuvre, il a été procédé à différents calculs de force tractrice dont voici un extrait applicable à deux profils en travers du secteur étudié :

Rappel des formules :

$$\tau \text{ (N/m}^2\text{)} = \rho \cdot h \cdot I$$

(force tractrice en fonction de la hauteur d'eau)

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

(force tractrice en fonction de la vitesse de l'eau).

Profil 6.2 (aval)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Niveau d'eau (m)	h (m)	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> ) (fct. de h)	Vitesse berge gauche (v) (m/s)	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> ) (fct. de v) avec K <sub>s</sub> = 30
Etiage	220	162.15	0	0	-	-
Semi-permanent	515	162.55	0.40	2.0	-	-
Q <sub>1</sub>	1.460	164.10	1.95	9.8	2.2	29.7
Q <sub>2</sub>	2.200	165.35	3.20	16.0	-	-
Q <sub>10</sub>	3.200	166.55	4.40	22.0	0.8 - 2.5	6.5 - 36.0
Q <sub>100</sub>	4.400	167.85	5.70	28.5	1.0 - 2.7	9.1 - 40.4

Profil 7.0 (amont)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Niveau d'eau (m)	h (m)	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> ) (fct. de h)	Vitesse berge gauche (v) (m/s)	$\tau$ (N/m <sup>2</sup> ) (fct. de v) avec K <sub>s</sub> = 30
Etiage	220	162.18	0	0	-	-
Semi-permanent	515	162.75	0.57	2.9	-	-
Q <sub>1</sub>	1.460	164.50	2.32	11.6	0.8 - 2.8	6.5 - 42.6
Q <sub>2</sub>	2.200	165.82	3.64	18.2	-	-
Q <sub>10</sub>	3.200	167.15	4.97	24.9	1.5 - 3.0	16.7 - 47.3
Q <sub>100</sub>	4.400	168.48	6.30	31.5	1.5 - 3.5	16.7 - 59.6

Ces calculs de force tractrice donnent des valeurs qui sont faibles (maximum de 60 N/m<sup>2</sup> pour la crue centennale et calculées en fonction de la vitesse de l'eau contre la berge), ce qui, en regard de l'abaque de l'annexe A1, serait supportable par des essences herbacées, \*graminées, bien adaptées. Il est cependant nécessaire de prendre une certaine distance par rapport à ces résultats et considérer un facteur de sécurité important. En effet, la berge entièrement neuve sera moins "compactée" qu'une berge naturelle (cohésion entre les matériaux constitutifs peu importante), d'où fragilité potentielle de la fondation de l'ouvrage en techniques végétales. D'autre part, même si la pente de la ligne d'eau sur le tronçon considéré ainsi que les vitesses de l'eau en cas de crues demeurent peu élevées, la "force intrinsèque" du cours d'eau, de par les volumes d'eau transportés, demeure très importante et difficile à évaluer.

connaître les limites de mise en mouvance des matériaux constitutifs de la berge (graviers grossiers avec d<sub>75</sub> = 5 cm) :

Rappel des formules :

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

(force tractrice critique sur le fond)

$$\tau'_0 \text{ (N/m}^2\text{)} = \lambda \cdot \tau_0$$

(force tractrice critique sur les berges).

avec :

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

Formule applicable pour le Rhône :

- pente des berges : 3/1,  
d'où :  $\varphi = 18,43^\circ$
- diamètre des grains : 5 cm,  
d'où selon l'abaque de l'annexe A5 :  $\theta = 37^\circ$
- Rhône peu sinueux,  
d'où coefficient de multiplication : 0,9

## CALCUL DE FORCE TRACTRICE CRITIQUE

Il a également été procédé à différents calculs de force tractrice critique afin de

ainsi, on trouve par calcul :

$$\lambda = \cos 18,43 \cdot \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 18,43}{\text{tg}^2 37}} = 0,85$$

$$\text{et } \tau' = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 5 = 30,6 \text{ N/m}^2$$

Ce calcul donne un résultat de force tractrice critique qui est inférieur aux forces tractrices dues aux crues, calculées précédemment. On peut donc admettre que, dès la crue annuelle, les matériaux constitutifs de la berge peuvent entrer en mouvement selon un calcul fait en fonction de la vitesse de l'eau.

C'est pour cette raison qu'il a été projeté de mettre en place un \*géotextile de protection sur toute la surface de la berge aménagée, quel que soit l'ouvrage en techniques végétales imaginé.

### PROFIL DE BERGE À RÉALISER

Les différents calculs présentés ci-dessus, l'expérience du bureau d'études ainsi que les différentes discussions avec les représentants du ou des maîtres d'ouvrages (SEM de la Cité Internationale de Lyon, Compagnie Nationale du Rhône) et du bureau de paysagiste (M. Corajoud, Paris) ont conduit à proposer le profil type de la figure 22 pour la végétalisation de la berge gauche du Rhône. En partant du pied de berge et jusqu'au bas-port (promenade piétonne submersible avec la crue quinquennale), on trouve :

- un merlon : constitue l'assise de la berge ; réalisation en encochement avec un niveau supérieur qui ne doit pas dépasser la cote correspondant au débit semi-permanent. Imposé par le maître d'ouvrage pour éviter l'effet du batillage contre la berge ;
- une zone d'\*hélrophytes : espace en eau, généralement calme, délimité entre le merlon et le pied de berge \*végétalisé; fonction naturelle et esthétique mais non de soutien de berge ;
- une couche de branches à rejets : ouvrage de

stabilisation solide en techniques végétales ; protection de la partie de berge la plus sollicitée par les crues et fixée par du fil de fer à de solides pieux de saule dont la longueur aura au minimum 1,50 m ;

- des boutures de saule : stabilisation de la berge dans la partie intermédiaire ;
- des plantations : stabilisation du haut de berge où les sollicitations sont moins importantes ;
- un ensemencement : toute la surface de berge est ensemencée manuellement ou hydrauliquement afin d'augmenter la protection du sol d'une part et d'éviter un trop fort développement d'essences végétales non désirées d'autre part ;
- un \*géotextile : pour les raisons citées plus haut, une natte \*géotextile est mise en place sur toute la surface de la berge (filet de jute 1.000 g/m<sup>2</sup>). Cette natte est putrescible au bout de deux à trois ans, c'est-à-dire une fois que les végétaux se sont suffisamment développés. Elle est fixée solidement au moyen de fil de fer et pieux jusqu'à un niveau correspondant à Q1. Au-delà, des fers à béton recourbés d'une longueur totale de 1 m et des agrafes métalliques en forme de U pour la remise en place du \*géotextile, découpé pour les travaux de plantations, sont utilisés. La découpe est nécessaire dans le \*géotextile pour les plantations, alors que les boutures sont mises en place directement à travers la natte.

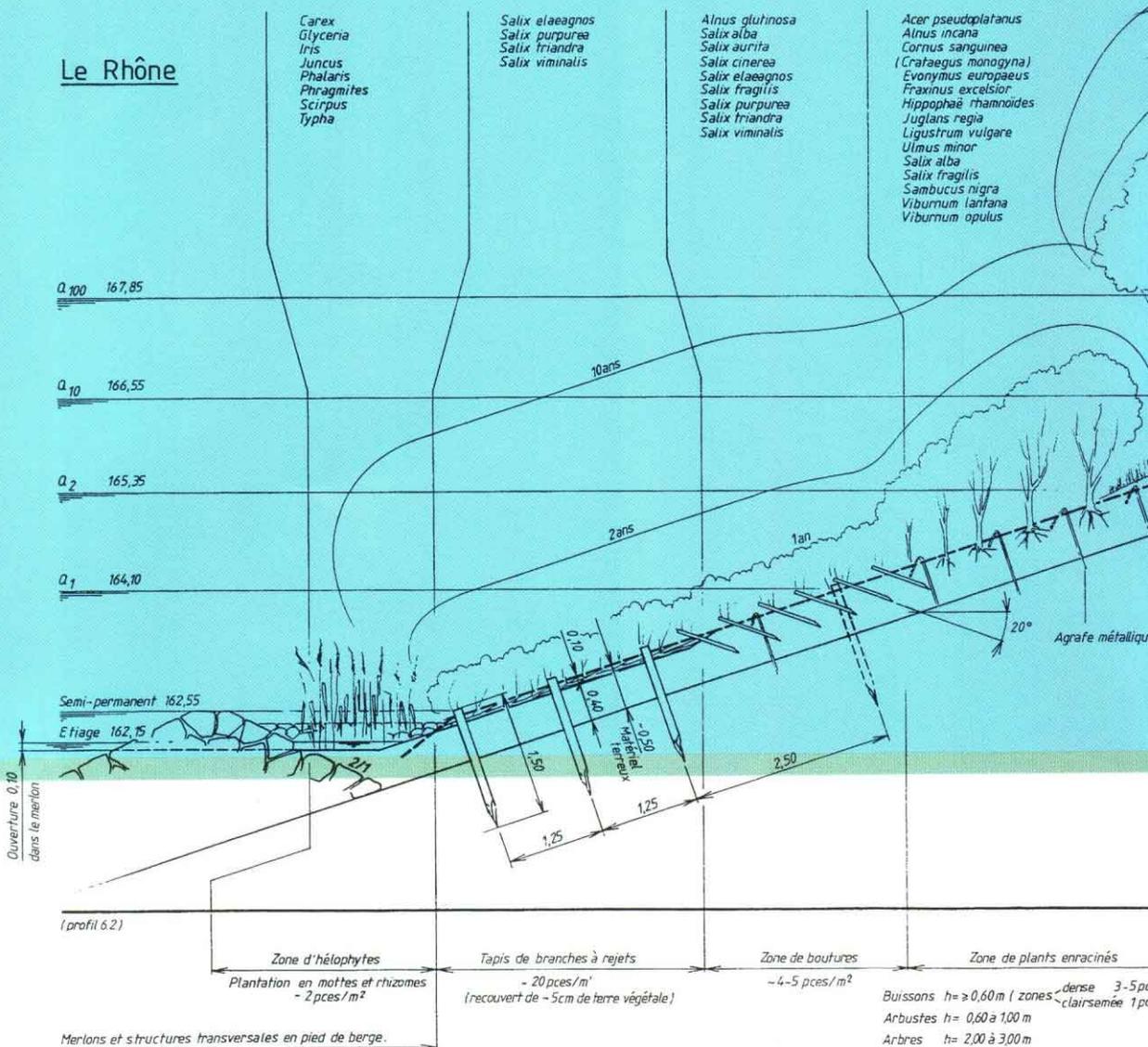
Le choix d'un type de \*géotextile n'est pas simple (cf. «géotextiles» p. 72), car il doit répondre à divers critères dont deux, a priori, contradictoires. D'une part, les mailles doivent être les plus petites possible afin de retenir les particules fines en cas de crue et d'autre part, les plus grosses possible afin de ne pas étrangler les végétaux et

permettre un développement correct. C'est pourquoi le choix s'est porté sur le jute (produit naturel et dégradable) offrant néanmoins une bonne résistance à la traction et tissé (écartement des fibres par les végétaux et non étranglement). Cependant, le fait d'utiliser un \*géotextile à mailles relativement fines (3-7 mm) oblige à réaliser

l'ensemencement en deux étapes, à savoir une première fois avant la pose du \*géotextile et une fois après, afin d'éviter que la majorité des graines projetées hydrauliquement restent piégées à la surface de la natte de jute.

Les travaux ont débuté en janvier 1994 (voir figure 23).

Figure 22. Profil-type d'aménagement en techniques végétales du Rhône à Lyon.



Le Rhône

- Carex*
- Glyceria*
- Iris*
- Juncus*
- Phalaris*
- Phragmites*
- Scirpus*
- Typha*

- Salix elaeagnos*
- Salix purpurea*
- Salix triandra*
- Salix viminalis*

- Alnus glutinosa*
- Salix alba*
- Salix aurita*
- Salix cinerea*
- Salix elaeagnos*
- Salix fragilis*
- Salix purpurea*
- Salix triandra*
- Salix viminalis*

- Acer pseudoplatanus*
- Alnus incana*
- Cornus sanguinea*
- (*Craetagus monogyna*)
- Evonymus europaeus*
- Fraxinus excelsior*
- Hippophaë rhamnoides*
- Juglans regia*
- Ligustrum vulgare*
- Ulmus minor*
- Salix alba*
- Salix fragilis*
- Sambucus nigra*
- Viburnum lantana*
- Viburnum opulus*

Q<sub>100</sub> 167,85

Q<sub>10</sub> 166,55

Q<sub>2</sub> 165,35

Q<sub>1</sub> 164,10

Semi-permanent 162,55

Etiage 162,15

(profil 6.2)

Zone d'hélophytes

Plantation en mottes et rhizomes  
- 2 pcs/m<sup>2</sup>

Tapis de branches à rejets

- 20 pcs/m<sup>2</sup>  
(recouvert de - 5cm de terre végétale)

Zone de boutures

- 4-5 pcs/m<sup>2</sup>

Zone de plants enracinés

Buissons h = ≥ 0,60 m (zones dense 3-5 pces/m<sup>2</sup> clairsemée 1 pce/m<sup>2</sup>)  
Arbustes h = 0,60 à 1,00 m  
Arbres h = 2,00 à 3,00 m

Merlons et structures transversales en pied de berge.

Figure 23 a-b.  
Le Rhône à Lyon.  
Illustration des travaux  
envisagés pour protéger  
la berge  
(Photos : B. Lachat,  
Silène-Biotec)



a) Phase travaux  
(24.1.94) :  
Les couches de branches  
sont plaquées au sol et  
recouvertes de terre.

b) Phase travaux  
(24.1.94) :  
Protection de l'ouvrage  
en saule par un  
\*géotextile en jute,  
fixation du tout avec  
des pieux de saule et  
treillage en fil de fer.  
La zone à \*hélrophytes  
se trouve entre la  
première lignée de  
pieux et le merton.



160.00

## LE PROBLEME DE BASE

La rivière Birse est un cours d'eau du Jura suisse, affluent du Rhin.

Le tronçon étudié se situe sur la commune de Soyhières, où le \*bassin versant compte environ 580 km<sup>2</sup>. Le but de l'étude et des travaux qui ont suivis, avaient pour objet le détournement du cours d'eau sur une longueur égale à 840 m afin d'obtenir les avantages suivants :

- éloignement de la route importante Bâle-Bienne par rapport au village de Soyhières, la circulation étant dense, le tracé étroit et sinueux, sans compter l'absence de trottoir ;
- suppression d'un passage à niveau de chemin de fer à l'ouest du village de Soyhières, fermé 6 heures par jour.

Les missions confiées ont été de deux types :

- contrôler les travaux de confection du lit de manière à garantir un bon fonctionnement hydroécologique du cours d'eau ;
- élaborer un projet de végétalisation des berges dans les parties où les techniques de stabilisation pouvaient porter sur le génie biologique.

Les débits caractéristiques suivants ont été admis pour l'élaboration du projet :

$Q_{\text{étiage}}$	=	3 m <sup>3</sup> /s
$Q_{10}$	=	160 m <sup>3</sup> /s
$Q_{50}$	=	230 m <sup>3</sup> /s
$Q_{100}$	=	270 m <sup>3</sup> /s
$Q_{1000}$	=	350 m <sup>3</sup> /s.

Des enregistrements limnographiques sur une période de 920 jours ont été effectués par le Service hydraulique national, avant le début des travaux, afin de compléter ces données :

- basses eaux : 156 jours (17 % de la période)
- $Q \leq 4.6$  m<sup>3</sup>/s : 118 jours (13 %)
- $Q \leq 3.0$  m<sup>3</sup>/s : 38 jours (4 %)
- Minimum 4.4.84 : 2.4 m<sup>3</sup>/s
- Maximum 25.7.82 : 161 m<sup>3</sup>/s  
25.5.83 : 198 m<sup>3</sup>/s

Afin de calquer au mieux le nouveau tracé de la rivière dans son environnement, une carte synthétique du lit et des berges de l'ancien tracé a été élaborée. Y sont reportées les alternances principales du lit, la diversité des écoulements, la configuration des berges ainsi que la composition floristique des espèces ligneuses et herbacées. Des inventaires faunistiques ont également été pratiqués.

En ce qui concerne la géologie du nouveau tracé, outre des sondages et la pose de \*pénétrromètres, les couches mises à nu lors du creusage du nouveau lit ont été analysées et laissaient entrevoir un ancien méandre dans lequel des bois flottés ont été analysés au C<sup>14</sup>. Les plus vieux échantillons ont montré des âges de 5240 ± 40 et 3360 ± 60. La Birse coulait jadis dans les parages du nouveau lit choisi mais avec un tracé sans doute différent. La partie en amont du nouveau tracé est supportée par des couches calcaires (\*Dogger) alors que la majeure partie, en aval, traverse des marnes oxfordiennes.

## LA SOLUTION PROPOSEE

La figure 24 (situation) illustre l'ancien ainsi que le nouveau lit de la Birse lié aux aménagements routier et ferroviaire.

La pente rapportée au nouveau tracé est de 3 ‰.

La nouvelle voie de chemin de fer a été dimensionnée pour une vitesse de base de 125 km/h et la nouvelle route lui est parallèle. Par conséquent, le nouveau lit de la Birse, influencé par la nécessité d'éviter les constructions routières et ferroviaires, présente une courbure très accentuée au début de la correction ( $R = 50$ ). Ensuite, le tracé suit la colline sous le château de Soyhières, volontairement relativement sinueux. La correction peut être schématisée de la manière suivante :

- partie en amont : 420 m corrigés en technologie dure et combinée ;
  - partie en aval : 420 m aménagés en technologie végétale et combinée.
- Les marnes oxfordiennes

du lit ont été recouvertes de gravier et de galets avec les matériaux de l'ancien lit.

### PARTIE EN AMONT

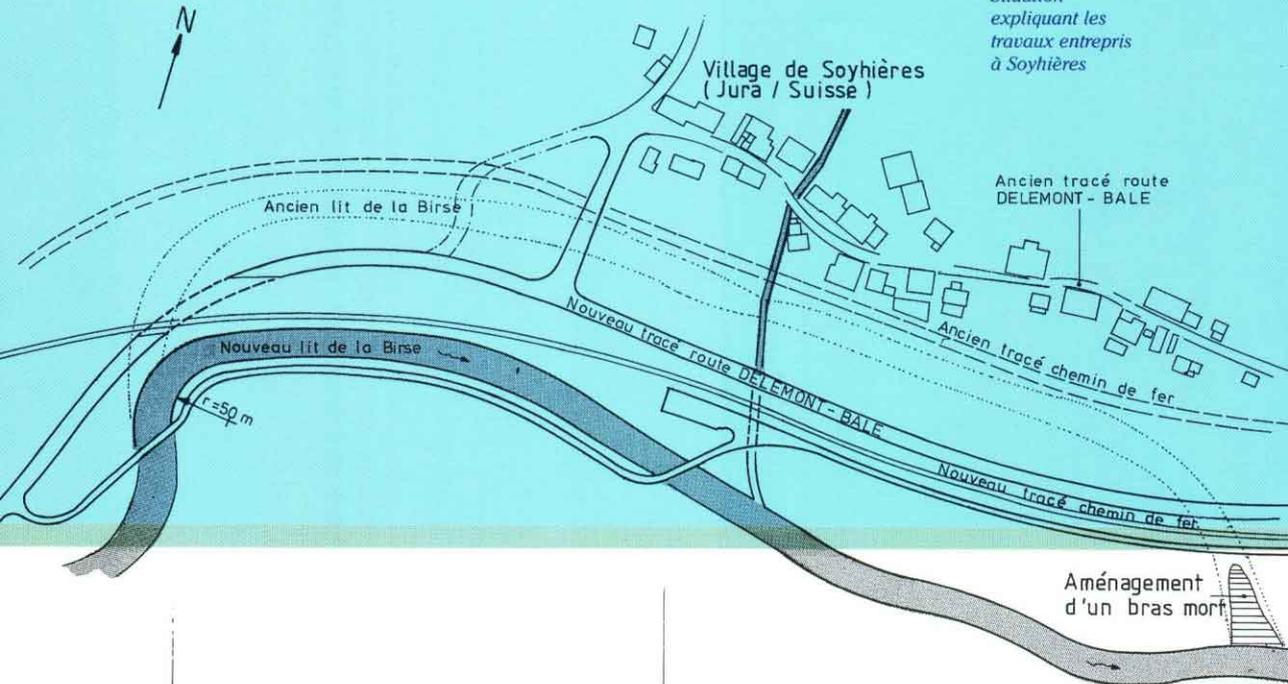
#### Rive gauche :

- en amont du premier pont, une zone d'inondation abritant principalement des plantes \*hélrophytes a été créée ;
- le mur de soutènement des chemins de fer, réalisé en béton, a vu l'incorporation de nichoirs à martin-pêcheur, espèce d'oiseau en forte diminution dans la région ;
- au pied du mur, des blocs de pierre ont été disposés afin de ménager des caches à poissons (truites principalement) et, entre les blocs, des boutures de saule ont été mises en place.

#### Rive droite :

- le perré exigé par les ingénieurs civils ne laissait qu'une maigre place aux végétaux, de sorte que seules de longues boutures de saule ont pu être mises en place à travers les interstices, ainsi que des plantations d'arbres et arbustes au-dessus.

Figure 24.  
Situation  
expliquant les  
travaux entrepris  
à Soyhières



D'une manière générale, l'aménagement de la rive droite devrait cicatriser la forte coupure pratiquée dans la forêt, au pied de la colline, par la recréation d'une zone de lisière.

#### PARTIE EN AVAL

Une irrégularité maximale des berges a été recherchée :

#### Rive gauche :

- pente variant de 2/1 à 6/1 permettant l'implantation de plantes \*hélophytes comme les roseaux qui existaient sur les bords de l'ancien lit ;
- un bloc de pied de berge a été mis en place pour lester les \*géotextiles (nécessaires à la stabilisation des berges avant le développement \*racinaire des végétaux d'une part, et afin de créer un effet de serre produisant une action

immédiate sur la germination des graines et leur croissance d'autre part) ;

- le haut de berge a été planté en boutures éparses de diverses espèces de saule, accompagnées de buissons et de quelques arbres disséminés.

#### Rive droite :

- cette berge a été considérée en tant que rive forestière et comptée comme surface de compensation au défrichement ; quelques 24 espèces ligneuses ont été réparties sur la berge divisée en trois zones distinctes (A, B et C) à stratification différenciée (voir figure 25) :
- par endroit, deux blocs de pied de berge ont été exigés pour lester les \*géotextiles d'une part et soutenir un chemin et les pentes instables de la colline d'autre part.

#### Buissons

*Cornus sanguinea*  
*Corylus avellana*  
*Crataegus monogyna*  
*Crataegus oxyacantha*  
*Evonymus europaeus*  
*Ligustrum vulgare*  
*Lonicera xylosteum*  
*Sambucus nigra*  
*Viburnum opulus*

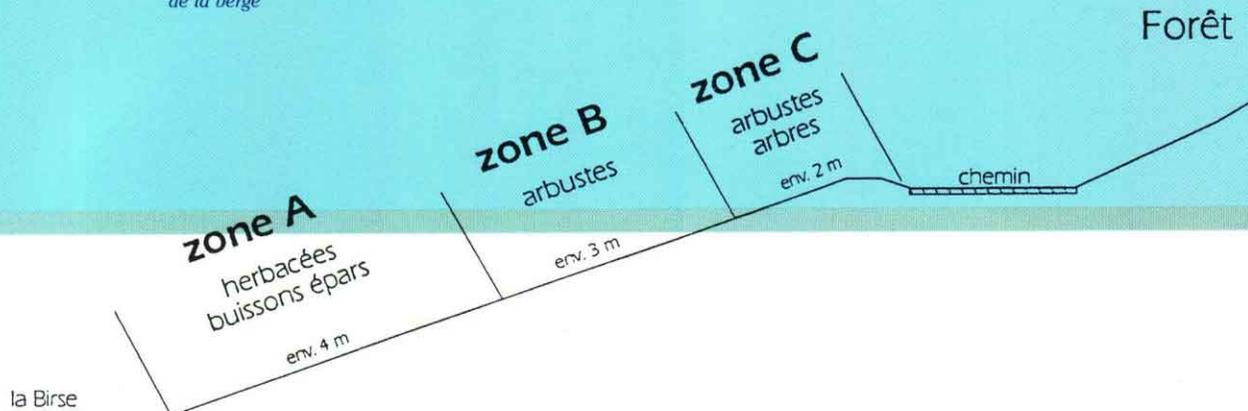
#### Arbres

*Acer campestre*  
*Tilia grandifolia*  
*Alnus glutinosa*  
*Alnus incana*  
*Carpinus betulus*  
*Acer pseudoplatanus*  
*Ulmus montana*  
*Fraxinus excelsior*  
*Prunus padus*

#### Saules

*Salix purpurea*  
*Salix triandra*  
*Salix fragilis*  
*Salix alba*  
*Salix viminalis*  
*Salix elaeagnos*

Figure 25.  
Principe général  
d'aménagement  
de la berge



Au point de confluence avec l'ancien lit, un bras mort a été gardé de manière à diversifier l'ensemble.

Compte tenu des délais imposés très courts (2 mois) pour travailler avec les végétaux et compte tenu de la saison déjà très avancée au moment où il a été possible d'utiliser les plantes, le choix de la technique s'est porté essentiellement sur l'utilisation de plantes herbacées doublées de \*géotextiles. Ceux-ci, au nombre de trois, dont un provisoire, devaient assurer les rôles (voir [21]) :

- d'armature du tapis végétal herbacé,
- de rétention du sol,
- d'effet de serre pour la germination et la croissance des végétaux,
- de protection de surface.

Les compléments de plantation pour reconstituer les séries végétales ont été effectués en 1985.

Depuis cette date, plus rien n'a été entrepris sur ce tronçon, la Nature devant

faire le reste. L'impulsion de départ a été donnée artificiellement ; au gré des compétitions \*interspécifiques et des apports de graines ou de boutures par les crues, les espèces se développent naturellement.

Bref historique des travaux réalisés :

- début 1984 : premiers terrassements ;
- du 4 au 29 septembre 1984 : ensemencements hydrauliques des berges et pose des 3 \*géotextiles ;
- 22 novembre 1984 : derniers ensemencements ;
- 23 novembre 1984 : plantations de boutures de saule ;
- 27 novembre 1984 : la Birse en crue coule pour la 1ère fois dans son nouveau lit ;
- avril 1985 : plantations d'\*hélrophytes et de ligneux ;
- fin avril 1985 : enlèvement total du \*géotextile provisoire ;
- mai 1985 : crue supérieure à  $Q_{10}$ .

## APPRECIATION

A l'heure actuelle et déjà quelques années après les travaux, on ne distingue plus l'artificialisation du déplacement, notamment dans la partie en aval. Les végétaux ont joué pleinement leur rôle protecteur contre l'érosion et l'implantation de la végétation a contribué à redonner au cours d'eau un élément

indispensable : la \*ripisylve. Les fonctions biologiques et écologiques des berges sont retrouvées et l'aspect paysager est loin d'être monotone et stérile. Ne plus voir qu'il y a eu intervention constitue un des critères de réussite du génie biologique. La figure 26 illustre l'évolution de l'ouvrage.

Figure 26 a-c.  
Evolution de  
l'aménagement  
de la Birse à  
Soyhières  
(Photos :  
B. Lachat,  
Silène-Biotec)



a) Phase de creusage du nouveau lit  
(1.6.84)



b) Technique végétale de protection de la  
berge utilisant 3 types de \*géotextiles  
différents pour pallier aux contraintes de  
saisons et de délais de réalisation des  
travaux (13.9.84)

c) Détail de l'utilisation des 3 \*géotextiles  
(24.8.84)



Figure 26 d-f.  
Evolution de  
l'aménagement  
de la Birse à  
Soyhières  
(Photos :  
B. Lachat,  
Silène-Biotec)



d) La protection a été conçue et basée sur l'utilisation de \*graminées à action immédiate. Les berges ont très vite été couvertes et le \*géotextile provisoire a été enlevé. Les plantations sont réalisées.  
(13.5.85, après une crue)



e) Les espèces ligneuses ont participé ultérieurement à la stabilisation générale. Avec une variabilité du tracé, des berges et des structures végétales, la rivière offre un aspect naturel et des fonctions biologiques réelles déjà quelques années après les travaux.  
(19.6.88)

f) Huit ans après l'aménagement, on ne voit plus qu'il y a eu une intervention. Les crues ont apporté des branches de saule qui ont pu enrichir naturellement la \*ripisylve et les séries végétales se modèlent au gré des crues et des dépôts.  
(17.6.93)



a) Avant les travaux (11.4.84) :  
Berge sapée et arbre basculé



Figure 27 a-b.  
La Sorne à  
Courfaivre.  
Illustration de la  
technique du  
peigne  
(Photos : B. Lachat,  
Silène-Biotec)

b) Mise en place des branches et  
des pieux dans la niche d'érosion  
(2.4.85)



*Figure 27 c-d.  
La Sorne à  
Courfaivre.  
Illustration de la  
technique du  
peigne  
(Photos : B. Lachat,  
Silène-Biotec)*

*c) Crue de la Sorne (8.5.85) ;  
"Filtration" et piégeage dans le  
peigne des éléments en suspension  
dans l'eau*



*d) Six ans après, la berge est  
stable, l'érosion est enrayée  
(4.6.91).*



Figure 28 a-c.  
La Sorne à  
Courfaivre.  
Illustration d'un  
ouvrage ancien.  
(Photos : B. Lachat,  
Silène-Biotec)



a) Méandre érodé et préparé  
en vue de la pose d'un  
\*géotextile (23.4.82).



b) Ouvrage de pied en saule et  
reconstitution de la berge suivi d'un  
ensemencement avec un mélange  
grainier adapté.  
(20.5.82)

c) Evolution de  
l'ouvrage deux ans  
après (27.5.84).



Figure 28 d-e.  
La Sorne à  
Courfaivre.  
Illustration d'un  
ouvrage ancien  
(Photos : B. Lachat,  
Silène-Biotec)

d) Le développement de la  
végétation et le \*géotextile ancré  
par les racines assurent le  
maintien de la berge en conditions  
difficiles.  
(6.5.86)

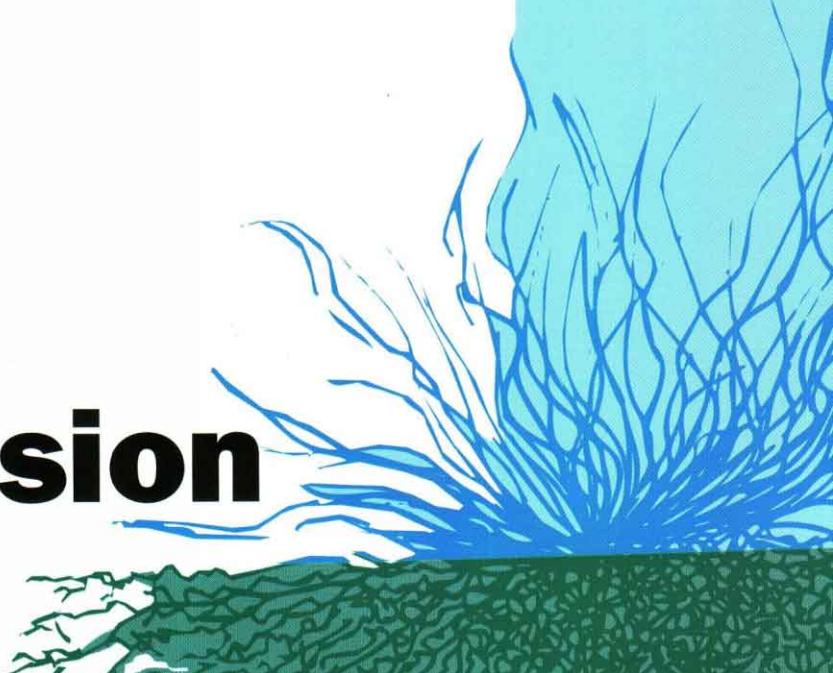


e) En 1988, les saules ont été coupés  
pour alimenter en matériel vivant  
d'autres ouvrages.  
Les rejets produits sont vigoureux et la  
berge procure des refuges pour la faune.  
On distingue un nid dans les branches.  
(18.3.93)

La Sorne a subi des crues importantes en  
juillet 1982, mai 1983, mai 1985, mars  
1988, février 1990, décembre 1991.



**conclusion**



Si le guide a pour but de procurer une démarche et de nouvelles notions sur le \*génie végétal, il n'a pas la prétention de donner une solution à tous les problèmes. Il paraît donc essentiel de préciser, en conclusion, que ce guide doit être utilisé de manière intelligente et réfléchie. L'utilisation de ces techniques (et d'autres) doit se faire progressivement dans l'espace et le temps :

- pour éviter des erreurs graves ;
- pour limiter le risque d'homogénéisation des berges par l'utilisation systématique d'un procédé ;
- pour comprendre les réactions réciproques du cours d'eau et de l'ouvrage.

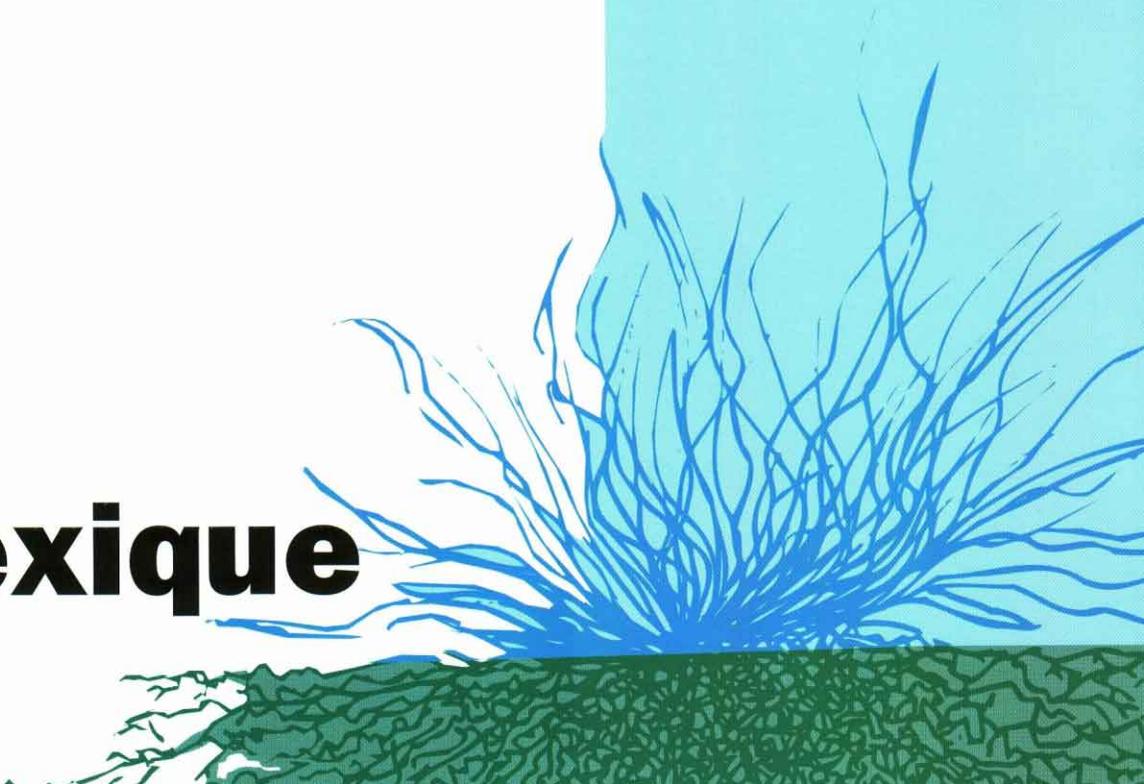
S'accorder les moyens d'essayer sur de petits tronçons constitue aussi un gage de succès futur si l'analyse d'un échec toujours possible est objective. Beaucoup d'essais farfelus ont vu le jour ici et là, sciemment ou inconsciemment réalisés, qui

auraient pu discréditer les techniques végétales. Un échec ne veut pas dire qu'il faut délaisser les techniques végétales, sinon beaucoup d'autres techniques habituelles du génie civil auraient souvent aussi été abandonnées ! Avec les végétaux il faut de la patience, il faut bien doser les différents facteurs et le résultat, même s'il se fait un peu attendre, finit toujours par réjouir son créateur. Car c'est cela aussi les techniques végétales : de la création qui évolue, en répondant de mieux en mieux à ses objectifs.

Il ne faut toutefois pas oublier que les interventions, même celles réalisées en génie végétal, ne doivent pas se généraliser à la moindre érosion constatée. Si les enjeux économiques essentiels ne justifient pas la protection de terrains riverains ou d'ouvrages, ne pas intervenir, afin de laisser le cours d'eau trouver son équilibre dynamique propre, constitue aussi une solution envisageable.



**lexique**



**Abiotique** qui n'a pas trait à la vie. Désigne un \*facteur écologique, un phénomène ou un processus de nature physico-chimique donc indépendant des êtres vivants et non contrôlé par des paramètres biologiques.

**Actinomycètes** organismes unicellulaires dépourvus de noyau (bactéries p. ex.). Certains genres sont capables de synthétiser les nitrates ( $\text{NO}_3$ ) à partir de l'azote atmosphérique (pris dans l'air). Ils vivent en symbiose avec les végétaux au niveau des racines où ils constituent des \*nodosités.

**Acuminé** se terminant en pointe allongée et effilée.

**Affouillement** effondrement de berge ou de talus produit par érosion sous-jacente.

**Anthropique** dû à l'action directe ou indirecte de l'homme (p. ex. défrichement, plantations, drainage, etc.).

**Appétence (= appétabilité)** l'\*appétence d'une plante dépend de l'intensité avec laquelle l'animal la consomme.

**Aquifère** voir \*nappe phréatique.

**Association végétale** \*communauté végétale type reconnue et caractérisée par sa composition floristique relativement constante et principalement par ses espèces caractéristiques (voir \*phytosociologie, \*phytocénose).

**Atterrissement** amas de terres, de sables, de graviers, de galets apportés par les eaux.

**Bassin versant** aire considérée à partir de l'exutoire, limitée par le contour à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux précipitées qui s'écoulent en surface et en souterrain vers la sortie.

**Biocénose (ou biocœnose)** constituée par la totalité des organismes vivants qui occupent un \*écosystème donné. Ce terme remplace souvent celui de "peuplement" ou de "\*communauté". La \*biocénose qui évolue et se modifie dans le temps est composée de trois groupes d'organismes :

- les \*producteurs (ou végétaux chlorophylliens, autotrophes) ;
- les \*consommateurs (ou animaux) ;
- les \*décomposeurs (ou micro-organismes hétérotrophes et champignons).

**Biotique** qui est propre à la vie. Les facteurs \*biotiques représentent l'ensemble des \*facteurs écologiques liés aux organismes vivants qu'il s'agisse d'action sur le milieu (\*abiotique) ou sur les autres organismes.

**Biotope** composante non vivante (\*abiotique) de l'\*écosystème constituée uniquement par ses dimensions physico-chimiques et spatiales. Il correspond, en \*écologie végétale, à la notion de station.

**Cinquantennale** terme désignant la périodicité de retour d'une crue de cinquante ans, notée  $Q_{50}$  ; identique pour quinquennale, décennale, trentennale, centennale, etc.

**Communauté** ensemble d'individus appartenant à plusieurs espèces, vivant à un endroit donné, à un moment donné. Identique à la \*biocénose.

**Consommateurs** ensemble des animaux qui se nourrissent de végétaux ou d'animaux.

**Cultivar** terme désignant une variété de plante cultivée.

**Décomposeurs** ensemble des organismes qui dégradent la matière organique morte et libèrent les éléments minéraux. Essentiellement des micro-organismes (= bioréducteur).

**Dégrappage** action d'enlever la couche superficielle d'un sol.

**Désoxygénant** qui enlève tout ou partie de l'oxygène contenu dans une substance.

**Dicotylédones** végétaux dont l'embryon est pourvu de 2 cotylédons et les feuilles sont à nervures non parallèles au pétiole.

**Dagger** couche géologique située dans la partie moyenne du système jurassique.

**Dragoon** rejet ou pousse qui naît sur la racine d'une plante vivace.

**Ecologie** science qui étudie les relations réciproques des êtres vivants entre eux et avec leur milieu.

**Ecosystème** unité fonctionnelle de base en \*écologie comprenant le \*biotope et la \*biocénose associée.

**Ecotone** zone de transition entre deux \*communautés biologiques et donc entre deux milieux. Les \*écotones sont toujours plus riches biologiquement que les \*biocénoses de contact.

**Edaphique** qui concerne le sol. Les facteurs \*édaphiques sont des \*facteurs physico-chimiques et \*biotiques qui caractérisent les sols.

**Enzymatique** qui concerne les enzymes. Une enzyme est une substance protéinique qui facilite ou accroît une réaction biochimique et joue un rôle important dans les processus physiologiques de tous les organismes vivants.

**Evapotranspiration** phénomène d'évaporation de l'eau par les végétaux (transpiration) et les sols.

**Facteur écologique** désigne tout paramètre physico-chimique ou biologique propre au milieu.

**Facteur physico-chimique** qui relève à la fois de la physique et de la chimie, donc n'est pas vivant.

**Gabion** panier en grillage métallique dans lequel on entasse des cailloux pour former des murs.

**Génie végétal** ensemble des connaissances et des techniques concernant la conception, la mise en oeuvre et les applications dans l'utilisation des plantes pour protéger les sols contre l'érosion et pour stabiliser des berges et des talus. Appelé aussi génie biologique.

**Géotextile** produit ou article textile, en fibres naturelles ou artificielles, utilisé en construction.

**Glabre** dépourvu de poils.

**Graminées** famille très importante de plantes herbacées.

**Héliophyte** plante adaptée aux \*biotopes marécageux. C'est aussi une plante aquatique (ou semi-aquatique) pérenne dont les formes de durée sont constituées par des \*rhizomes enfouis au-dessous du niveau d'eau (ne pas confondre avec :  
 • héliophyte : espèce végétale exigeant un fort ensoleillement pour vivre  
 • halophyte : végétal adapté à un milieu sursalé.

**Hydromorphe** à caractéristique humide très prononcée ; trahissant visuellement l'état de saturation en eau d'un sol.

**Hydrophyte** plante se développant uniquement en pleine eau.

**Hydrosoluble** soluble dans l'eau.

**Hygrophile** inféodé à des \*biotopes caractérisés par une très forte humidité.

**Interaction** actions réciproques entre deux \*facteurs écologiques, entre deux espèces ou entre un facteur et un organisme.

**Interspécifique** relatif aux rapports entre espèces.

**Karstique** vient de karst, formation calcaire avec de vastes systèmes de circulation d'eau souterraine provoquée par la dissolution du calcaire.

**Lit majeur** lit maximum qu'occupent les eaux d'un cours d'eau en période de très hautes eaux.

**Lit mineur** lit qu'occupent les eaux d'un cours d'eau en débit de plein bord, c'est-à-dire jusqu'en sommet de berge.

**Lône** site d'eau stagnante, souvent en forme de croissant, produit par des divagations, par l'oblitération de certains méandres ou par l'abandon de tronçons par le lit principal. Terme fréquemment utilisé dans la vallée du Rhône.

**Maladie cryptogamique** affection des plantes (cultivées) provoquée par des champignons.

**Marcotte** tige induite à produire des racines alors qu'elle est encore rattachée à la plante-mère. L'action est le \*marcottage.

**Mégaphorbiaie** groupement de hautes herbes.

**Microbiologique** relatif aux disciplines biologiques qui s'occupent des organismes microscopiques.

**Morphodynamique** qui a une action permanente ou périodique, régulière ou irrégulière, dans le façonnement des aspects physiques (forme, structure, etc.)

**Mulch** couche de protection pour les graines et les jeunes pousses faite d'éléments végétaux secs ou morts (paille, natte, feuilles mortes, etc.).

**Nappe phréatique** formation hydrogéologique d'eau souterraine (= \*aquifère).

**Nodosité** hypertrophie des tissus de zone \*racinaire chez divers végétaux, se produisant sous l'action de bactéries symbiotiques.

**Novue** terre grasse et humide cultivée en plaine ou pâturage, périodiquement inondée. Bras naturel ou artificiel d'une rivière demeurant en communication avec elle par l'aval.

**Pédologie** science qui a pour objet l'étude de la génèse, de l'évolution, de la structure et de la répartition des sols.

**Pénétromètre** instrument permettant de mesurer par pénétration la résistance et la dureté d'un sol.

**Permittivité**  $\frac{Kn}{e}$

Kn = perméabilité à l'eau normale au plan du géotextile (coefficient de Darcy).

e = épaisseur du géotextile. C'est l'aptitude d'un géotextile à laisser percoler l'eau. C'est aussi la quantité d'eau traversant un géotextile par unité de temps, par unité de surface et par unité de charge.

**Phasage** action de mener de façon différenciée et étagée dans le temps des travaux précis et non inversibles.

**Phénolique** de phénol. Corps composé soluble dans l'eau, obtenu par synthèse ou produit par les plantes, pouvant être doué de forte toxicité pour les organismes aquatiques.

**Phytocénose** \*communauté végétale d'une \*biocénose.

**Phytosociologie** science qui étudie la structure, la systématique, la synécologie, la dynamique, la chorologie des groupements végétaux.

**Pionnier, pionnière** organisme capable de s'installer sur un sol dénudé et très pauvre.

**Plançon** appelé aussi plantard, est une branche de saule utilisée comme bouture.

**Pool** autre terme pour une mouille, partie la plus profonde d'un tronçon de cours d'eau, formant un creux.

**Producteurs** \*producteurs primaires : végétaux à capacité photosynthétique produisant de la matière organique, augmentant la biomasse et servant de nourriture aux \*consommateurs ; \*producteurs secondaires : ensemble des organismes non photosynthétiques, essentiellement des animaux produisant une biomasse à partir des végétaux.

**Pruine** fine pellicule cireuse à la surface de certains rameaux ou fruits (prunes).

**Racinaire** désigne ce qui est propre aux racines des végétaux.

**Ragondin** (*Myocastor coypus*) espèce originaire d'Amérique du sud, introduite en Europe méridionale et qui pullule actuellement dans les zones humides de la plus grande partie de la France, à l'exception de la Corse et des Massifs montagneux. Des individus sont régulièrement signalés çà et là plus au nord.

**Rat musqué** (*Ondatra zibethica*) appelé également ondatre, c'est une espèce de rongeur originaire d'Amérique du nord. Introduite en Europe dans des élevages pour sa fourrure, il colonise maintenant le nord et l'est de l'Europe et est présent dans toute la France, à l'exception de quelques départements méditerranéens et de la Corse. Il est présent en cours d'eau, en étang, au bord des lacs. Il creuse des terriers dans les berges et les digues

pouvant provoquer d'énormes dégâts.

**Résineux** synonyme de conifère, opposé à feuillu.

**Reverdissement** action de mettre de la verdure, c'est-à-dire des végétaux capables de coloniser un substrat neuf ou nu.

**Rhizome** organe végétal souterrain qui constitue une forme de réserve et par lequel les plantes peuvent se multiplier de manière asexuée.

**Ripisylve** désigne les formations végétales qui croissent le long des cours d'eau.

**Rivulaire** qui vit dans les eaux courantes ou sur leurs berges.

**Squameux** écailleux. Caractérise l'écorce de certains saules qui se détache par plaques.

**Stipule** appendice foliacé placé à la base des feuilles.

**Stolon** tige aérienne ou souterraine rampante qui produit des racines adventives, point de départ

d'un nouveau pied (ex. fraisier).

**Subspontané** échappé de la culture et se comportant presque comme une plante sauvage.

**Taller** donner naissance à une ou plusieurs pousses issues de la partie souterraine ou du collet des racines chez les \*graminées.

**Talutage** action de donner un fruit accentué en parlant d'un talus ou d'une berge, ou d'aplanir leur surface.

**Thermophile** ayant une affinité pour les milieux chauds.

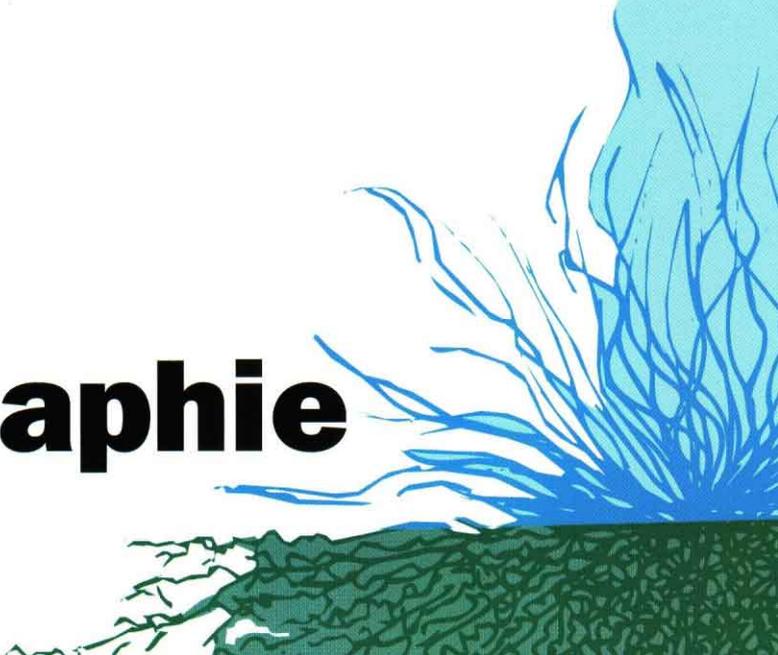
**Tomenteux** pourvu de poils contonneux mous, très serrés, entrecroisés et très souvent étoilés (tomentum) à la façon d'un feutre.

**Végétaliser** action de mettre en place des végétaux herbacés ou ligneux dans le but de reverdir des talus ou des berges, la plupart du temps pour leur protection contre l'érosion.

**Xérothermophile** ayant des affinités pour des milieux arides et chauds.

D'autres définitions peuvent être trouvées dans [24].

# **bibliographie**



- [1] DEMONTZEY, P. 1878. *Etude sur les travaux de reboisement et de gazonnement des montagnes*. Paris. Imprimerie nationale.
- [2] DEMONTZEY, P. 1894. *L'extinction des torrents en France par le reboisement*. Paris. Imprimerie nationale.
- [3] THIERY, E. 1891. *Restauration des montagnes, Correction des torrents. Reboisement*. Baudry et Cie. éd. Paris.
- [4] AGENCE DE L'EAU - RHIN-MEUSE. 1993. *Entretien des rivières*. Fiches techniques.
- [5] LACHAT, B. 1991. *Le cours d'eau - Conservation, entretien et aménagement*. Série aménagement et gestion n° 2. Conseil de l'Europe. Strasbourg. 84 p.
- [6] KUTSCHERA, L. et LICHTENEGGER, E. 1982. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band I : Monocotyledonaeae*. G. Fischer Verlag. Stuttgart. New York.
- [7] ZEH, H. 1990. *Grenzen der Ingenieurbiologie*. In Grundsätze und Beispiele der Ingenieurbiologie. Vortragstagung 7.12.90. pp 33-37.
- [8] LACHAT, B. 1991. *Hydroécologie et génie biologique - les fondements de l'aménagement des cours d'eau*. SIA Ingénieurs et architectes suisses N° 24. p. 503-510.
- [9] BEGEMAN, W. et SCHIECHTL, H. M. 1986. *Ingenieurbiologie*. Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau. Bauverlag. Wiesbaden und Berlin. 261 p.
- [10] RAMEAU, J.C., MANSION, D., DUME, G., TIMBAL, J., LECOINTE, A., DUPONT, P. et KELLER, R. 1989. *Flore forestière française. Guide écologique illustré. Tome 1: plaines et collines*. Institut pour le développement Forestier. 1785 p.
- [11] VOSER-HUBER, M.L. 1992. *Verges d'or - Problèmes dans les réserves naturelles*. Cahier de l'environnement N° 167. Nature et paysage. 22 p.
- [12] LENCASTRE, A. 1979. *Manuel d'hydraulique générale*. Ed. Eyrolles. Paris. 411 p.
- [13] NATIONS UNIES, COMMISSION ECONOMIQUE POUR L'ASIE ET L'EXTREME ORIENT. 1954. *Régularisation du lit et protection des berges*. Nations Unies. New York. 86 p.
- [14] DETHIOUX, M. 1987. *Aménagement biologique des cours d'eau*. Ministère de la Région Wallonne. 72 p.
- [15] SCHIECHTL, H. M. 1973. *Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Grundlagen Lebende Baustoffe Methoden*. Verlag Goerg. D. W. Callwey, München. 244 p.
- [16] ZEH, H., ROTH, H., MOSIMANN, R., SCHENKER, J., LACHAT, B. et DURLER, R. 1990. *Mesures de génie biologique dans l'aménagement des rives*. Méthodes et exemples dans le canton de Berne. Direction des travaux publics du canton de Berne - Office des ponts et chaussées. 44 p.
- [17] LEWIS, G. et WILLIAMS, G. 1984. *Rivers and wildlife*. Handbook : a guide to practices which further the conservation of wildlife on rivers. RSPB, RSNC. 296 p.
- [18] ZUFFI, D. 1989. *Cours sur la stabilisation végétale des talus*. Service des Forêts Fribourg. 49 p.
- [19] LACHAT, B. 1989. *Cours sur la stabilisation végétale des cours d'eau*. Service des Forêts Fribourg. 47 p.
- [20] SCHIECHTL, H. M. et STERN R. 1992. *Handbuch für naturnahen Erdbau*. Österreichischer Agrarverlag. 153 p.
- [21] LACHAT, B. 1986. *Ingenieurbiologie : Wachstumbeschleunigung durch Anwendung von Geotextilien. Biotechnologie : Accélération de la croissance végétale avec des géotextiles*. Der Gartenbau. 25/1986. pp 1150-1152.
- [22] BOURRIER, R. 1985. *Les réseaux d'assainissement*. Calculs, applications, perspectives. 2ème éd. Technique et documentation Lavoisier. Paris. 482 p.

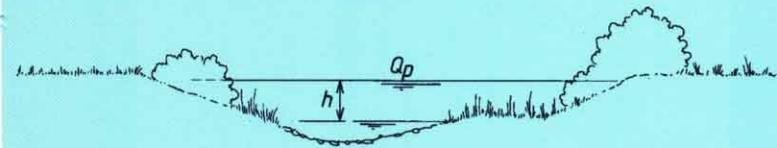
- [23] VEN TE CHOW, 1959. *Open-channel hydraulics*. Mc Graw-Hill ed. New York. 680 p.
- [24] RAMADE, F. 1993. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des Sciences de l'Environnement*. Ediscience. 882 p.
- [25] WURTZ, A. 1955. *Action des feuilles de peupliers dans les petits bassins de pisciculture*. Bull. Fr. Piscic. pp 179-184.
- [26] TREMOLIERES, M. et CARBINER, R. 1985. *Quelques aspects des interactions entre litières forestières et écosystèmes aquatiques ou terrestres*. Rev. Ecol. (La Terre et la Vie). Vol. 40. pp 435-450.
- [27] GEISSERT, F. 1989. *Arbres et arbustes de Strasbourg à Lauterbourg. Tous nos saules*. F. Geissert. Sessenheim. 116 p.
- [28] LAUTENSCHLAGER, E. 1989. *Die Weiden der Schweiz und angrenzender Gebiete*. Birkhäuser. Basel 136 p.
- [29] SCHIECHTL, H. M. 1992. *Weiden in der Praxis*. Patzer Verlag. Berlin-Hannover. 130 p.
- [30] WEBER, B. 1978. *Contribution à l'étude morphologique des feuilles de Salix L. Ber. Schweiz. Bot. Ges.* 88 (1/2). pp 72-119.
- [31] COMITE FRANCAIS DES GEOTEXTILES ET DES GEOMEMBRANES. 1984. *Recommandations générales pour la réception et la mise en oeuvre des géotextiles*. Normes françaises d'essais. 32 p.
- [32] COMITE FRANCAIS DES GEOTEXTILES ET DES GEOMEMBRANES. 1986. *Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration*. 23 p.

**annexes**

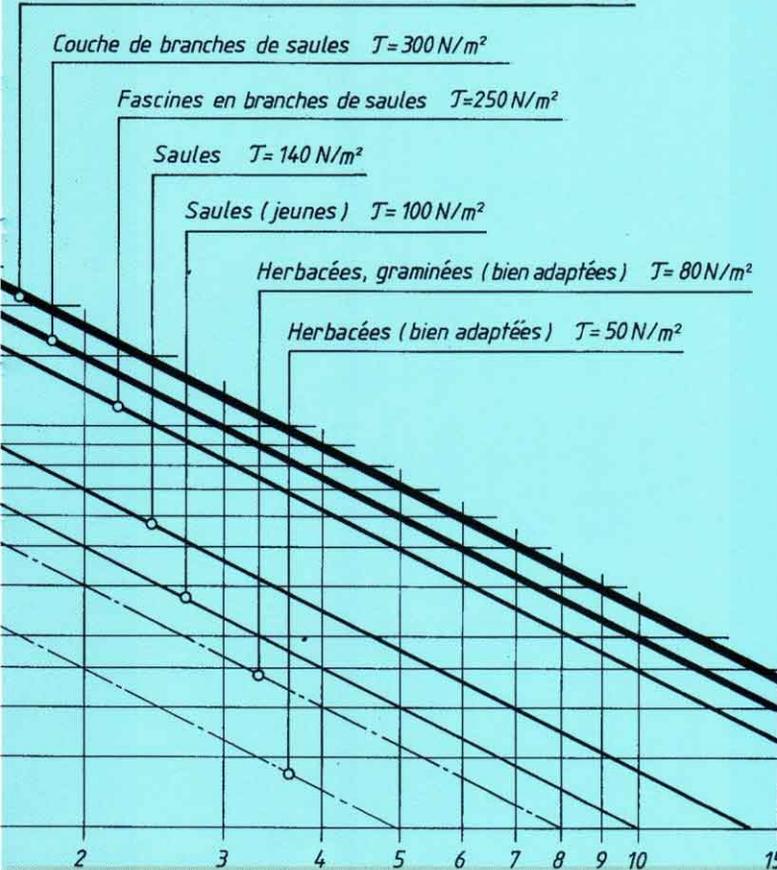




## mesures végétales sur les berges



**Enrochements et végétaux  $T=350\text{ N/m}^2$  (Zone montagne)**



## A2. DESCRIPTION ET CONNAISSANCE DES ESPÈCES NON INDIGÈNES INDÉSIRABLES SUR LES COURS D'EAU

### **Renouée du Japon** (*Reynoutria Japonica* = *Polygonum cuspidatum*) :

C'est certainement l'espèce la plus inquiétante, de par sa vitesse de propagation et son comportement extrêmement agressif. Des tiges souterraines lui permettent, à partir d'un foyer naissant, de conquérir latéralement de grandes surfaces en quelques périodes de végétation. De plus, elle se propage également par un ensemencement abondant de ses graines, dont la capacité germinative est très forte.

Très fréquente sur les cours d'eau, elle colonise également efficacement les remblais non \*végétalisés. Elle forme alors des massifs compacts, de deux à trois mètres de haut, desquels est exclue toute autre forme de végétation, même les ligneux de petite taille.

La renouée du Japon est indésirable de par la concurrence qu'elle oppose aux essences \*rivulaires indigènes, et pour la banalisation dont elle menace la végétation \*rivulaire. S'ajoute à cela, une absence d'intérêt dans la stabilisation des rives.

À l'heure actuelle, aucune étude complète n'apporte des résultats, en vue de développer des méthodes de lutte efficace. L'utilisation d'herbicide pourrait être efficace; cependant, l'emploi de substances toxiques au bord de l'eau est très dangereux.

### **Renouée de Sakhaline** (*Polygonum Sachalinense*) :

Autre espèce, proche de la Renouée du Japon, ayant à peu près les mêmes comportements.

### **Verges d'or** (*Solidago graminifolia*, *S. altissima* et *S. gigantea*) :

Si le genre *Solidago* comporte bien une espèce autochtone (*Solidago virga-aurea*), d'autres espèces, originaires d'Amérique du Nord ont été introduites comme plantes ornementales (*Solidago graminifolia* ; *Solidago altissima* ; *Solidago gigantea*). Elles se sont propagées surtout par voie végétative, par l'intermédiaire des \*rhizomes. La propagation par les graines peut également être

très efficace, mais avant tout sur des surfaces dénudées. Appartenant aux \*associations végétales de la prairie américaine, ces espèces se rencontrent chez nous sur les berges des cours d'eau, mais également sur les remblais, sur les talus ferroviaires ou routiers, sur les décharges, dans les prairies à l'abandon. Même si leur floraison tardive d'un jaune intense est spectaculaire, les verges d'or exotiques posent notamment problème dans les zones humides (prairies humides ; cariçaie ; roselières) desquelles elles chassent la flore indigène et notamment des espèces à protéger.

Des essais de lutte ont donné des résultats satisfaisants :

- le fauchage répété deux fois dans l'année (fin mai + mi-août) permet de réduire sensiblement la densité des tiges ;

- la pose d'un plastique noir imperméable aux rayons UV, après la première fauche, assèche les \*rhizomes qui se laissent alors facilement enlever en fin de période de végétation. À cette première opération doit suivre un ensemencement avec des graines de prairie de fauche. Si cette technique recueille les meilleurs résultats, elle devient difficilement applicable sur de très grandes surfaces ;

- le broyage des racines au motoculteur répété deux fois dans l'année (mi-avril et début juin) donne également de bons résultats.

### **Balsamine géante** (*Impatiens glandulifera* = *I. Roylei*) :

Originnaire de l'Himalaya, cette plante a été introduite et cultivée chez nous à des fins ornementales. Sa superbe floraison pourpre, s'étageant de juillet à octobre étant certainement à l'origine de son succès. Cette plante annuelle de un à deux mètres s'est actuellement répandue dans la nature et devient très envahissante.

Sa dispersion s'opère par la projection des graines. Espèce d'ombre ou de demi-ombre, elle affectionne les stations à forte humidité. Ainsi, forêts \*rivulaires, fossés, berges en sont souvent infestés, et les

bancs de gravier et galets ne la rebutent pas.

Si ses foyers paraissent moins hauts, denses et compacts que ceux de la renouée du Japon, elle est néanmoins très envahissante et ses peuplements généralement importants.

A notre connaissance aucune étude complète n'a été entreprise à ce jour, en vue de combattre cette espèce. A noter qu'elle possède une consœur parmi notre flore indigène, il s'agit de l'impatiante ou balsamine des bois (*Impatiens noli tangere*) qui, elle, ne pose aucun problème.

**Robinier faux acacia** (*Robinia Pseudoacacia*) :

Originaire des Etats-Unis, son introduction en France daterait du tout début du 17<sup>ème</sup> siècle. D'abord cultivé puis \*subspontané, et enfin pratiquement sauvage, il devient la mauvaise herbe des arbres. Abondamment utilisé comme arbre d'ornement ou comme essence stabilisatrice de talus, en raison de sa rusticité face à des conditions édaphiques défavorables, cet espèce s'est propagée naturellement, et entre autre sur les berges des cours d'eau, où il trouve d'excellentes conditions de croissance. Le robinier se développe par \*marcottage naturel et des \*drageons poussent souvent très distants de la plante mère. Grâce à une abondante production de graines à haut pouvoir germinatif, il se propage aussi par semis. Sa croissance est rapide et exubérante pendant une trentaine d'année, mais son espérance de vie peut atteindre deux siècles. Les peuplements de robiniers sont rapidement impénétrables, surtout lorsqu'ils sont traités en taillis. La densité du couvert mène rapidement à la disparition de toutes les autres espèces, ligneuses ou herbacées. La limitation de cette espèce peut s'opérer par des coupes régulièrement répétées qui affaiblissent la vigueur des souches, mais ce procédé ne l'élimine pas. Donc, lorsqu'un peuplement important est installé, il est impossible de

l'éliminer sans causer d'importants bouleversements au milieu. Si une coupe rase est entreprise, suivie d'un dessouchage, cela doit être accompagné d'une plantation d'arbres indigènes, capables de concurrencer des rejets éventuels de racines ou souches restées en place.

**\*Cultivars de peupliers**

(*Populus sp.*) :

Originaire des bords de la Méditerranée, le peuplier noir (*Populus nigra*), qui est certainement le peuplier spontané le plus répandu en Europe, a atteint à l'aide de l'homme les pays scandinaves. Sous nos latitudes, il est difficile de savoir si sa répartition est imputable à la seule influence \*anthropique ou à une progression naturelle. Une chose est certaine, la populiculture l'a fortement avantagé. Le peuplier noir (*Populus nigra*) forme des peupleraies naturelles et figure souvent en compagnie du Saule blanc (*Salix alba*), comme composant d'\*associations végétales \*rivulaires typiques, généralement lié à un substrat grossier. Mais il existe de nombreux peupliers hybrides et cultivés, de même que des espèces américaines pures (p. ex. *Populus deltoides*, *Populus trichocarpa*, etc.). Les \*cultivars peuvent avoir pour origine un peuplier indigène, à l'exemple du peuplier d'Italie (*Populus nigra* var. *italica*), utilisé comme plante ornementale en raison de sa silhouette fuselée typique et qui est un \*cultivar de *Populus nigra*. Mais de nombreux \*cultivars sont des hybrides, et souvent d'espèces non indigènes. De manière générale, les \*cultivars n'ont pas leur place dans les forêts riveraines. Leur port très élevé entraîne souvent un masquage et une fermeture du paysage. De plus, avec le vent, un effet de bras de levier est produit sur les racines beaucoup trop superficielles pour une protection des berges qui provoque un déchaussement de l'arbre et une déstabilisation de la berge où l'eau peut commencer à produire ses actions érosives. Les peupliers étouffent aussi,

souvent, la végétation indigène (étiolement et mort), notamment les aulnes et les frênes, et libèrent des substances qui inhibent leur croissance. La toxicité des feuilles de peupliers est bien connue d'un point de vue piscicole [25].

Selon [26], le peuplier noir s'avère être l'espèce la plus dangereuse pour la vie aquatique à cause d'un pouvoir \*désoxygénant \*enzymatique élevé et un contenu \*phénolique important. Les feuilles d'automne, très denses, s'enfoncent rapidement dans l'eau, libérant de grandes quantités de ces substances \*hydrosolubles.

Le peuplier, de par sa physiologie, produit au cours de sa croissance rapide beaucoup de bois mort sous forme de branches sèches qui se détachent à tout moment. Cet arbre, incontestablement, est le plus gros producteur d'embâcles en cours d'eau. Sa forte prolifération en fait aussi une espèce redoutable dans l'appauvrissement de notre végétation indigène et la perte de diversité floristique. Les peupleraies pures, la plupart du temps dépourvues de sous-bois, offrent un intérêt biologique médiocre. Pour ces raisons, ces essences capables de rejeter sont à exclure de tout aménagement de berges.

Deux autres peupliers indigènes sont encore à signaler. Il s'agit tout d'abord du peuplier blanc (*Populus alba*), dont la spontanéité est incertaine malgré tout, et qui présente une tendance méditerranéenne. Quant au tremble (*Populus tremula*), qui est généralement assez disséminé, il n'est pas inféodé aux cours d'eau au même titre que *Populus nigra*, et forme rarement des peuplements importants.

**Saule pleureur** (*Salix babylonica*) :

Bien que très connu et très populaire en raison de son port caractéristique qui lui vaut son nom, le saule pleureur n'en est pas moins une espèce exotique, originaire d'Asie centrale et de Mésopotamie. Introduit et

cultivé à des fins ornementales, il affectionne les terrains meubles, mais toujours frais et humides. On le rencontre avant tout dans les parcs et les jardins et si sa présence peut être signalée sur certaines rives, on ne peut pas vraiment le considérer comme naturalisé ou \*subspontané. A notre connaissance, il n'existe pas de cas spectaculaires de colonisation de terrains naturels par cette espèce, car sa présence a toujours une origine \*anthropique directe. Cependant, le saule pleureur qui se bouture très bien, ne doit pas être utilisé dans les techniques végétales, car son port le rend inintéressant, et la flore indigène est déjà suffisamment dénaturée par tout un cortège de plantes exotiques.

**Erable negundo** (*Acer negundo*) :

Petit arbre (15-20 m) de faible longévité, l'érable negundo est originaire d'Amérique du Nord et du Canada. Utilisé comme arbre ornemental, de nombreux \*cultivars horticoles de cette espèce ont été développés. \*Subspontané dans les forêts \*rivulaires, cet arbre qui rejette de souche affectionne les terrains légers, alluvionnaires et sableux. Il présente également un caractère héliophile marqué.

**Buddleja de David** (*Buddleja davidii*) :

Plante ligneuse buissonnante originaire de Chine, le buddleja est abondamment planté dans les jardins, comme plante ornementale. Il se caractérise surtout par ses fleurs en longs panicules compactes de 20 à 50 cm, de couleur violette, de même que par ses rameaux écartés en tous sens et ses longues feuilles lancéolées, blanches tomenteuses dessous. Cultivé au départ, le buddleja est actuellement \*subspontané. Des sols bruts et squelettiques à granulométrie grossière lui suffisent, et son installation dans des rocailles et des décombres lui prête un caractère \*xérothermophile. Le pouvoir de propagation du buddleja semble important et

on peut observer son implantation à grande échelle sur des berges ouvertes, peu \*végétalisées et à substrat brut. Son comportement présente les caractéristiques d'une plante \*pionnière. Même si ses inflorescences très nectarifères sont réputées pour l'attrait qu'elles exercent sur les papillons diurnes, cette plante est à ajouter à la longue liste des végétaux indésirables, qui envahissent les formations végétales riveraines typiques.

**Amorphe buissonnante**

(*Amorpha fruticosa*) : Cette plante arbustive de la famille des légumineuses est originaire d'Amérique du Nord et a été introduite au 18ème siècle, pour la végétalisation des parcs et des jardins. Elle se caractérise par des feuilles comportant 12 à 25 folioles oblongues, et des fleurs violettes disposées en grappes. Cultivée au départ, elle a pris le statut de plante \*subspontanée, à caractère \*thermophile et présentant également une tendance \*hygrophile.

**Ailante (*Ailanthus altissima*) :** Originaire de Chine, cet arbre dont les feuilles peuvent faire penser à un frêne et pouvant atteindre 25 m, a été introduit

en Europe au 16ème siècle. Actuellement, il est surtout utilisé pour arboriser des friches agricoles, dans le but de produire du bois de papeterie. Il présente une croissance juvénile intéressante, mais qui s'arrête relativement rapidement. Devenu \*subspontané le long des cours d'eau ou dans certaines friches, cet arbre semble cependant se cantonner dans le sud de la France, et sa propagation ne pose pas de gros problèmes en dehors de cette région. Cet arbre a la faculté de rejeter de souche et de \*drageonner.

**Conifères :**

D'une manière générale très peu de résineux poussent naturellement et de manière optimale au bord des cours d'eau de plaine. Les enrésinements constatés sur de nombreux cours d'eau nuisent à la qualité biologique des eaux et simplifient les berges du point de vue floristique et faunistique. Même les plantes herbacées n'arrivent plus à croître dans cet environnement. La stabilité des sols n'est pas assurée et le paysage, surtout lors de plantations monospécifiques denses, s'enlaidit.

# A3. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE RUGOSITE "n" et "Ks" ET FORCE TRACTRICE

## DETERMINATION DES COEFFICIENTS «n» ET «K<sub>s</sub>»

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

Pour l'ingénieur, il existe deux façons de procéder :

a) utilisation de tables qui donnent directement les valeurs de "n" ou de son inverse "Ks" en fonction de différents paramètres du cours d'eau (cf. tableau annexe A4) ;

b) utilisation et appréciation de différents paramètres conduisant à une valeur estimée du coefficient de Manning dans la formule suivante [22] :

$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) n_6$$

avec :

**n<sub>1</sub>** : caractérise le fond et les bords du lit, les valeurs généralement admises allant de 0,01 à 0,03 (roches lisses à graviers) ;

**n<sub>2</sub>** : caractérise les irrégularités du fond et des bords du lit, les valeurs généralement admises allant

de 0,0 à 0,02 (maximum = grosses irrégularités) ;

**n<sub>3</sub>** : caractérise la variation de formes et de dimensions de la section mouillée, les valeurs généralement admises allant de 0,0 à 0,02 (maximum = grandes variations de formes et dimensions) ;

**n<sub>4</sub>** : tient compte de l'obstruction de la section mouillée, les valeurs généralement admises allant de 0,0 à 0,06 (maximum = beaucoup d'embâcles) ;

**n<sub>5</sub>** : tient compte de la végétation aquatique, les valeurs généralement admises allant de 0,005 à 0,010 (maximum = beaucoup de végétation) ;

**n<sub>6</sub>** : tient compte de l'importance des méandres, les valeurs généralement admises allant de 1,0 à 1,3 (maximum = beaucoup de méandres).

### Remarque :

L'expérience de l'ingénieur joue un rôle très important dans l'estimation de ces coefficients.

## DETERMINATION DU COEFFICIENT MOYEN «K<sub>s</sub>» DANS LE CAS D'UNE SECTION COMPOSÉE

La section d'un cours d'eau est régulièrement composée de plusieurs sous-sections ayant souvent chacune une rugosité différente, c'est-à-dire un coefficient "n" ou "Ks"

différent (cf. figure ci-dessous). Le but est alors de calculer le coefficient Ks moyen devant s'appliquer au débit de projet afin d'en calculer par exemple la hauteur d'eau correspondante.

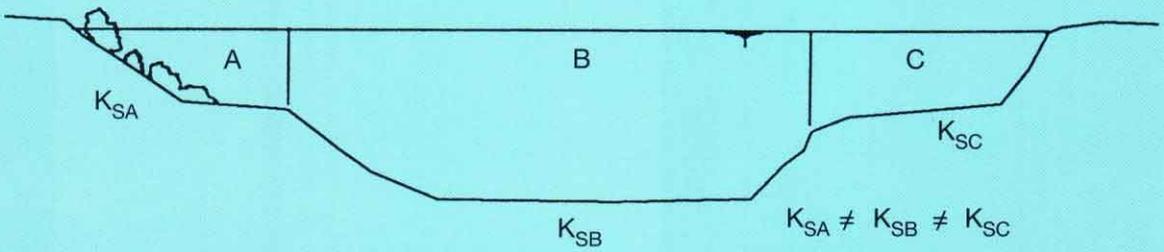


Figure A3.1 - Division du cours d'eau en sous-sections

On utilise la formule caractérisant la débitance

$$D = \frac{Q}{\sqrt{I}}$$

de manière à ne prendre en compte que les paramètres de la section transversale, soit :

$$D = K_S \cdot S \cdot R^{2/3}$$

Un calcul par zones séparées est nécessaire où l'on fait attention de considérer les périmètres mouillés (P) suivants :

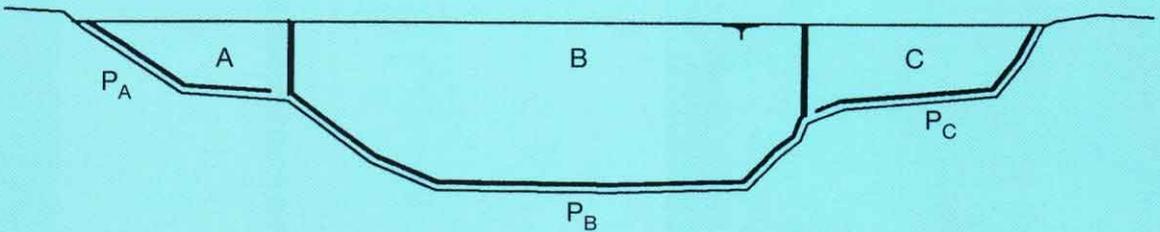


Figure A3.2. - Définition des périmètres mouillés

On a la débitance totale ( $D_T$ ) :

$$D_T = D_A + D_B + D_C$$

$$D_T = K_{SA} \cdot S_A \cdot \left(\frac{S_A}{P_A}\right)^{2/3} + K_{SB} \cdot S_B \cdot \left(\frac{S_B}{P_B}\right)^{2/3} + K_{SC} \cdot S_C \cdot \left(\frac{S_C}{P_C}\right)^{2/3}$$

Le cours d'eau pris dans sa globalité répond à :

$$D_T = K_S \cdot S_T \cdot R_T^{2/3}$$

On trouve alors le coefficient moyen :

$$K_S = \frac{D_T}{S_T \cdot R_T^{2/3}}$$

## FORCE TRACTRICE EN FONCTION DE LA VITESSE D'UN COURS D'EAU

1) Soit la formule de Strickler (p. 32) :

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

2) Soit la formule de la force tractrice (p. 34) :

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

3)

$$\Rightarrow R = \frac{\tau}{\rho \cdot I}$$

Introduisons 3) dans 1) :

$$V = K_S \left( \frac{\tau}{\rho \cdot I} \right)^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$V = K_S \cdot \tau^{2/3} \cdot \rho^{-2/3} \cdot I^{-1/6}$$

$$\tau^{2/3} = V \cdot \rho^{2/3} \cdot I^{1/6} \cdot K_S^{-1}$$

4)

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

Cette formule est intéressante parce qu'elle ne dépend pas du rayon hydraulique du cours d'eau, donc un profil en travers du cours d'eau n'est pas nécessaire. Par contre, elle est fonction de la pente du

cours d'eau, élément qu'il n'est pas toujours facile à mesurer, c'est pourquoi une deuxième formule est également proposée en fonction du rayon hydraulique du cours d'eau et non de la pente :

Soit la formule de Strickler (p. 32) :

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

5) Soit la formule de Chézy (avec C : coefficient de Chézy) :

$$V = C \cdot R^{1/2} \cdot I^{1/2}$$

Mettons en relation 5) avec 1), soit :

$$C \cdot R^{1/2} \cdot I^{1/2} = K_S \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$C = K_S \cdot R^{2/3 - 1/2}$$

6)

$$C = K_S \cdot R^{1/6}$$

Soit la formule de la force tractrice (p. 34)

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

$$\Rightarrow R = \frac{\tau}{\rho \cdot I}$$

7) de la formule 5), on a :

$$R = \frac{V^2}{C^2 \cdot I}$$

Mettons en relation 3) et 7)

$$\frac{\tau}{\rho \cdot I} = \frac{V^2}{C^2 \cdot I}$$

On obtient :

$$V^2 \cdot \rho = C^2 \cdot \tau$$

8)

$$\tau = \frac{1}{C^2} \cdot V^2 \cdot \rho$$

Introduisons 6) dans 8) :

$$\tau = \frac{1}{K_S^2 \cdot R^{2/6}} \cdot V^2 \cdot \rho$$

9)

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

Ainsi, lorsqu'il est plus aisé de connaître la pente d'un cours d'eau (profil en long), la formule 4) est utilisée, alors que la formule 9) est utilisée lorsqu'il est plus aisé d'établir le rayon hydraulique (profil en travers).

#### Exemples numériques :

1. Soit un cours d'eau de vitesse  $V = 2$  m/s, un coefficient  $K_S = 20$  et une pente  $I = 10$  ‰

On a :

$$V = K_S \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \Rightarrow R^{2/3} = \frac{V}{K_S \cdot I^{1/2}} = \frac{2}{20 \cdot \sqrt{0,01}} = 1$$

$$\Rightarrow R = 1$$

Soit la formule de force tractrice 2) :

$$\tau = \rho \cdot R \cdot I = 1000 \cdot 1 \cdot 0,01 = \mathbf{10 \text{ kg/m}^2} \quad (100 \text{ N/m}^2)$$

Soit la formule 9) :

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

$$\tau = \frac{1}{20^2} \cdot 1 \cdot 2^2 \cdot 1000 = \mathbf{10 \text{ kg/m}^2} \quad (100 \text{ N/m}^2)$$

Soit la formule 4) :

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

$$\tau = 1000 \cdot 0,01^{1/4} \cdot 20^{-3/2} \cdot 2^{3/2} = \mathbf{10 \text{ kg/m}^2} \quad (100 \text{ N/m}^2)$$

2. Soit un cours d'eau de vitesse  $V = 2$  m/s, un coefficient  $K_S = 20$  et une pente  $I = 17$  ‰

On a :

$$R^{2/3} = \frac{2}{20 \cdot \sqrt{0,017}} = 0,797 \Rightarrow R = 0,797^{3/2} = 0,6716819$$

Soit la formule 2) de force tractrice :

$$\tau = \rho \cdot R \cdot I = 1000 \cdot 0,6716819 \cdot 0,017 = \mathbf{11,42 \text{ kg/m}^2} \quad (114,2 \text{ N/m}^2)$$

Soit la formule 4) :

$$\tau = \rho \cdot I^{1/4} \cdot K_S^{-3/2} \cdot V^{3/2} = 1000 \cdot 0,017^{1/4} \cdot 20^{-3/2} \cdot 2^{3/2} = \mathbf{11,42 \text{ kg/m}^2} \quad (114,2 \text{ N/m}^2)$$

Soit la formule 9) :

$$\tau = K_S^{-2} \cdot R^{-1/3} \cdot V^2 \cdot \rho = 20^{-2} \cdot 0,6716819^{-1/3} \cdot 2^2 \cdot 1000 = \mathbf{11,42 \text{ kg/m}^2} \quad (114,2 \text{ N/m}^2)$$

# A4. VALEURS DU COEFFICIENT DE RUGOSITÉ EN COURS D'EAU NATURELS

## PETITS COURS D'EAU (largeur au miroir < 30 m)

### Cours d'eau de plaine

- 1** Net, droit, plein niveau, sans seuil ni grandes mouilles profondes
- 2** Idem mais avec plus de cailloux et d'herbe
- 3** Net, méandreux, quelques mouilles et hauts fonds
- 4** Idem mais avec des herbes et des cailloux
- 5** Idem, niveaux plus bas, plus de talus et de sections ineffectifs
- 6** Idem 4, mais plus de cailloux

- 7** Bief paresseux, herbé, mouilles profondes
- 8** Bief très herbeux, mouilles profondes ou chenaux de crue avec grandes souches d'arbres et de buissons

### Cours d'eau de montagne sans végétation dans le lit, berges généralement raides, arbres et buissons le long des berges submergés en période de crue

- 9** Fond : graviers, galets, et quelques gros cailloux
- 10** Fond : galets avec grands cailloux

### \*LIT MAJEUR

### Pâturage sans buissons

- 11** Herbe rase
- 12** Herbe haute

### Zones cultivées

- 13** Pas de culture
- 14** Culture sarclée à maturité
- 15** Culture céréalière, à maturité

### Buissons

- 16** Buissons épars hautes herbes
- 17** Buissons et arbres clairsemés, en hiver
- 18** Buissons et arbres clairsemés, en été

- 19** Buissons moyens à denses, en hiver
- 20** Buissons moyens à denses, en été

### Arbres

- 21** Saules très branchus en été
- 22** Zone ouverte avec souches d'arbres sans pousses
- 23** Idem 2, mais avec beaucoup de pousses en croissance
- 24** Secteur fortement boisé, plusieurs petits arbres, un peu de broussailles, branches submergées en période de crue
- 25** Idem 4, mais niveau de crue ne dépassant pas les branches

## GRANDS COURS D'EAU (Largeur au miroir > 30 m)

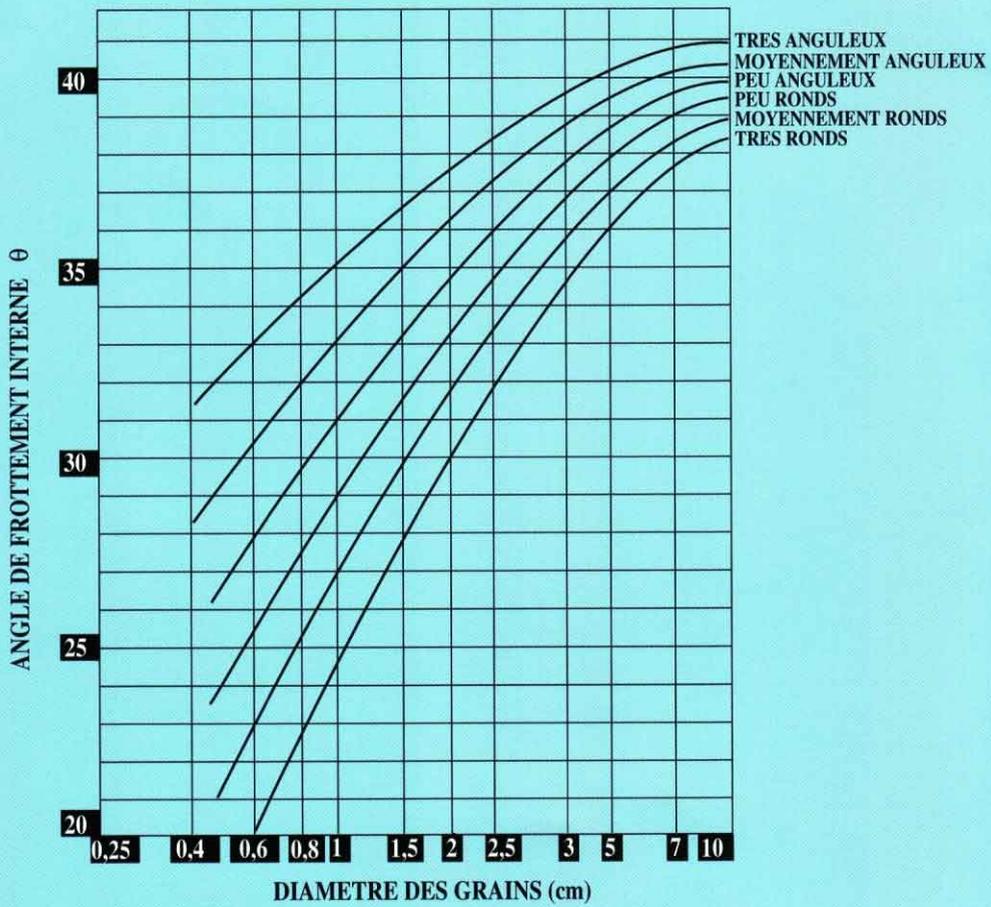
La valeur "n" est inférieure à celle des petits cours d'eau pour une même description, car les berges offrent moins de résistance effective

- 26** Section régulière sans gros cailloux ni buissons
- 27** Section irrégulière et rugueuse

	n min	n normal	n max	Ks max	Ks normal	Ks min
<b>1</b>	0.025	0.030	0.033	40	33	30
<b>2</b>	0.030	0.035	0.040	33	29	25
<b>3</b>	0.033	0.040	0.045	30	25	22
<b>4</b>	0.035	0.045	0.050	29	22	20
<b>5</b>	0.040	0.048	0.055	25	21	18
<b>6</b>	0.045	0.050	0.060	22	20	17
<b>7</b>	0.050	0.070	0.080	20	14	13
<b>8</b>	0.075	0.100	0.150	13	10	7
<b>9</b>	0.030	0.040	0.050	33	25	20
<b>10</b>	0.040	0.050	0.070	25	20	14
<b>11</b>	0.025	0.030	0.035	40	33	29
<b>12</b>	0.030	0.035	0.050	33	29	20
<b>13</b>	0.020	0.030	0.040	50	33	25
<b>14</b>	0.025	0.035	0.045	40	29	22
<b>15</b>	0.030	0.040	0.050	33	25	20
<b>16</b>	0.035	0.050	0.070	29	20	14
<b>17</b>	0.035	0.050	0.060	29	20	17
<b>18</b>	0.040	0.060	0.080	25	17	13
<b>19</b>	0.045	0.070	0.110	22	14	9
<b>20</b>	0.070	0.100	0.160	14	10	6
<b>21</b>	0.110	0.150	0.200	9	7	5
<b>22</b>	0.030	0.040	0.050	33	25	20
<b>23</b>	0.050	0.060	0.080	20	17	13
<b>24</b>	0.080	0.100	0.120	13	10	8
<b>25</b>	0.100	0.120	0.160	10	8	6
<b>26</b>	0.025	....	0.060	40	....	17
<b>27</b>	0.035	....	0.100	29	....	10

D'après [23].

# A5. DÉTERMINATION DE L'ANGLE INTERNE DE FROTTEMENT DE DIVERS MATÉRIEAUX NON COHÉRENTS



D'après [12].

## A6. CLES DE DÉTERMINATION SIMPLIFIÉES POUR LES SAULES BASEES SUR DIFFÉRENTS CRITÈRES MORPHOLOGIQUES

Les présentes clés de détermination n'ont pas la prétention de remplacer la littérature spécialisée à ce sujet. Elles ne s'appliquent qu'aux saules vivant en dessous de 1.200 m d'altitude.

Néanmoins, elles constituent un aide-mémoire aux critères les plus marquants et les plus importants distinguant les différentes espèces.

La 4ème clé est celle que l'on utilisera en hiver ou au printemps, lorsqu'il n'y a pas de feuilles. Cette clé, créée pour l'occasion, doit encore être améliorée. Elle doit être utilisée avec prudence car les saules, malgré leurs différences, possèdent des critères de distinction non

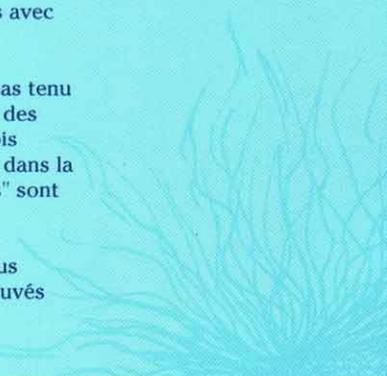
évidents à ceux qui n'y sont pas familiarisés.

Il est recommandé d'examiner plusieurs tiges ou plusieurs feuilles ou plusieurs bourgeons d'un même pied à divers endroits de la plante. Il ne faut jamais se contenter d'un caractère.

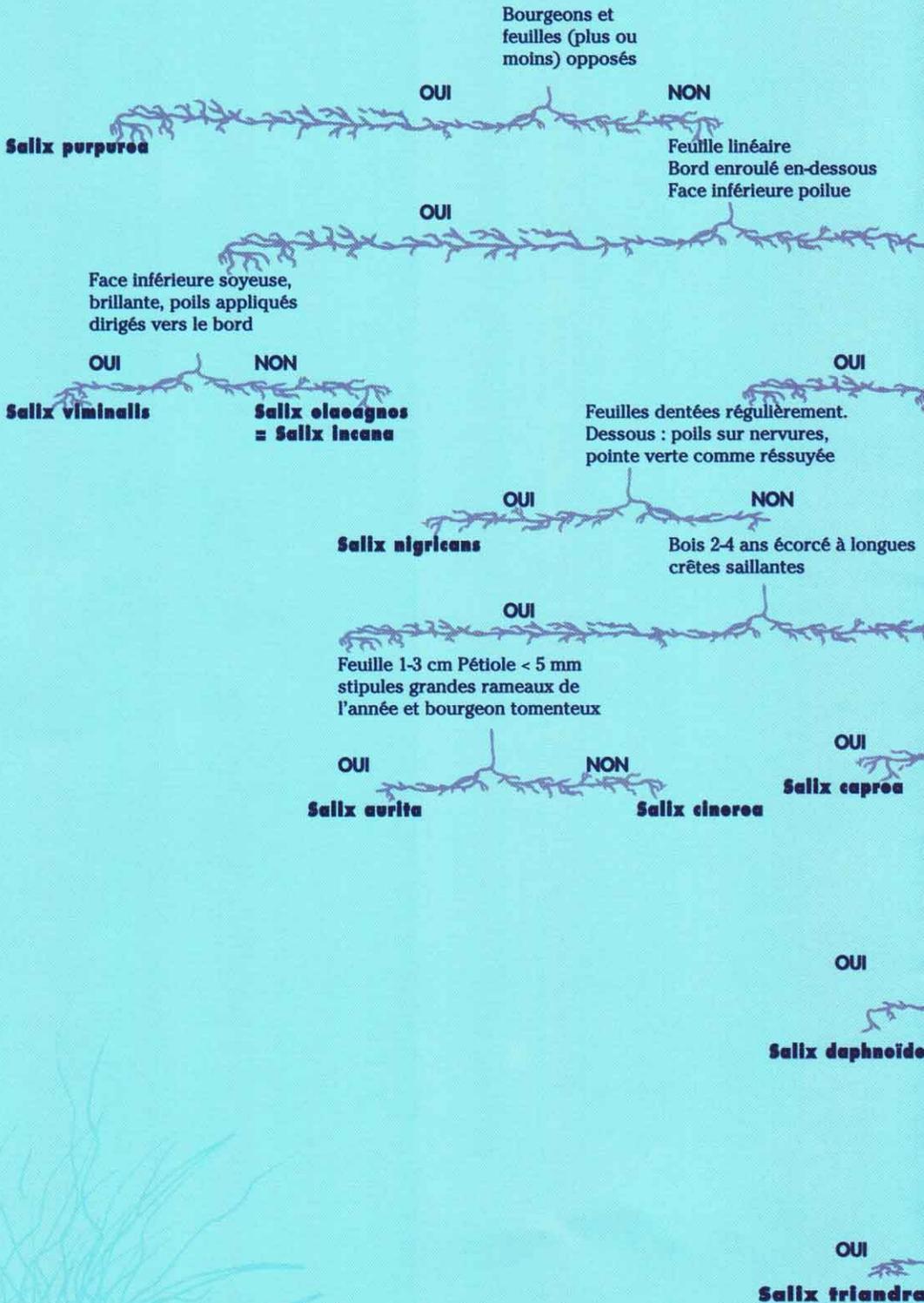
Les caractéristiques doivent souvent être observées avec une bonne loupe.

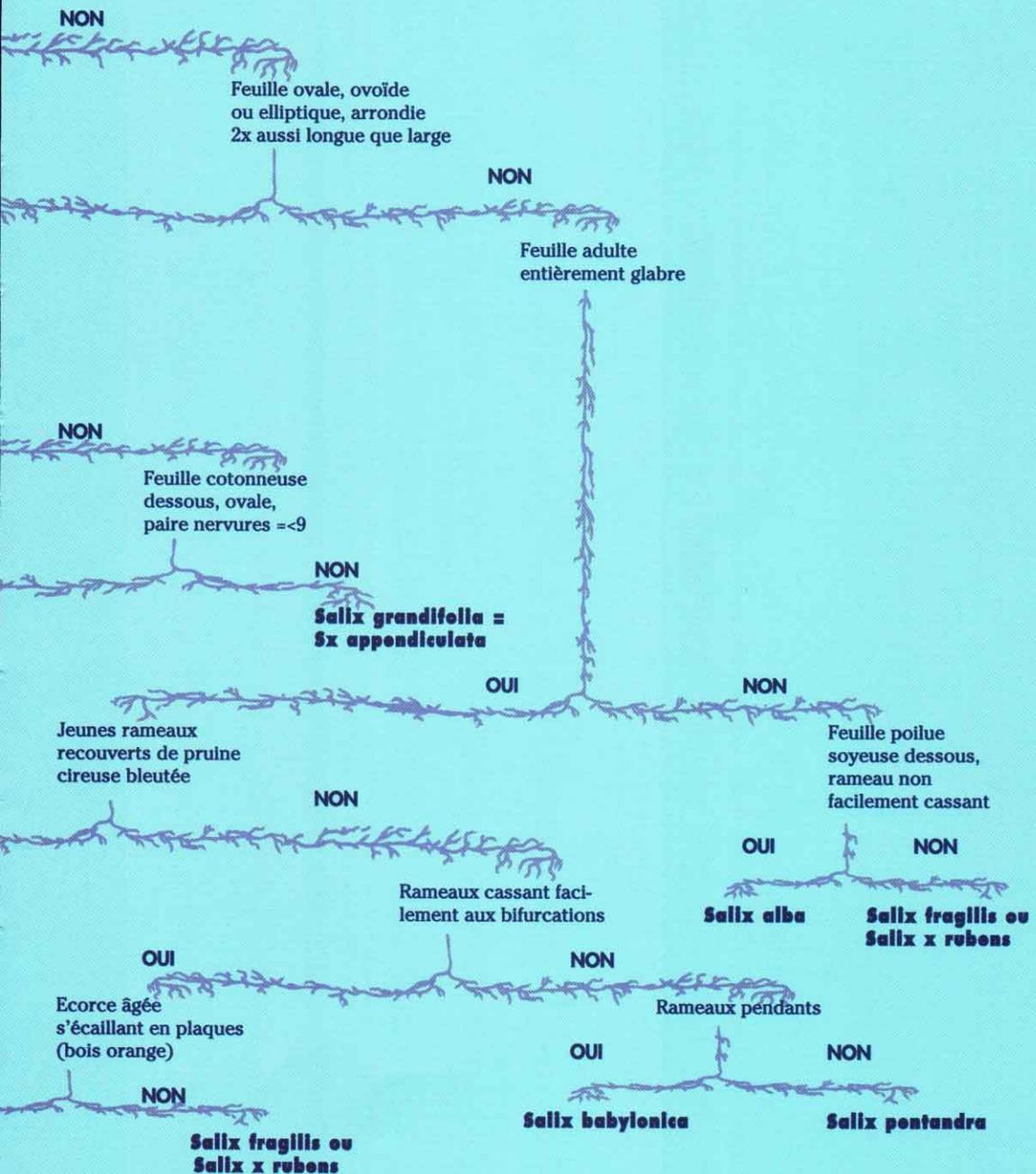
Dans ces clés, il n'est pas tenu compte des variétés et des hybrides qu'il est parfois possible de rencontrer dans la nature. Seuls les "types" sont décrits.

Des renseignements plus précis peuvent être trouvés dans [27, 28, 29, 30].

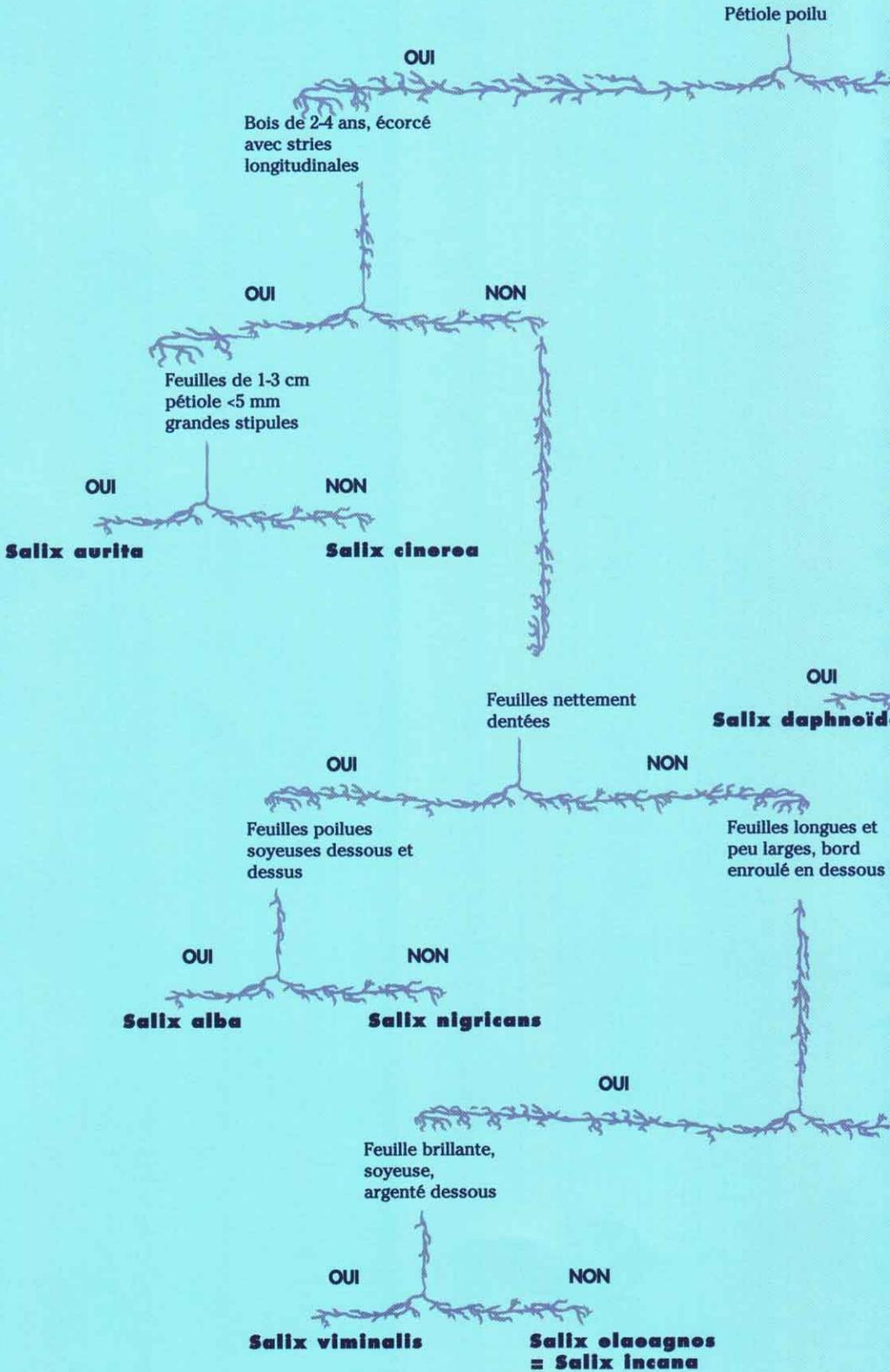


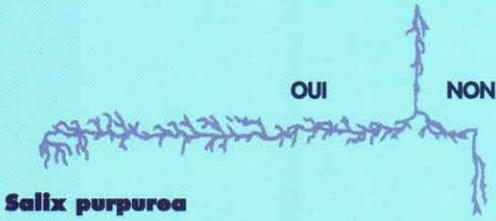
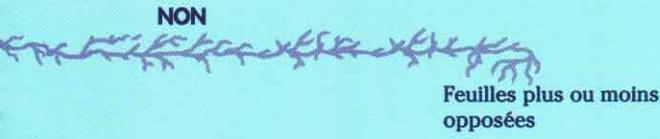
CLE DE DETERMINATION DES SAULES I  
CRITERE PRINCIPAL : FEUILLES ET RAMEAUX



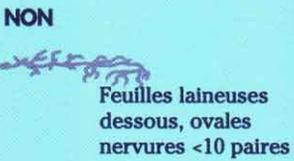
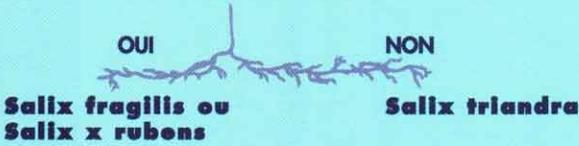
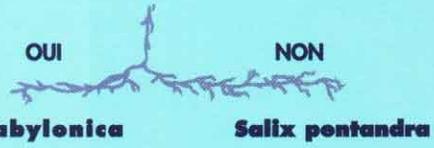
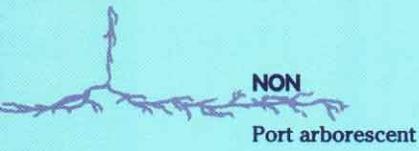


CLE DE DETERMINATION DES SAULES II  
CRITERE PRINCIPAL : FEUILLES ET RAMEAUX



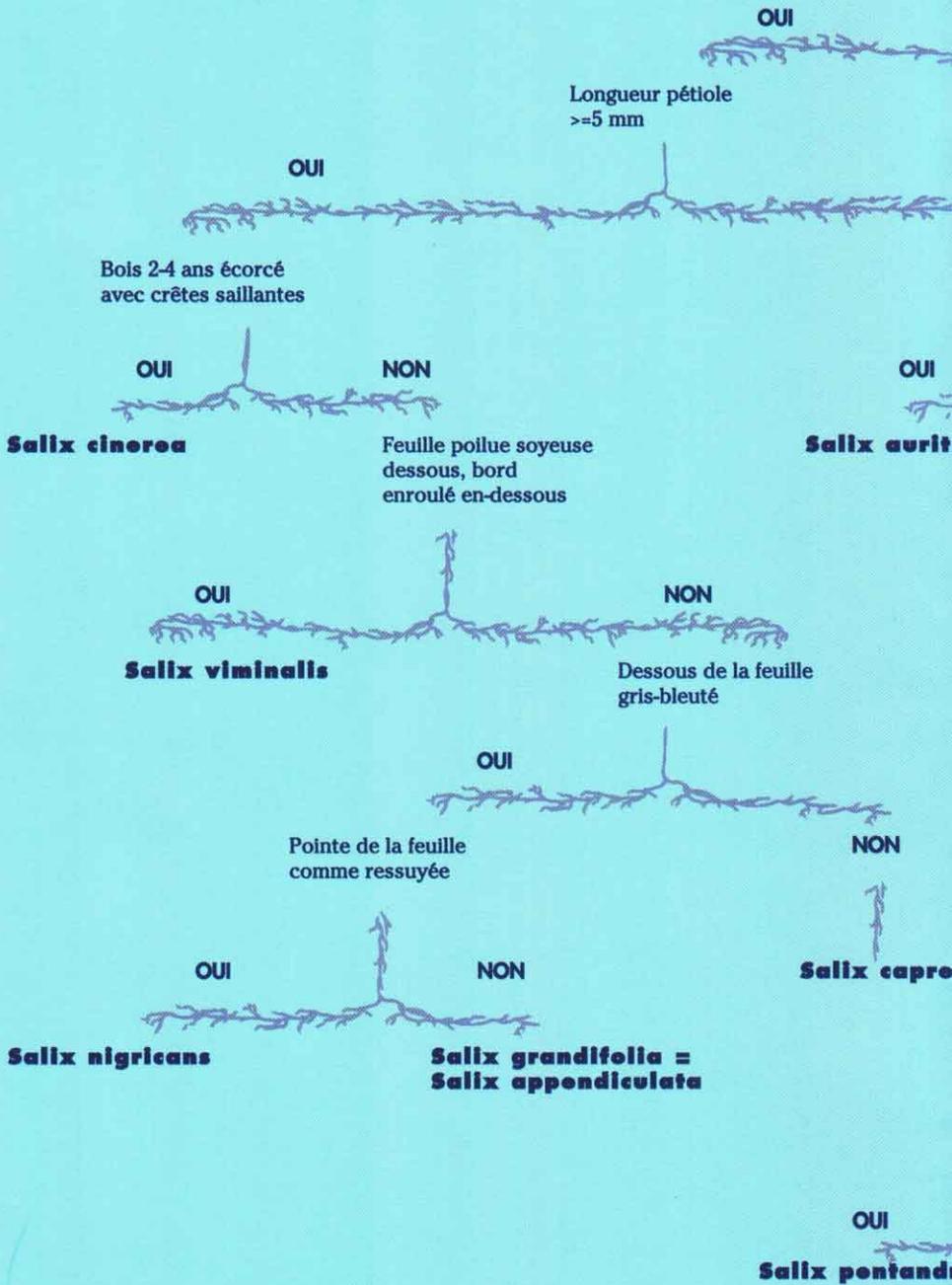


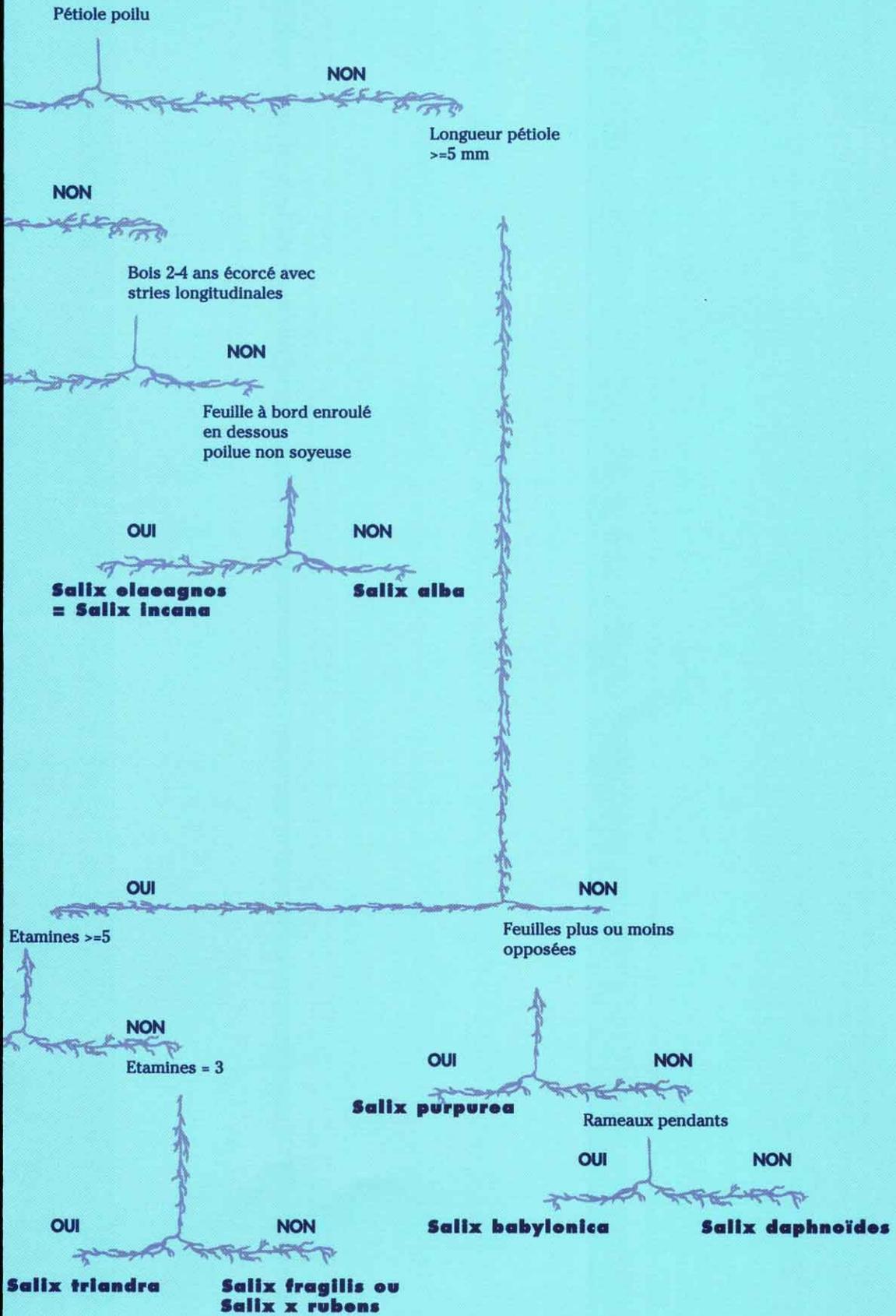
Rameau cassant facilement aux bifurcations



### CLE DE DETERMINATION DES SAULES III

CRITERE PRINCIPAL : FEUILLES, RAMEAUX ET FLEURS





CLE DE DETERMINATION DES SAULES IV  
CRITERE PRINCIPAL : BOURGEONS ET RAMEAUX

