

Aménagement des cours d'eau avec du génie biologique

Giovanni De Cesare

ENAC PL-LCH

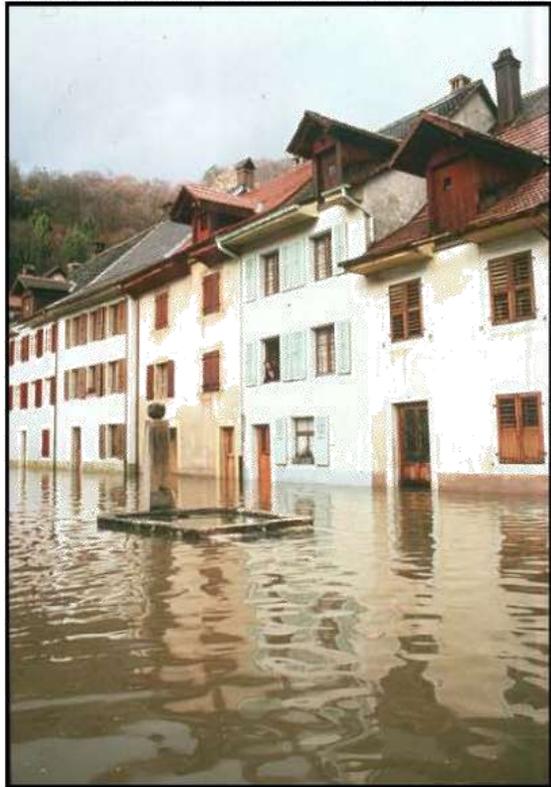
Certains exemples et images en partie tirés du cours de F. Gerber, Biotec

Le système cours d'eau : un contexte naturel

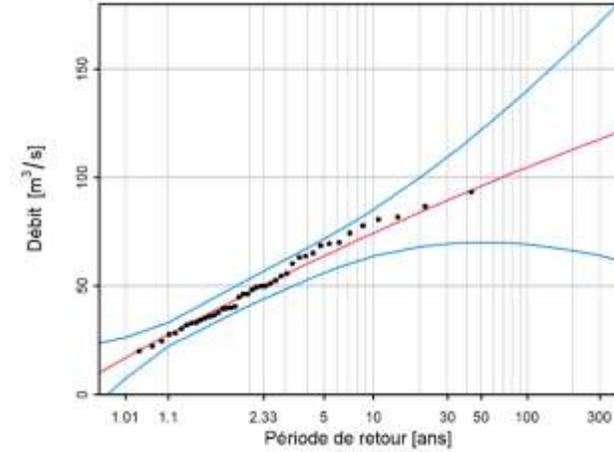


Un régime hydrologique variable

p.ex. les crues de la Venoge – bien connues et étudiées



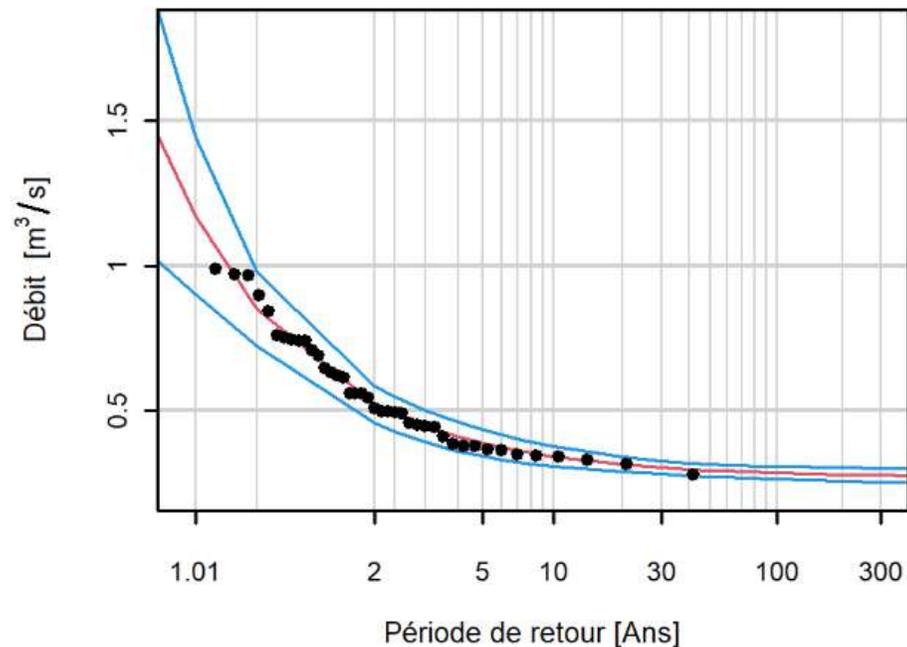
Statistique des crues annuelles de la période d'étude 1979-2020 (42 ans)



Un régime hydrologique variable

Les étiages de la Venoge – pas encore bien connus et étudiés

Statistique des NM7Q de la période d'étude 1.4.1979 – 31.3.2020 (41 Ans)



Le paramètre NM7Q reflète le débit le plus faible en moyenne sur sept jours (M7Q) durant une période donnée (OFEV : un an)



Etiage prononcé de la Emme en 2018, source BAFU

Rappel de quelques fonctions écologiques des formations végétales riveraines :

- **Fonction d'écotone** ⇒ interface très riche en biodiversité (par exemple 1'400 espèces végétales recensées sur les berges de l'Adour, soit ~ 30 % flore française) entre milieux **terrestre** et **aquatique** pour de très nombreux organismes vivants (**lieu de reproduction, d'abri, source de nourriture, etc.**).

- **Fonction de « corridor » ou de connexion :**
 - **configuration linéaire**, qui permet le déplacement des espèces selon une arborescence élargie (~ 500'000 km de cours d'eau en France);

 - **dispersion**, même pour des espèces qui ne sont pas inféodées à ce type de milieux (notamment la grande et petite faune);

Rappel de quelques fonctions écologiques des formations végétales riveraines :

- **Fonction de « corridor » ou de connexion :**
 - **garantie de déplacement**, malgré des conditions écologiques hostiles des milieux adjacents (urbanisation, grandes cultures, infrastructures routières, etc.).



Confluence Isère et Drac à Grenoble, corridor écologique malgré un environnement hostile

Rappel de quelques fonctions écologiques des formations végétales riveraines :

- La végétation rivulaire modifie la morphologie des cours d'eau en créant une très forte **diversité d'habitats** :
 - **vivante** (avec diverses strates, espèces, formes, etc.)



- **morte** (embâcles, débris, etc.).



Rappel de quelques fonctions écologiques des formations végétales riveraines :

- La végétation des berges, en procurant de l'ombre au-dessus des eaux, permet de maintenir une température des eaux fraîche (*la concentration en oxygène diminue de moitié entre de l'eau à 0° C et 30° C, idem que pour l'homme monter à 6'000 mètres d'altitude !*).

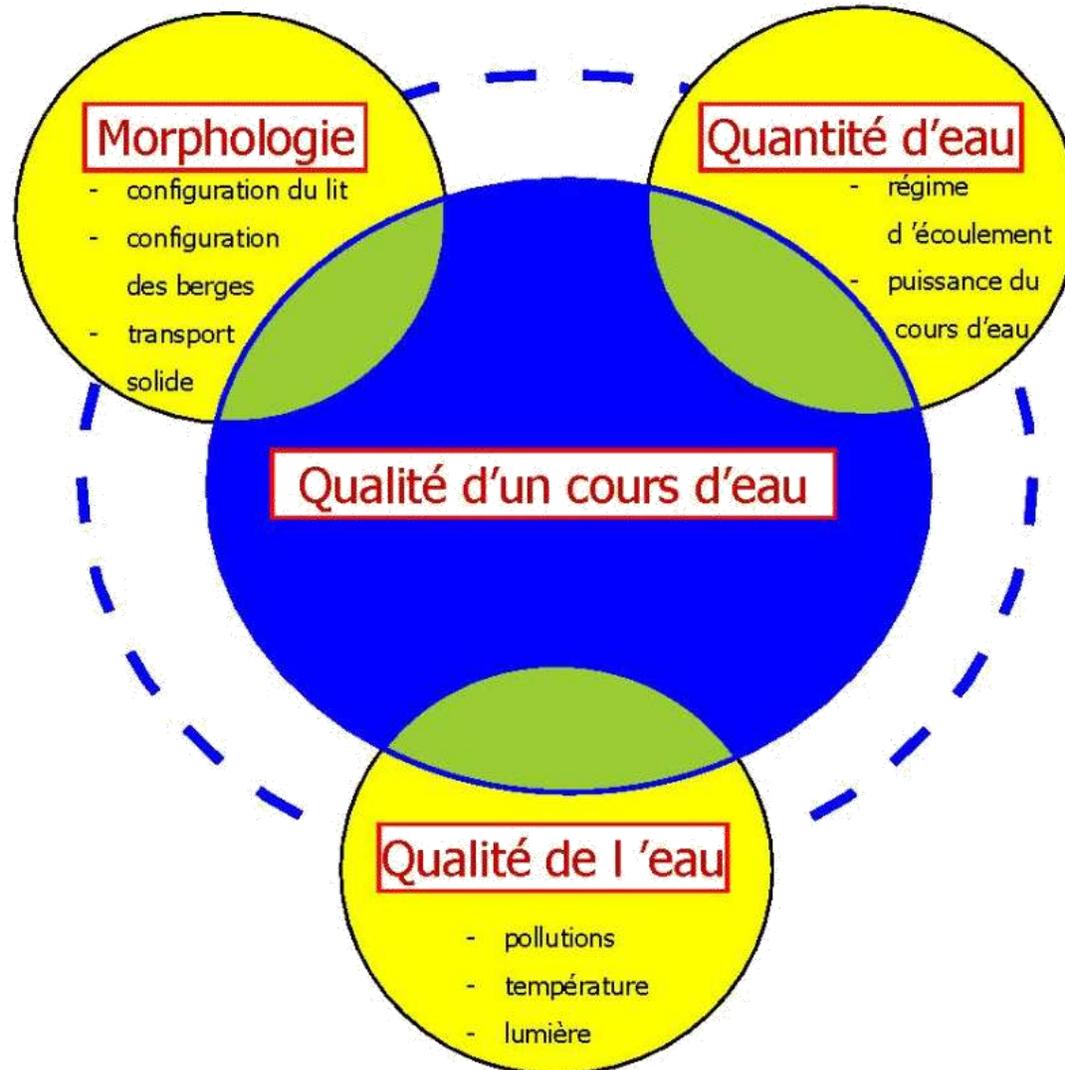


Rappel de quelques fonctions écologiques des formations végétales riveraines :

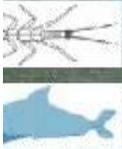
- Les formations végétales riveraines participent à l'élimination de pollutions diffuses :
 - **zone tampon** (éloignement physique des cultures par rapport au cours d'eau);



Facteurs interdépendants liés à la qualité d'un cours d'eau

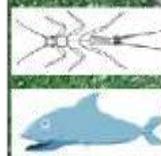


Facteurs d'influence généraux sur les biocénoses

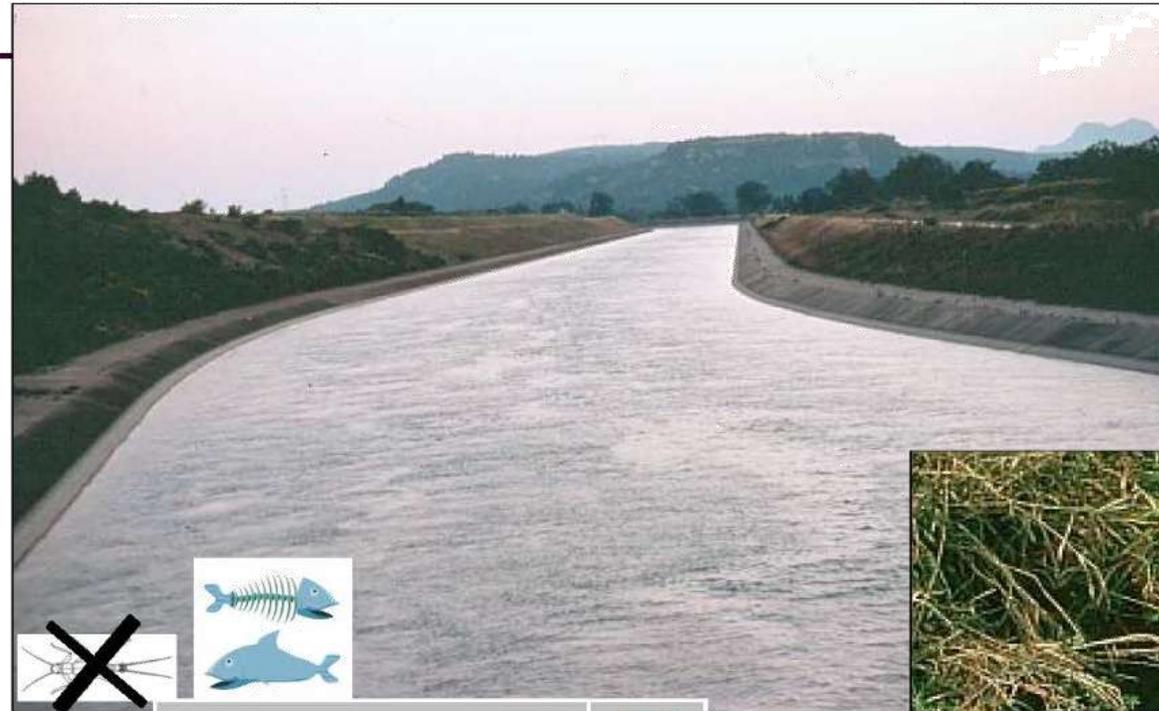


QUALITE	✓
QUANTITE	✓
MORPHOLOGIE	✓

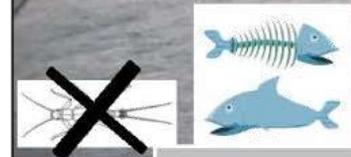
QUALITE	✓
QUANTITE	✓
MORPHOLOGIE	✓



Facteurs d'influence généraux sur les biocénoses



QUALITE	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
QUANTITE	<input checked="" type="checkbox"/>
MORPHOLOGIE	<input checked="" type="checkbox"/>



QUALITE	<input checked="" type="checkbox"/>
QUANTITE	<input checked="" type="checkbox"/>
MORPHOLOGIE	<input checked="" type="checkbox"/>



Facteurs d'influence généraux sur les biocénoses

QUALITE	<input type="checkbox"/>
QUANTITE	<input checked="" type="checkbox"/>
MORPHOLOGIE	<input type="checkbox"/>



QUALITE	<input type="checkbox"/>
QUANTITE	<input type="checkbox"/>
MORPHOLOGIE	<input type="checkbox"/>



Facteurs d'influence généraux sur les biocénoses

QUALITE	<input checked="" type="checkbox"/>
QUANTITE	<input checked="" type="checkbox"/>
MORPHOLOGIE	<input checked="" type="checkbox"/>

QUALITE	<input checked="" type="checkbox"/>
QUANTITE	<input checked="" type="checkbox"/>
MORPHOLOGIE	<input checked="" type="checkbox"/>

Erosion de berge ➤ pas d'enjeu, pas de protection



Erosion de berge ➤ pas d'enjeu, pas de protection

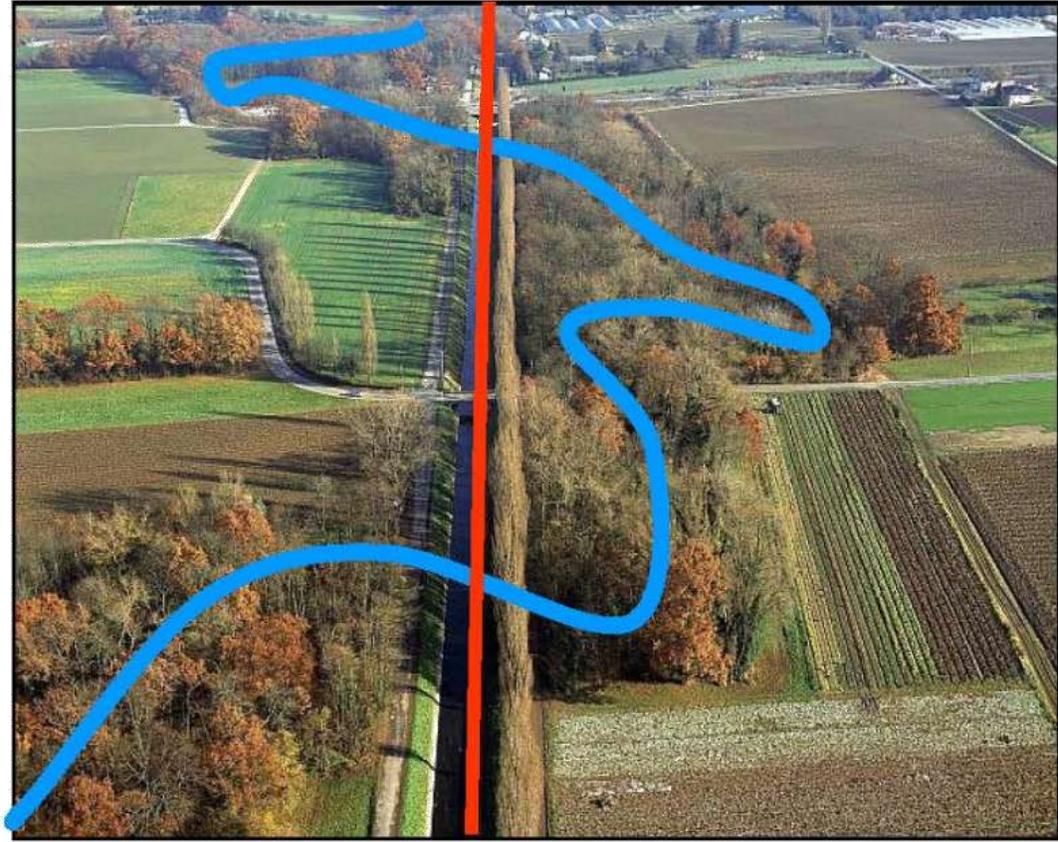


Vallée de Truso, Géorgie - photo: De Cesare mai 2018

Erosion de berge ➤ enjeu, d'où protection



Des travaux de chenalisation ...



Des travaux de chenalisation ...



Des protections de berge inadaptées ...



Des protections de berge inadaptées ...



Des protections de berge inadaptées ...



Des protections de berge inadaptées, même avec des matériaux « naturels » ...



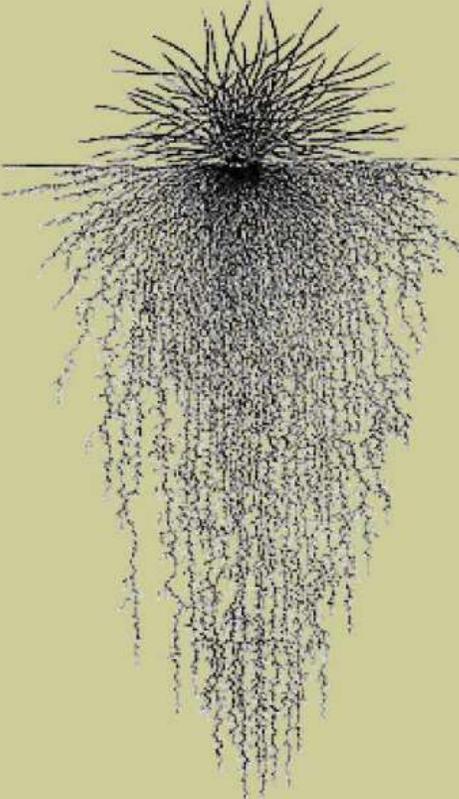
Le génie végétal, une autre approche basée sur :

➤ les systèmes racinaires

Bloc de roche



Végétal



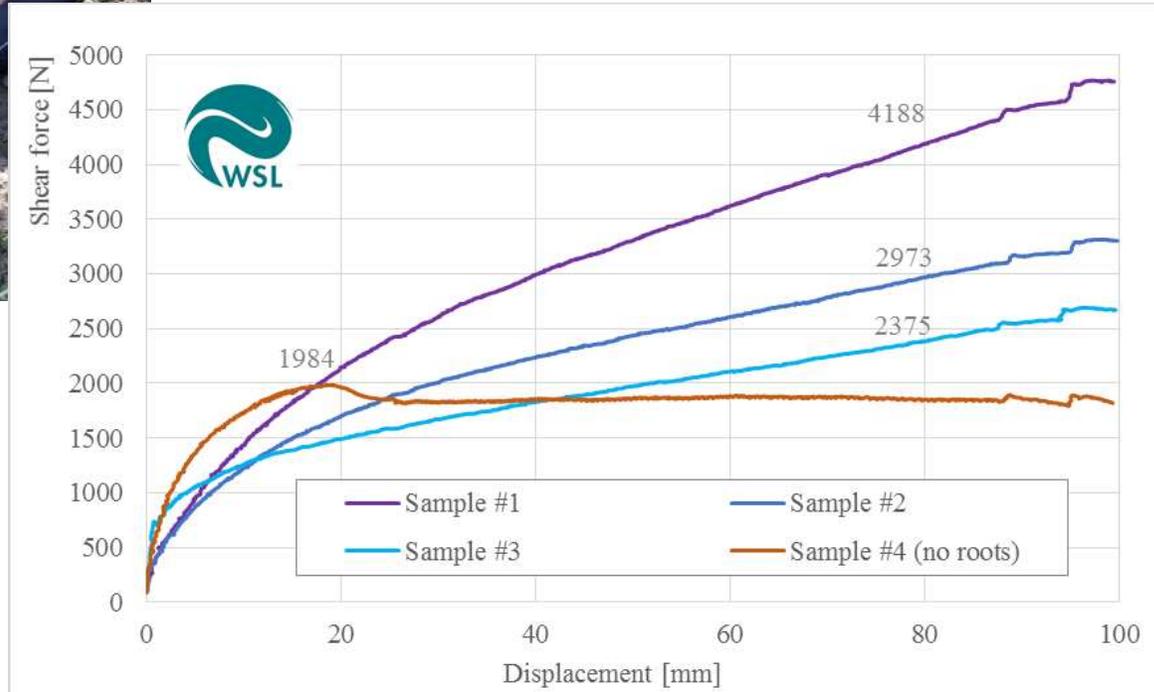
A detailed diagram of a root system. The roots are shown as a dense, fibrous network extending downwards from a central point. A vertical scale bar on the left indicates a depth of 2.5 m.

- Effet de stabilisation dynamiquement croissant
- Souplesse des ouvrages et résistance :
 - ↳ ancrage dans la berge et non appui contre elle
 - ↳ tensions d'arrachement ou de glissement reprises en traction
- Action hydromécanique dans le sol (évapo-transpiration, effet de cintrage, augmentation de la cohésion)
- Autoépuration de l'eau
- ...

Le génie végétal, une autre approche basée sur :

➤ les systèmes racinaires

Renforcement des dépôts sédimentaires par des racines, vérification par essais de cisaillement



Plateforme en constructions hydrauliques - De Cesare

De Cesare G., Solioz M. R., and Perona, P. (2022). *Experimental characterization of root-reinforced riparian sediment deposits in a restored and widened river course*, in proceedings of River Flow 2022, 11th International Conference on Fluvial Hydraulics, [Virtual event] Kingston and Ottawa, Canada, November 8-10, 2022

Le génie biologique

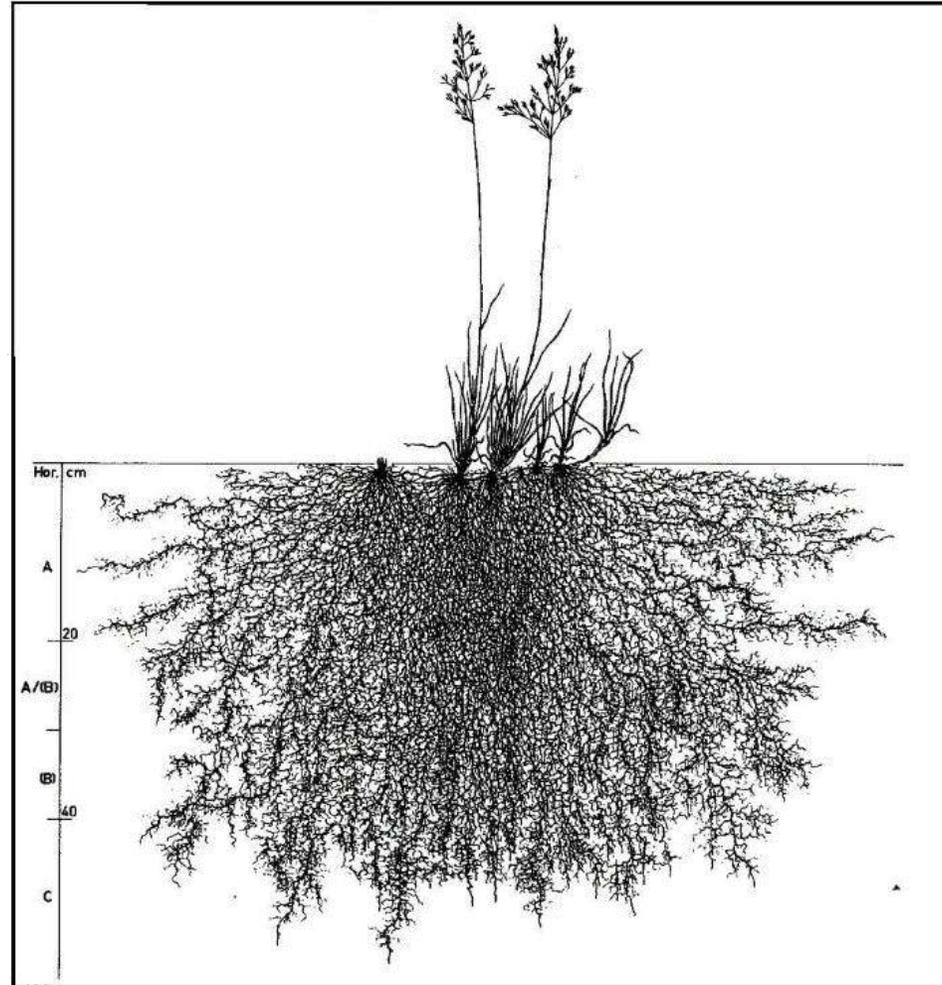
Définition

Techniques végétales mises à disposition de l'ingénieur pour des ouvrages de stabilisation de talus et l'aménagement de cours d'eau. Ces méthodes utilisent des végétaux entiers ou partiels, souvent en combinaison avec des matériaux inertes (pieux, géotextiles, rondins de bois, etc.).

Objectifs

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

➤ ***les systèmes racinaires***

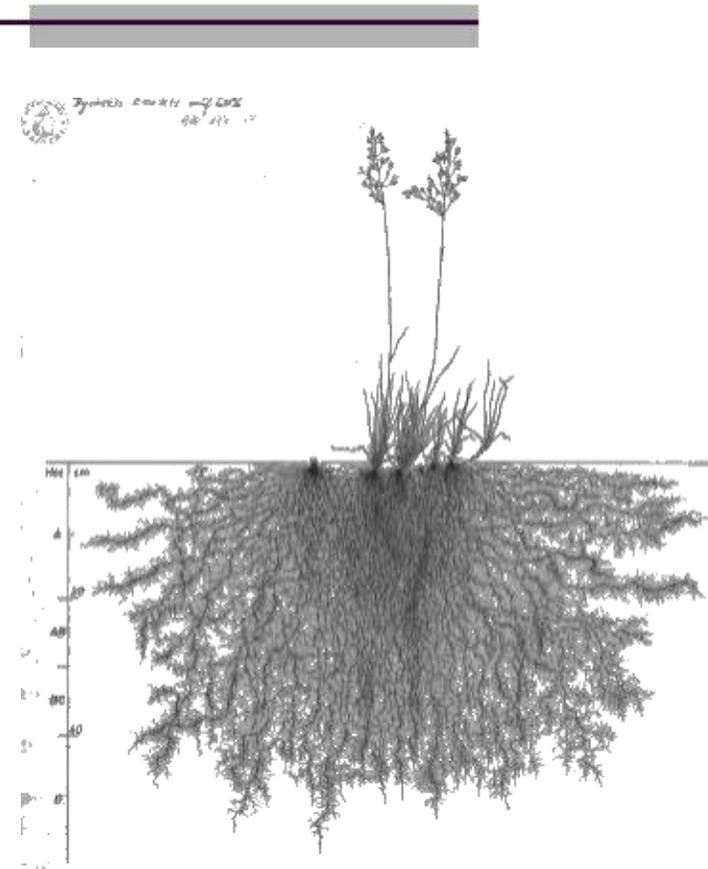


➤ ***la souplesse des tiges aériennes***



Rapport Racine / Tige en volume

Plantes de steppes	5 -15
Viorne obier	2,3
Saules div.	2,0
Saule drapé	1,8
Saule noirissant	1,8
Saule à grandes feuilles	1,7
Aulne vert	1,6
Saule pourpre	1,5
Frêne	1,5
Chèvrefeuille	1,3
Troène	1,2
Tamarin	1,2
Erable sycomore	1,1
Tremble	1,1
Framboisier	1,1
Argousier	1,0
Saule blanc	0,5
Peuplier blanc	0,5
Saule à 3 étamines	0,4
Peuplier noir cult.	< 0,4



Agrostis tenuis - source:

<https://images.wur.nl/digital/collection/coll13/search>

et

<http://wurzelforschung.at/>

Avantages des techniques végétales

Aspects techniques

- **stabilisation mécanique croissante (tensions d'arrachement ou de glissement reprises en traction par les racines);**
- **stabilisation accrue par absorption d'eau et transpiration des végétaux;**
- **maintien de la porosité et perméabilité du sol (drainage par le système racinaire);**
- **techniques généralement peu coûteuses, les matériaux de fourniture étant prélevés en grande partie sur place;**
- **techniques nécessitant généralement peu d'entretien, les espèces mises en place ayant été choisies et combinées entre elles avec précaution.**

Avantages des techniques végétales

Aspects écologiques

- **maintien d'un patrimoine botanique (réservoir génétique) et scientifique;**
- **augmentation des fonctions naturelles (refuge, nourriture et abri pour la faune);**
- **absorption d'une partie de la pollution de l'air et atténuation du bruit.**

Aspect esthétique

- **les techniques proposées s'inscrivent parfaitement dans le paysage fluvial.**

Limites

Malgré les nombreux avantages que procurent les techniques végétales, il subsiste des facteurs limitants :

- un milieu trop artificiel;
- la limite altitudinale de la végétation;
- un substrat rocheux;
- un régime torrentiel;
- etc.

De plus :

- efficacité de stabilisation non optimale dès la mise en place;
- réalisations souvent exigeantes en main-d'œuvre et peu d'entreprises compétentes à ce jour;
- entretien parfois accru de la végétation.

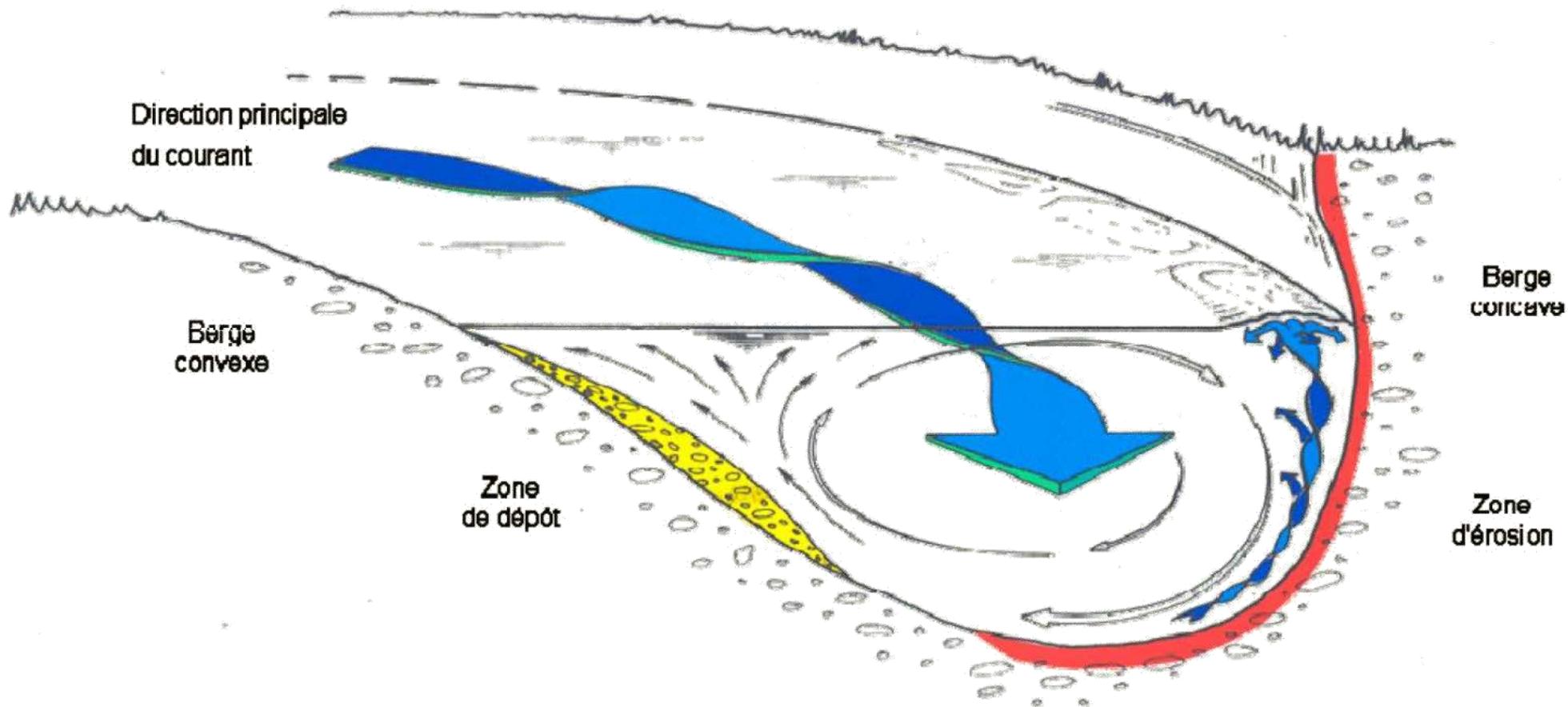
Principes de dimensionnement

- Considérer le cours d'eau comme un complexe formé d'un lit, des berges et des rives, le tout étroitement en relation avec le bassin versant et les nappes phréatiques;
- ne pas oublier la « variante 0 » lorsque cela est possible;
- procéder à un entretien réfléchi, pondéré et adéquat de la végétation riveraine;
- lors de réalisations, privilégier les techniques du génie végétal. Eviter l'utilisation abusive de matériaux non vivants;
- limiter au maximum l'utilisation d'enrochements, et si vraiment nécessaire, utiliser la pierre de la région;
- opter pour un maximum de diversité au niveau des strates, des espèces et des mosaïques;
- lorsque des activités de loisirs sont inévitables en bordure de cours d'eau, faire en sorte que celles-ci occupent les rives et non les berges.

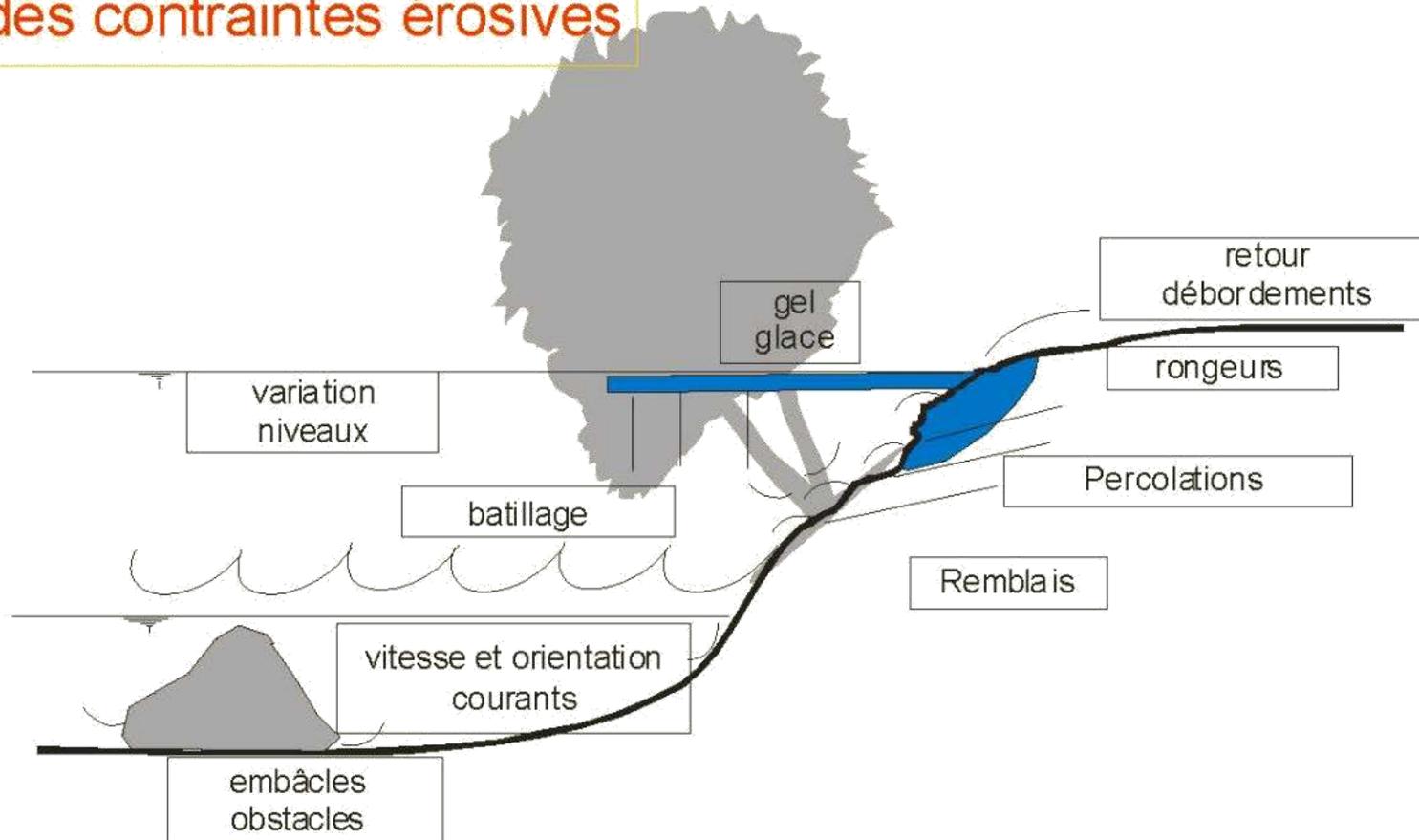
Traitement logique des érosions en cours d'eau

- **Faut-il réellement intervenir ?** (évaluer les conséquences d'une non-intervention)
- Évaluer si une **gestion ciblée de la végétation** existante peut enrayer l'érosion.
- Évaluer si les **techniques végétales** peuvent satisfaire à la résolution des problèmes.
- Établir si des **techniques combinées** peuvent pallier au problème.
- Appliquer, **seulement à ce stade**, une technique habituelle de **génie civil** raisonnable et proportionnée.

Dimensionnement du génie végétal; le cours d'eau, un système complexe ...



Parfaite compréhension
des contraintes érosives



Exemples de contraintes érosives



Le méandrage

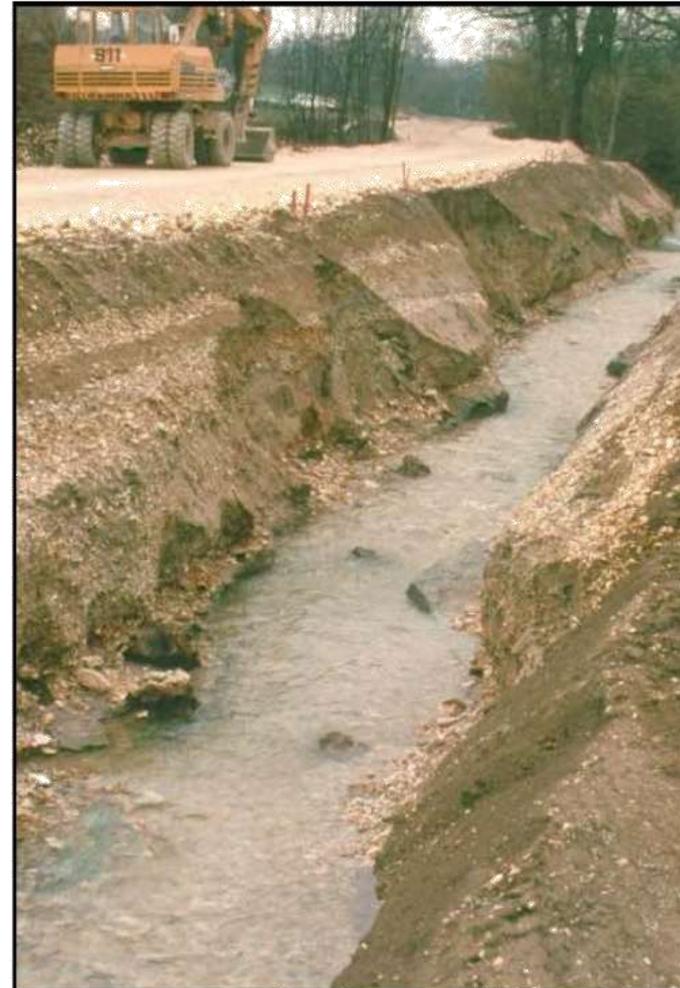


Le glissement

Exemples de contraintes érosives



Le marnage



Le remblai de l'espace cours d'eau

Exemples de contraintes érosives

La marée



Exemples de contraintes érosives

Le mascaret



Exemples de contraintes érosives

**Le batillage,
naturel ou
anthropique**



Exemples de contraintes érosives

Le batillage,
naturel ou
anthropique



➤ **La force tractrice**

La force tractrice (τ) illustre la force d'arrachement des eaux. Elle peut se calculer de diverses manières :

1) $\tau = \varphi \cdot R \cdot I$ (formule générale)

avec

φ = poids unitaire de l'eau (10'000 N/m³)

R = rayon hydraulique (m) = $\frac{\text{section d'écoulement (m}^2\text{)}}{\text{périmètre mouillé (m)}}$

I = pente du cours d'eau (m/m)

τ = force tractrice (N/m²)

2) On admet souvent $R = h$

$$\tau = \varphi \cdot h \cdot I$$

avec

h = hauteur d'eau (m)

ce qui engendre un facteur de sécurité.

➤ ***La force tractrice critique***

On appelle force tractrice critique (τ_0), la force tractrice à partir de laquelle les matériaux commencent à se déplacer.

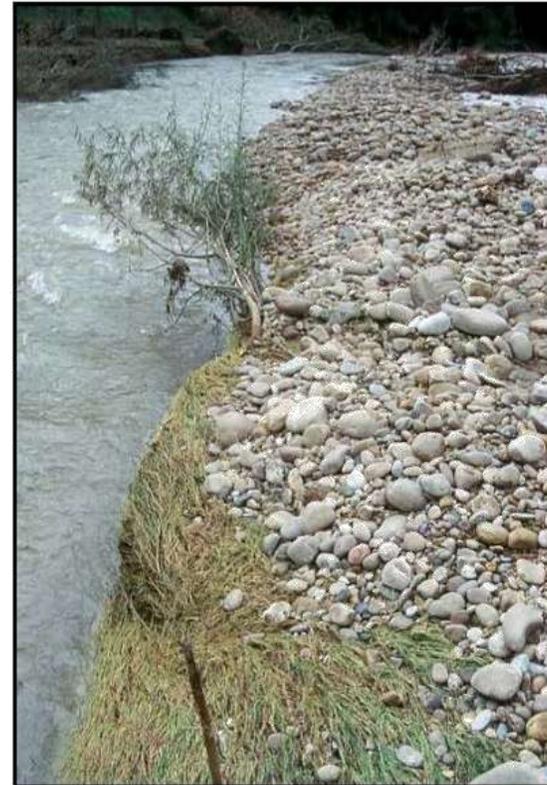
Quelques valeurs :

Sable fin (< 0.2 mm)	:	1 N/m ²
Petit gravier (< 2 cm)	:	12 N/m ²

Résistance des techniques végétales :

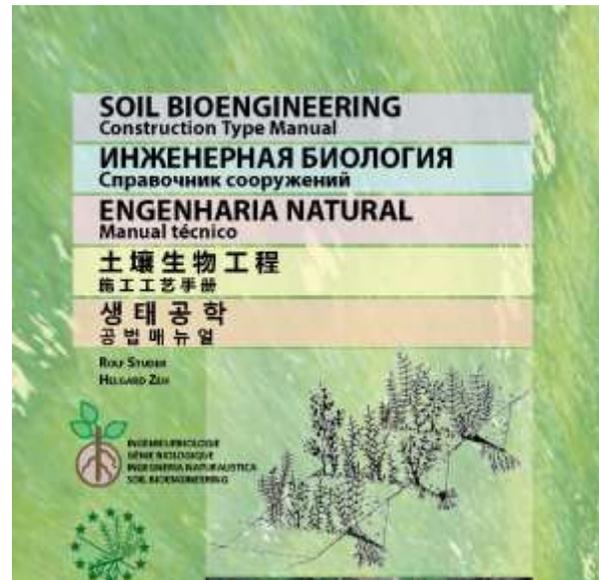
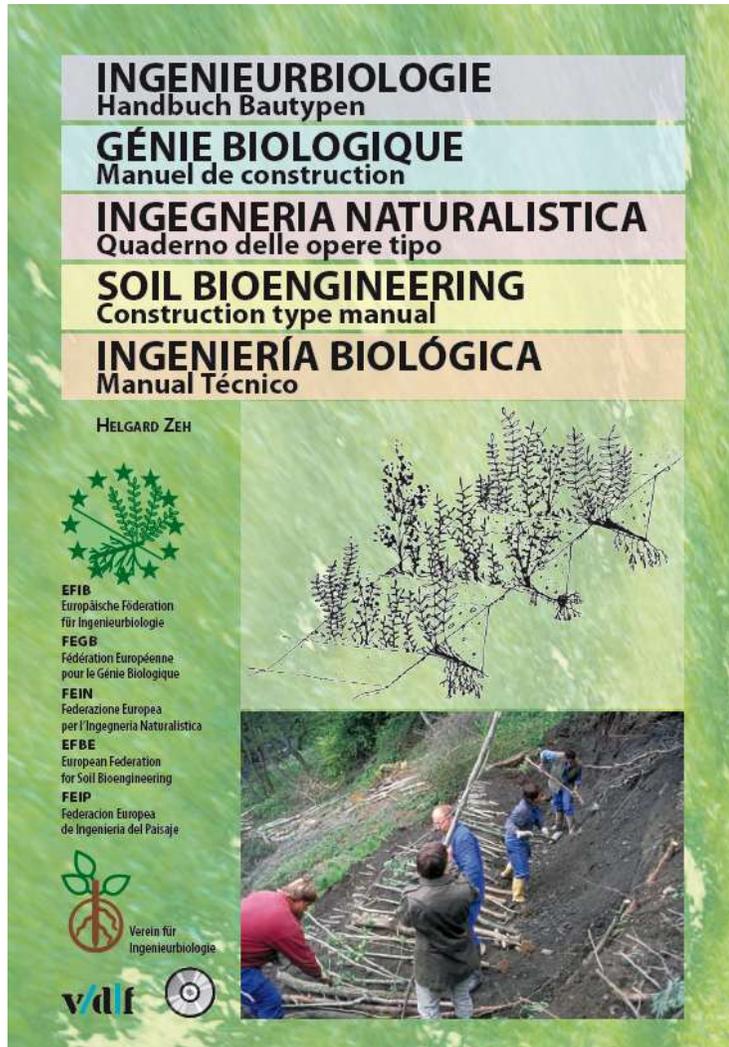
Herbacées (bien adaptées)	:	100 N/m ²
Herbacées avec géotextile	:	120 N/m ²
Saules (jeunes)	:	50-70 N/m ²
Tressage de saules	:	100-180 N/m ²
Fascines en branches de saules	:	150-250 N/m ²
Couches de branches à rejets	:	300 N/m ²

Modèles naturels



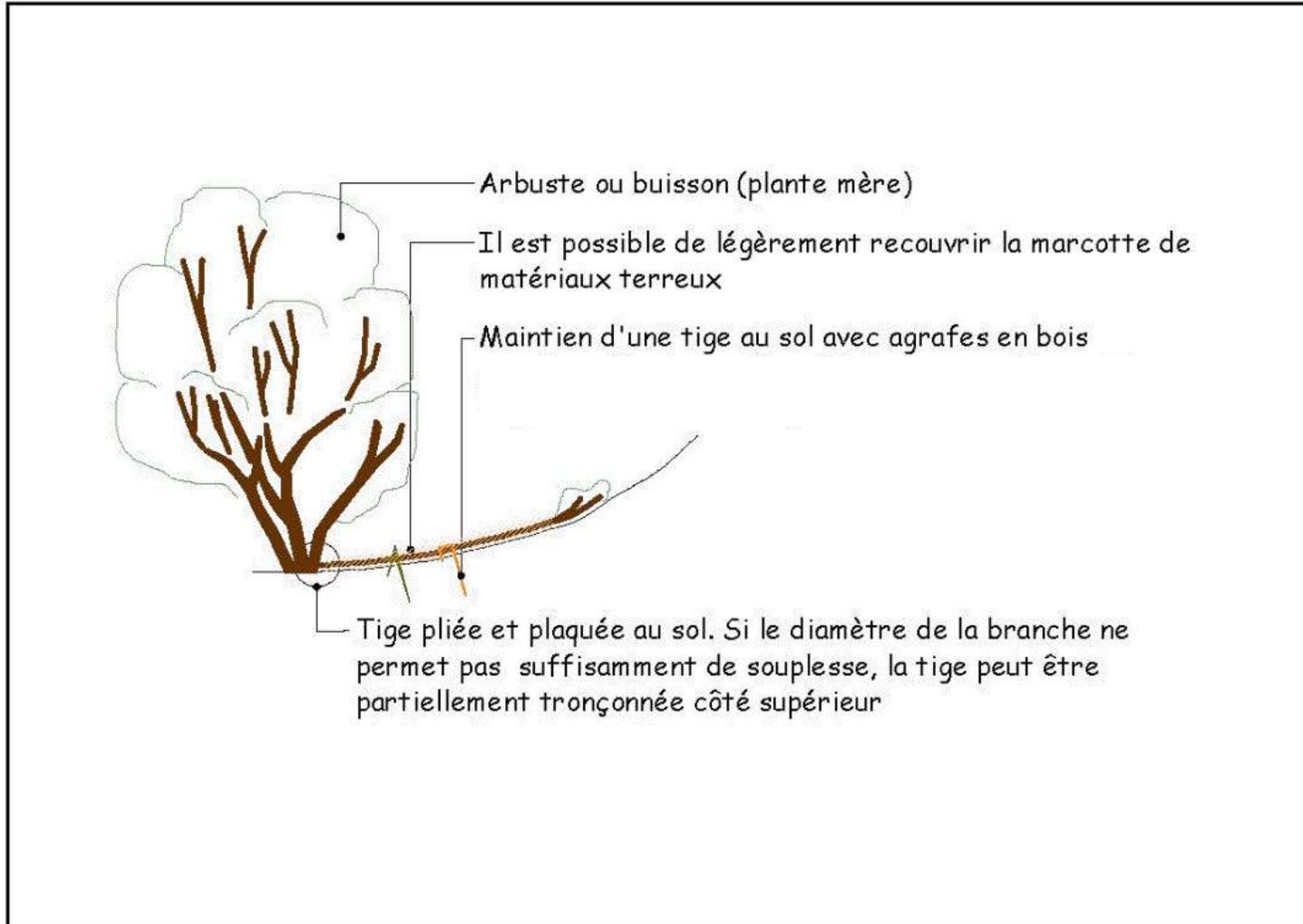
Modèles naturels

Manuel des techniques de construction
par méthode de génie biologique
225 pages, au total en 9 langues
Edition 2007, en rupture de stock
Nouvelle édition 2025 en préparation



Les techniques :

➤ Le marcottage



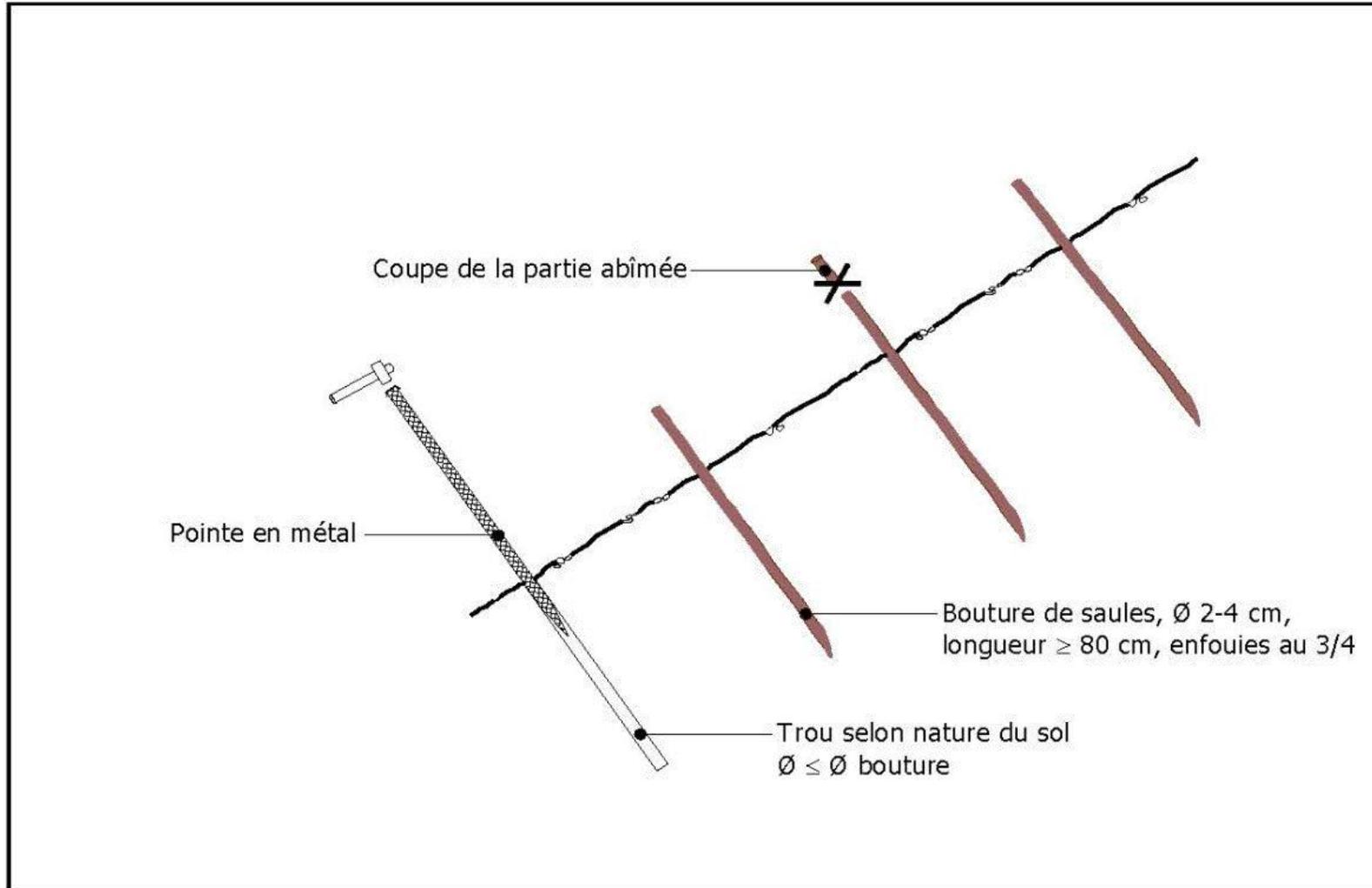
Les techniques :

➤ **Le marcottage**



Les techniques :

➤ Le bouturage de saules



Les techniques :

➤ ***Le bouturage de saules***



Les techniques :

➤ Le tressage de saules

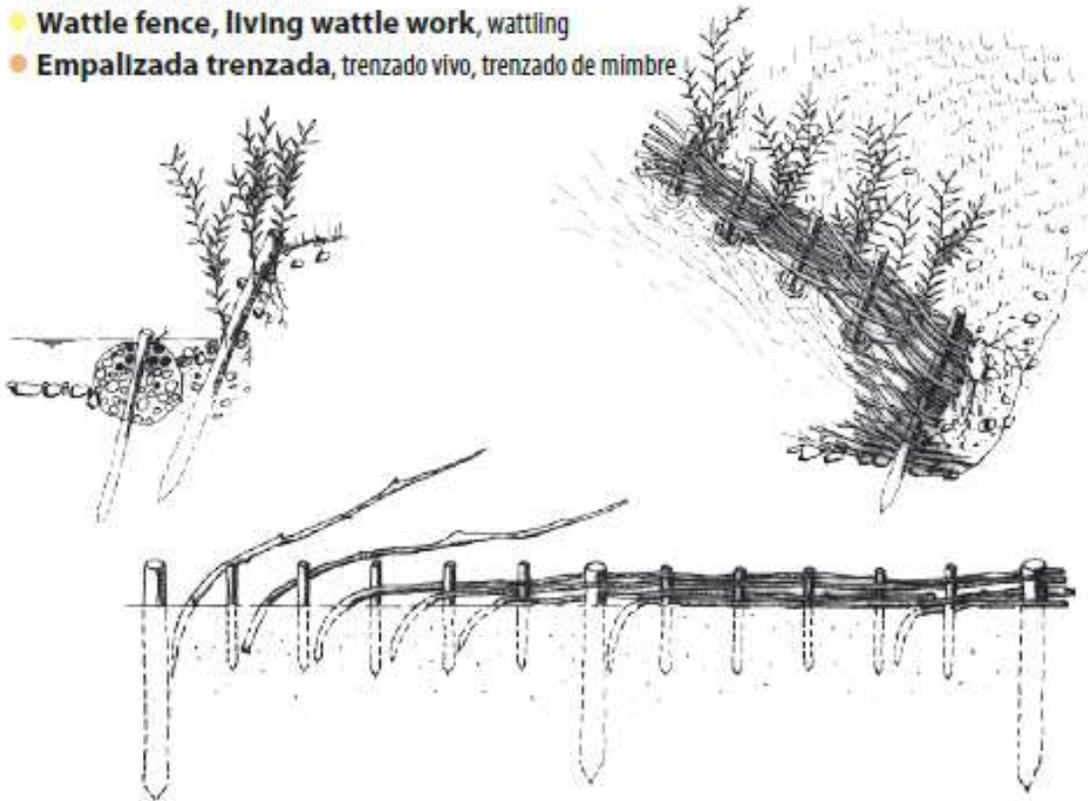
5.5 ● Flechtzaun, Lebender Flechtzaunbau, Flechtwerk

● **Tressage**, construction de tressage vivant

● **Viminata viva**, viminata

● **Wattle fence**, living wattle work, wattling

● **Empalizada trenzada**, trenzado vivo, trenzado de mimbre



Les techniques :

➤ **Le tressage de saules**



Les techniques :

➤ **Le tressage de saules**

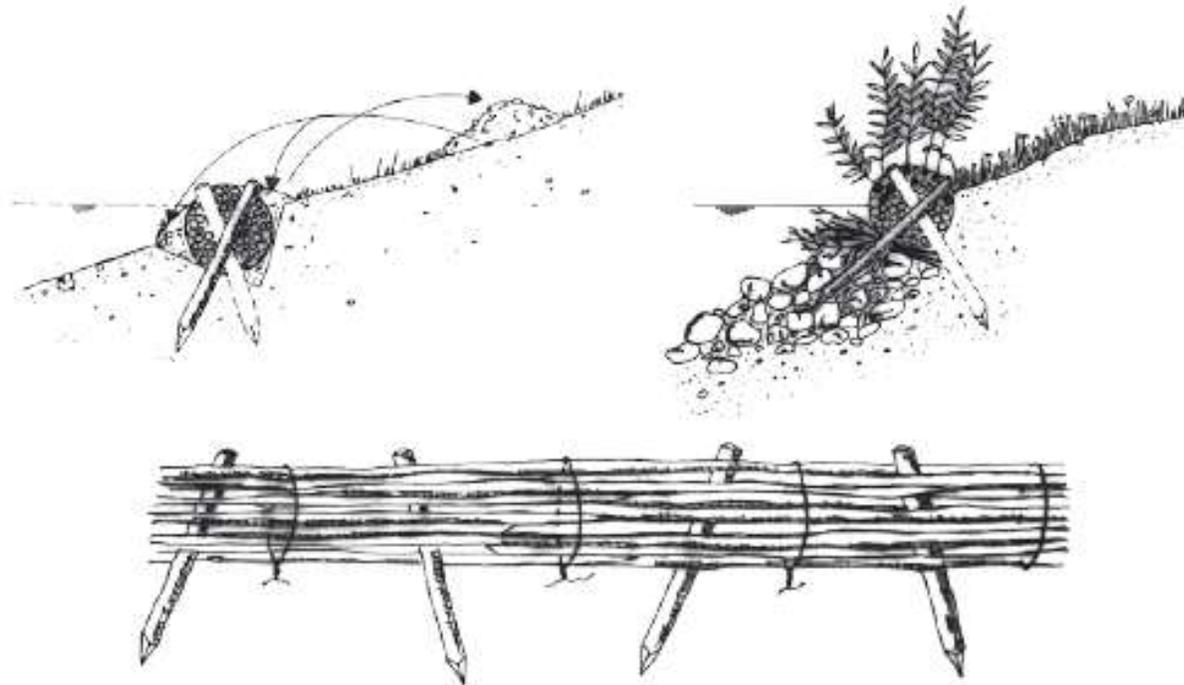


Les techniques :

➤ La fascine de saules

5.7 ● Uferfascine, Weidenfascine horizontal oder schräg, lebend oder tot, Fascinenreihe

- Fascine de pied de berge, morte et vivante
- Fascinata spondale morta o viva, orizzontale o diagonale
- Fascine along the toe of embankments, willow fascine horizontal or diagonal, array of fascines
- Fajina de ribera, horizontal o diagonal, muerta o viva, fajinas en hilera



5.10 ● Lebender Stangendrän

- Fascine vivante drainante de perche
- Drenaggio con stangame vivo
- Living pole drain
- Haz de estacas vivas de drenaje



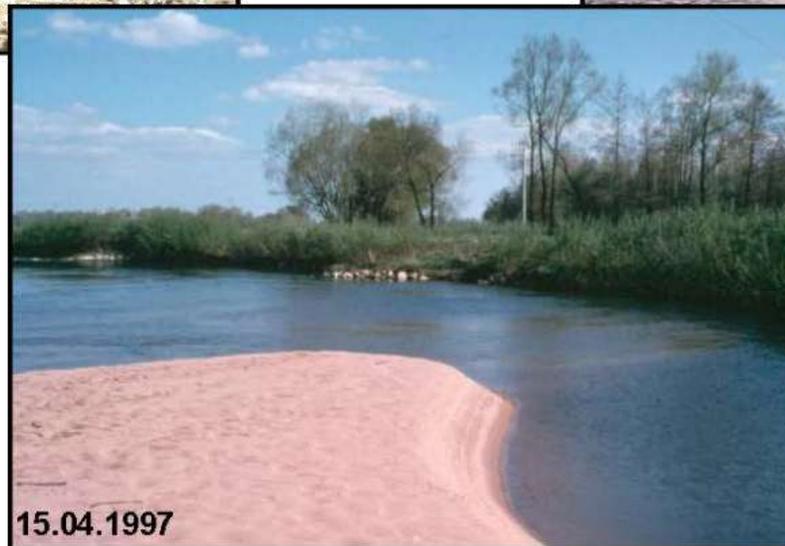
Les techniques :

➤ **La fascine de saules**



Les techniques :

➤ **La fascine de saules**



Les techniques

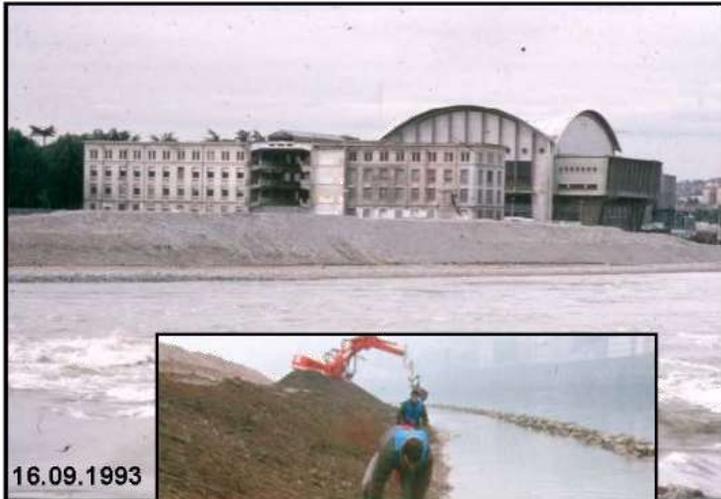
➤ *Les géotextiles biodégradables*

Les géotextiles biodégradables sont des nattes constituées de fibres naturelles. Leur emploi dans les domaines d'application des techniques végétales est aujourd'hui usuel car ils ont notamment pour fonctions principales :

- d'éviter tout risque d'érosion superficielle des sols avant la parfaite reprise des végétaux implantés (protection contre les phénomènes de ruissellement, limitation de l'impact des courants et des crues, etc.);
- de favoriser un démarrage optimal de la végétation par le micro-effet de serre qu'ils engendrent et les capacités de rétention en eau qu'ils possèdent (maintien d'une humidité au sol favorable);
- d'accompagner le développement des végétaux à moyen terme en libérant au cours de leur décomposition des substances participant à la fertilisation du sol (rôle d'engrais).

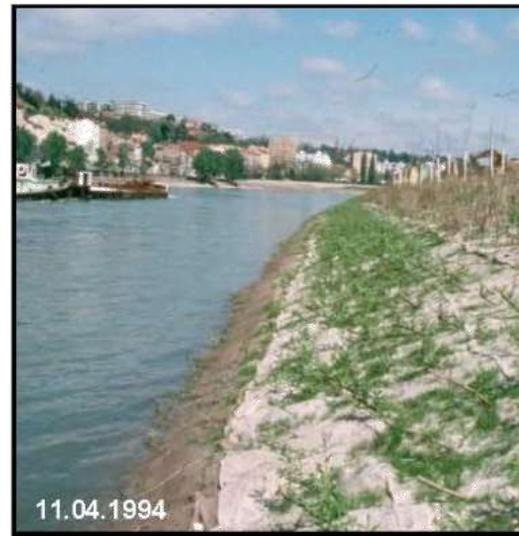
Les techniques

➤ Les couches de branches à rejets



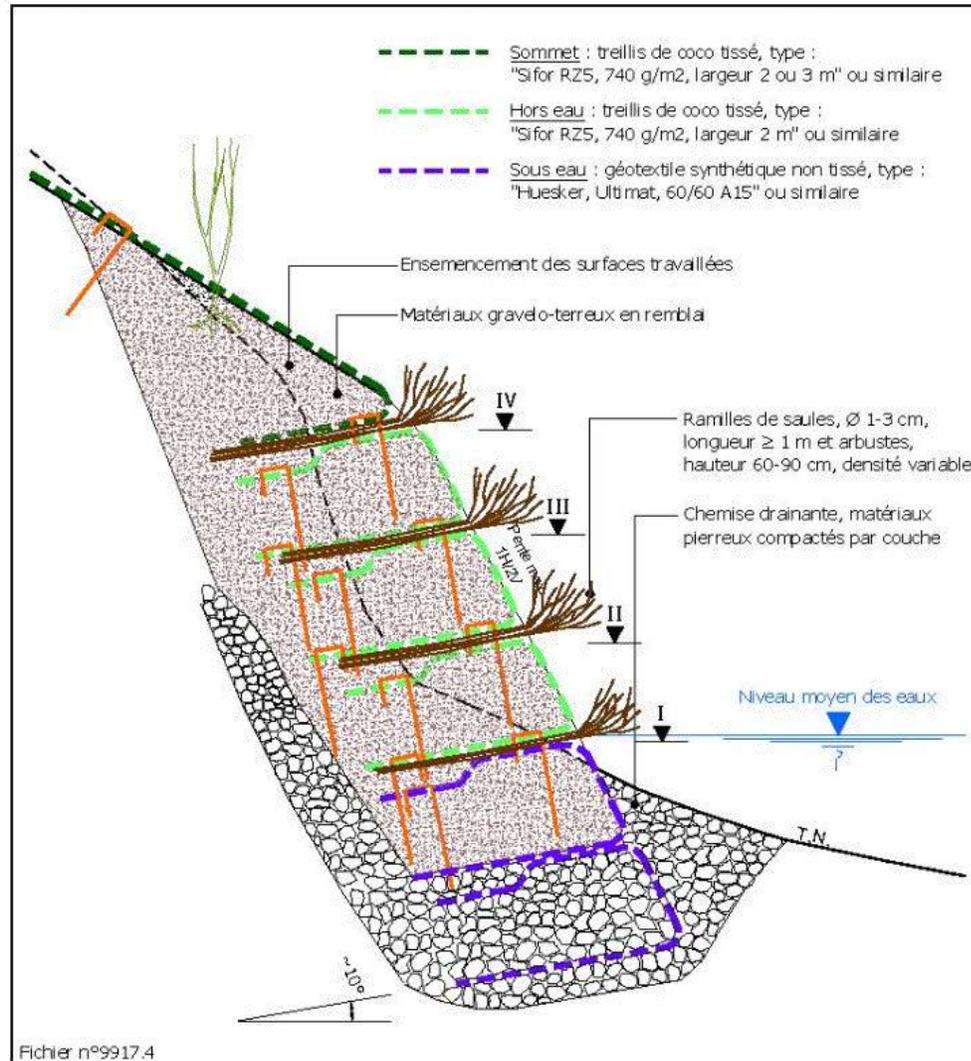
Les techniques

➤ Les couches de branches à rejets



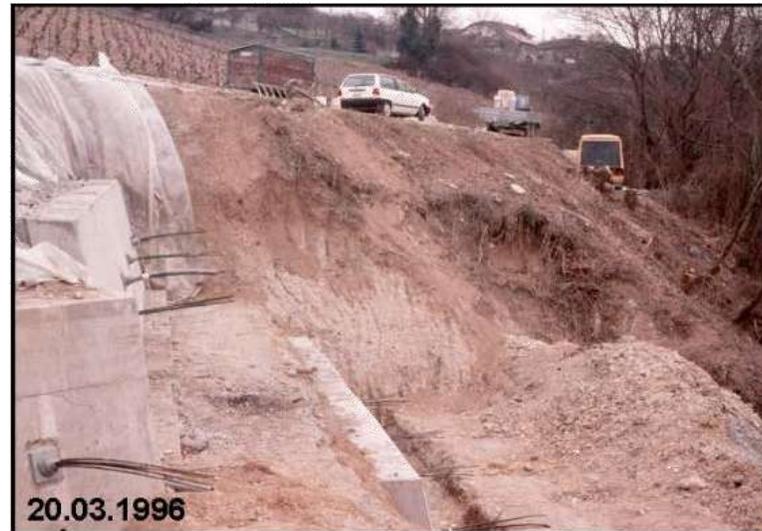
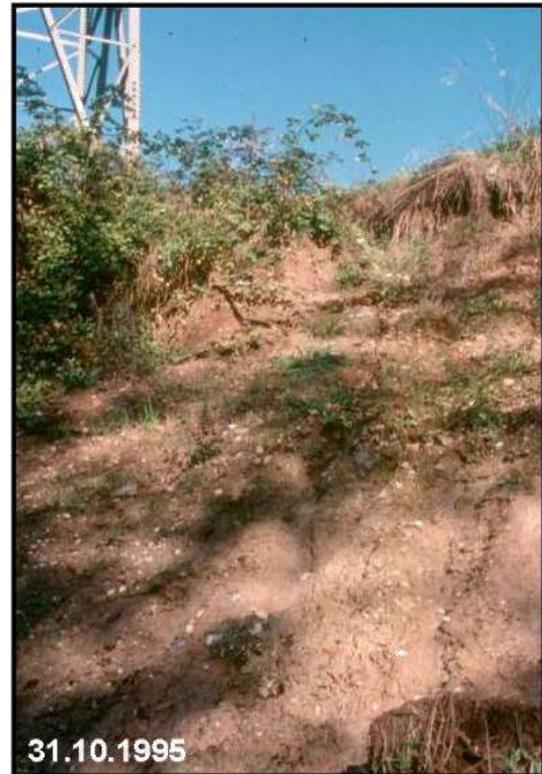
Les techniques

➤ Les lits de plants et plançons



Les techniques

➤ Les lits de plants et plançons



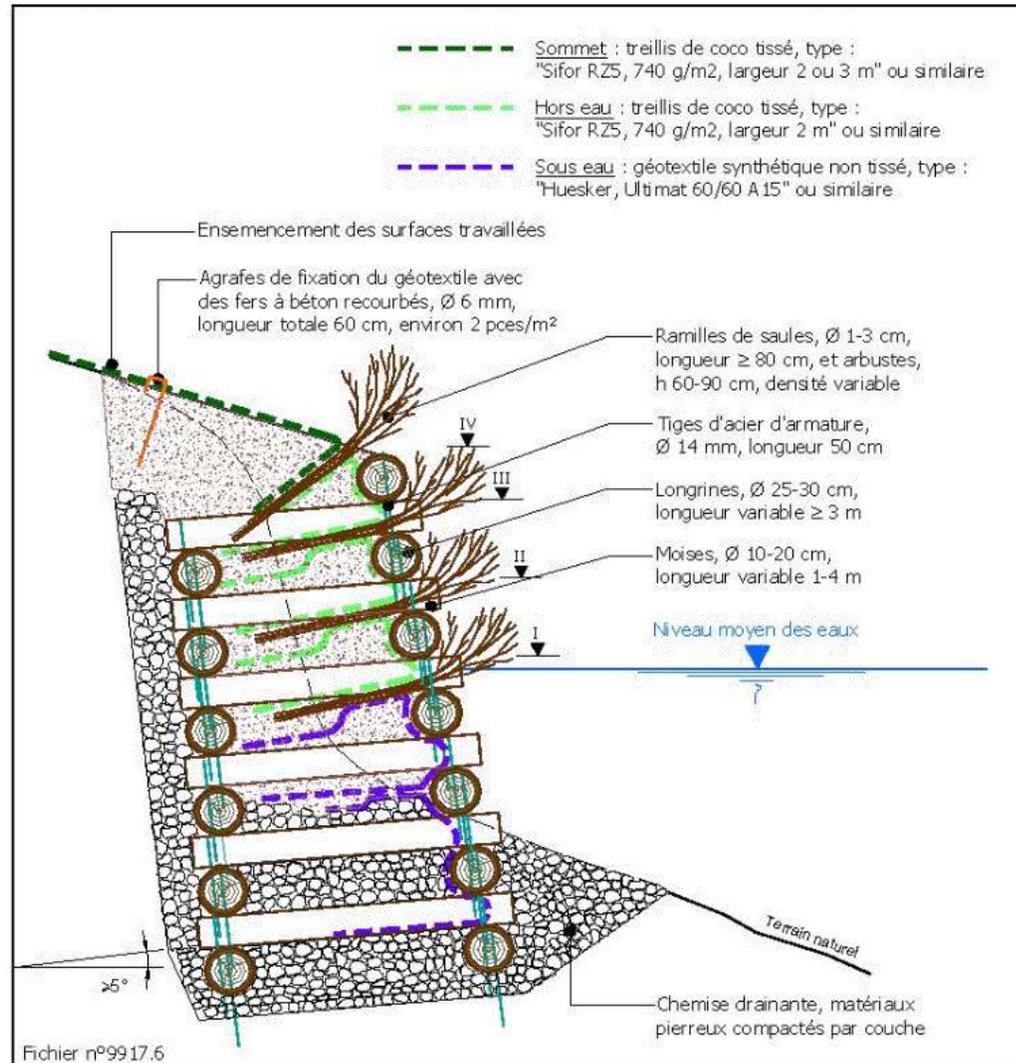
Les techniques

➤ Les lits de plants et plançons



Les techniques

➤ Les caissons en rondins



Ufersanierung Aare im Löchligut mit Holzkasten, Stadt Bern, source: Emch+Berger

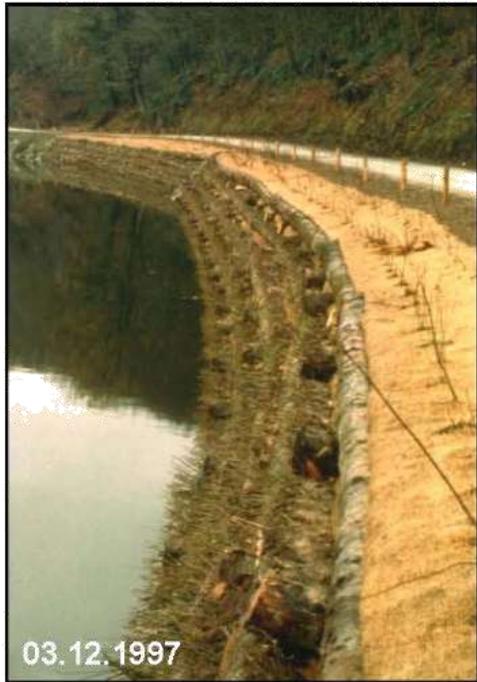
Les techniques

➤ Les caissons en rondins



Les techniques

➤ Les caissons en rondins



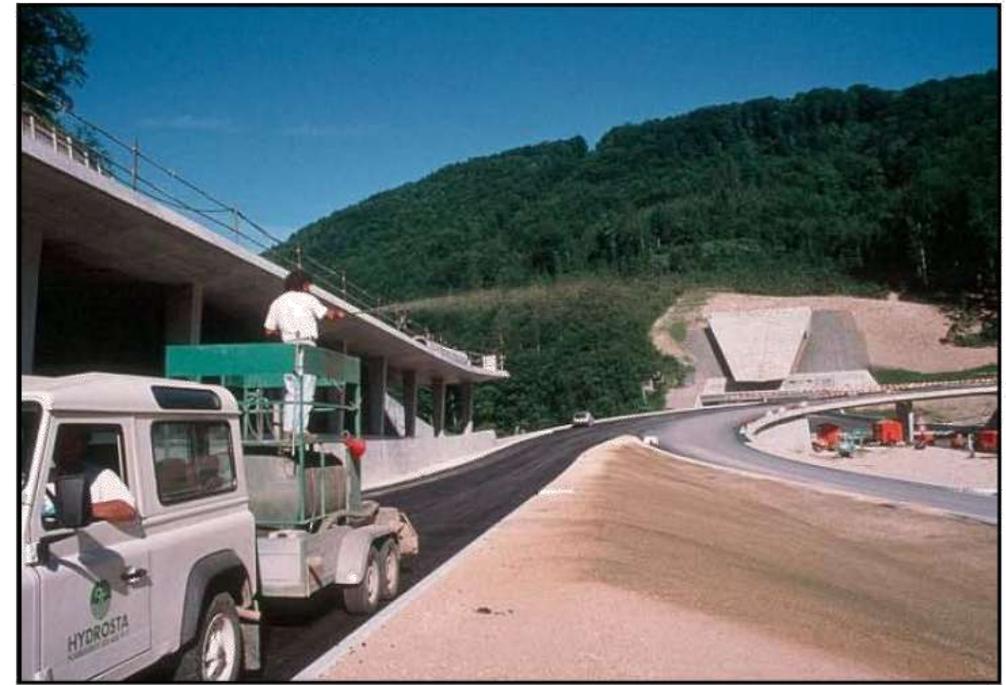
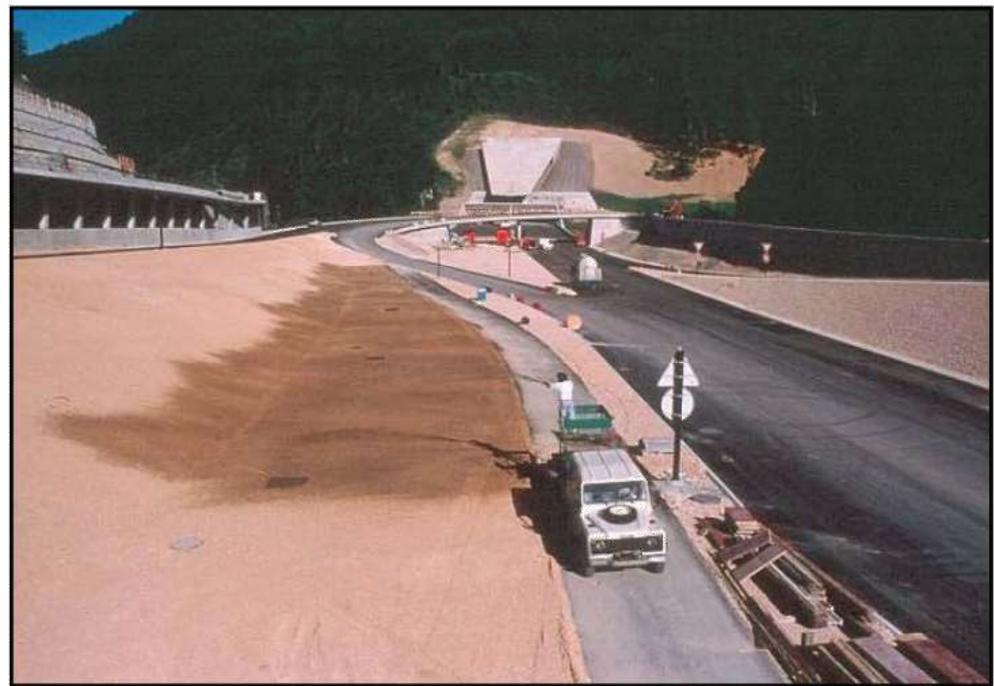
Les techniques

➤ Les fascines d'hélophytes



Les techniques

➤ Les ensemcements



Les techniques

➤ Quelques prix (en CHF)

TECHNIQUES, FOURNITURE ET POSE :

■ Bouture de saule	pce	2 - 4
■ Tressage de saules	m	100 - 120
■ Fascine de saules	m	120 - 140
■ Couche de branche à rejets de saules	m	120 - 140
■ Lit de plants et plançons	m	120 - 150
■ Caissons végétalisés	m ³ (bois)	500 - 800
■ Fascine d'hélophytes	m	120 - 140
■ Plantations :		
⇒ d'arbustes (60-90 cm)	pce	6 - 10
⇒ d'arbres (≥ 250 cm)	pce	250 - 300
⇒ d'hélophytes	pce	6 - 10
■ Ensemencement	m ²	1.50 - 2.50

AUTRES OPERATIONS :

■ Fauchage de berge	m ²	0.30 - 0.50
■ Débroussaillage	m ²	5 - 15
■ Abattage d'arbre	pce	200 - 600
■ Recépage d'arbre	pce	100 - 200
■ Terrassement de berge	m ³	5 - 12
■ Blocs d'enrochement	t	80 - 120
■ Géotextile biodégradable	m ²	10 - 15

Principales causes d'échec du génie végétal

Parmi les événements malheureux de mise en œuvre qui peuvent conduire à l'échec d'une protection de berge végétale, on peut citer de manière non exhaustive :

- l'absence de conception (absence de diagnostic, méconnaissance des techniques, etc.);
- le choix d'une technique inadaptée;
- l'absence de travaux forestiers d'éclaircissement;
- une préparation du terrain insuffisante (manque de nivellement, absence de débroussaillage préalable, etc.);
- une mauvaise méthode de réalisation;
- une période de travail inadaptée;
- un mauvais choix de végétaux;
- des erreurs de manipulation des matériaux vivants (lors de prélèvement, du transport, du stockage, etc.);
- l'absence de soins et d'entretien à la végétation nouvellement installée;
- une mauvaise connaissance des niveaux et du fonctionnement hydrique du cours d'eau;
- l'absence de connaissances fondamentales d'écologie (relations sol/eau/air/lumière).

Causes d'échec du génie végétal



Un mauvais calage des ouvrages

Un mauvais choix de végétaux



Causes d'échec du génie végétal



Une mauvaise appréciation des courants de débordements



Une mauvaise appréciation des contraintes érosives

Les techniques mixtes (génie civil + génie végétal)

- **Nécessités par :**
 - une dynamique torrentielle (fortes vitesses, forces d'arrachement et profondeur d'affouillement élevées, etc.);
 - une divagation généralisée du lit (fond mobile, chenaux multiples, variation brutale du profil en long, etc.);
 - des pressions anthropiques élevées (forte artificialisation, fortes contraintes d'usages, etc.).

- **Concrétisées principalement par :**
 - une base en enrochements et un haut de berge végétalisé;
 - des épis;
 - des seuils.

➤ ***Une base en enrochement et un haut de berge végétalisé
(exemple du Rhône à Avully)***



➤ ***Une base en enrochement et un haut de berge végétalisé
(exemple du Rhône à Avully)***



➤ ***Une base en enrochement et un haut de berge végétalisé
(exemple du Rhône à Avully)***



➤ ***Une base en enrochement et un haut de berge végétalisé
(exemple du Rhône à Avully)***



Les techniques mixtes

➤ *Des épis*



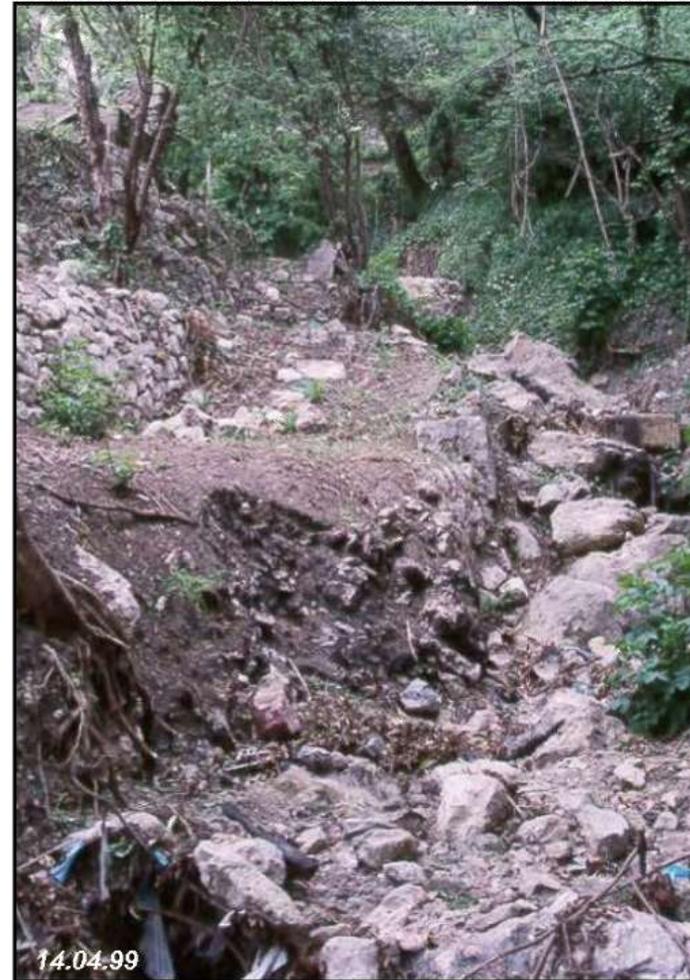
Les techniques mixtes

➤ *Des épis, exemple de la Bienne à Jeurre*



Les barrages-bois

➤ *Exemple du Rossignol à Grasse*



Les barrages-bois

➤ Exemple du Rossignol à Grasse



Débroussaillage et nettoyage du site

Réalisation de barrages en bois pour stabiliser le lit

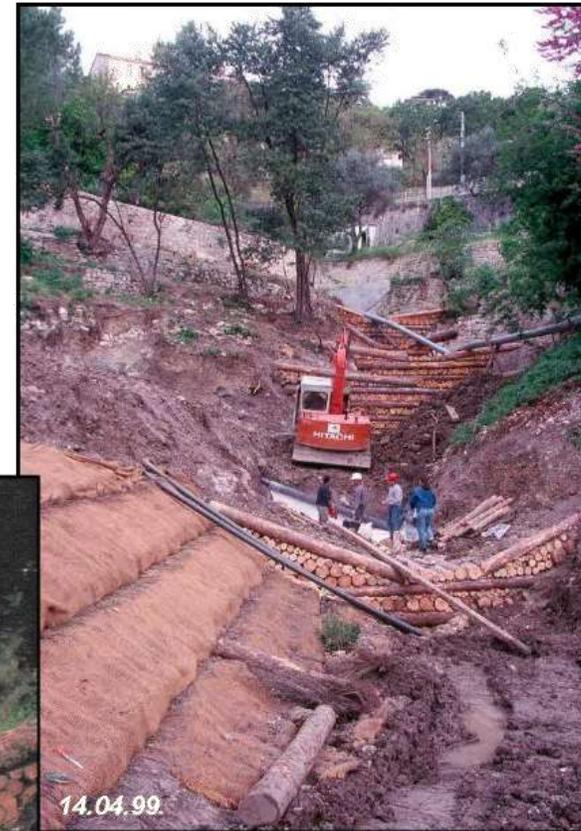


Les barrages en bois sont « encastrés » dans les murs existants

Les barrages-bois

➤ Exemple du Rossignol à Grasse

*Des lits de plants
et plançons pour
stabiliser les
glissements*



Les barrages-bois

➤ Exemple du Rossignol à Grasse

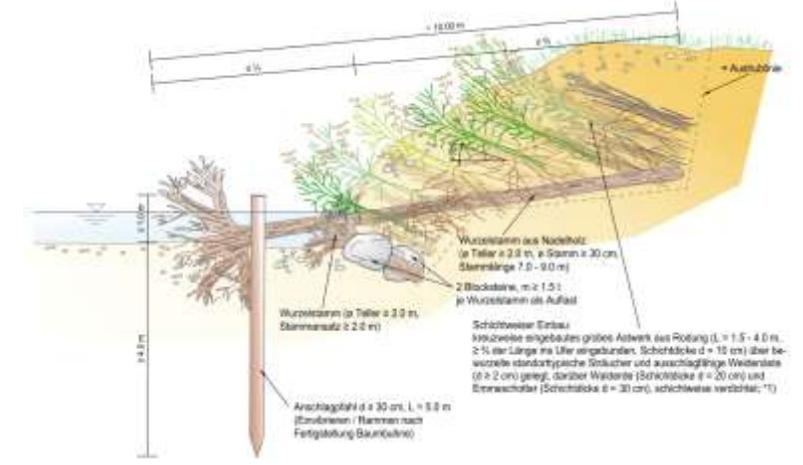
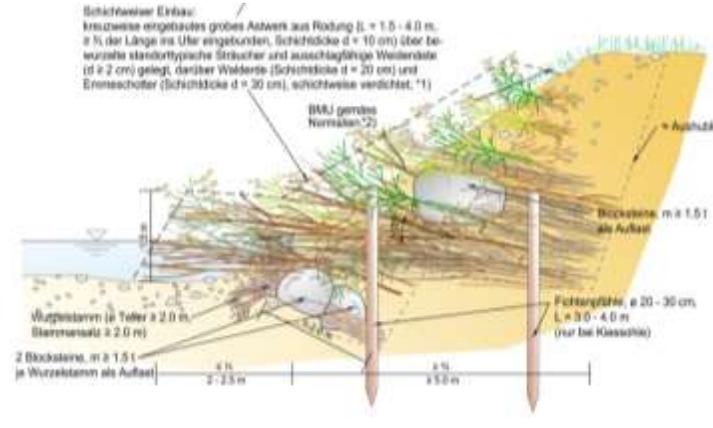
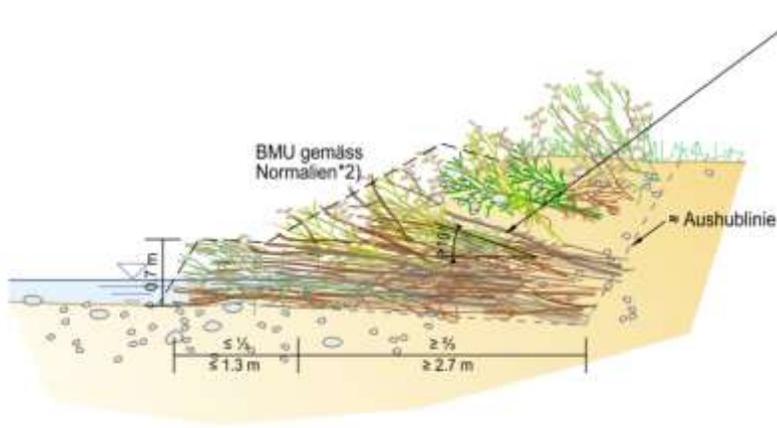
Six mois après les travaux



Cinq ans après les travaux



Erosion de berge ➤ enjeu, d'où protection



petits déflecteurs végétaux créant une rive variée et structurée



grands déflecteurs végétaux fonctionnant comme trappe à bois flottant, créant des refuges

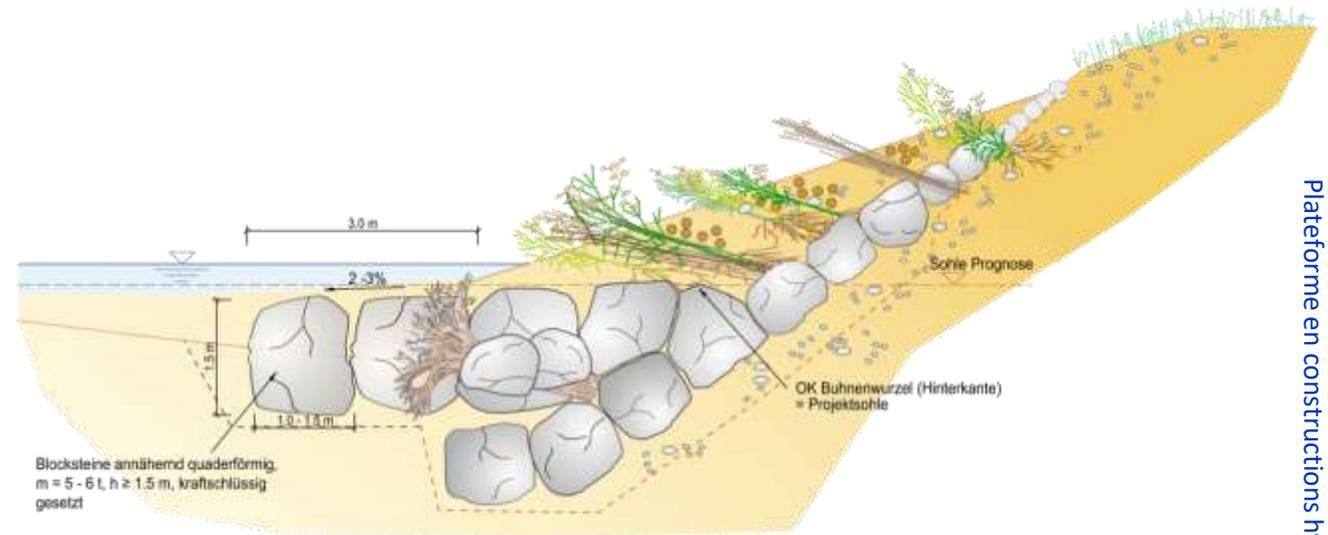


souches d'arbres fixés dans la berges
source: IUB, Hochwasserschutz und Revitalisierung Emme – Wehr Biberist bis Aare

Plateforme en constructions hydrauliques - De Cesare

Erosion de berge ➤ enjeu, d'où protection

Deuxième ligne de défense «classique» en enrochement intégrée dans la berges (5-6t en pied de berge), revitalisée en surface en contact avec le rivièrè



Protection culée du pont de l'autoroute A5, en supplément épis et déflecteurs vivants



INGENIEURBIOLOGIE
GÉNIE BIOLOGIQUE
INGEGNERIA NATURALISTICA
INSCHENIERA BIOLOGICA

Association pour le Génie Biologique

L'association en bref

- ⇒ **Promotion** de l'usage des plantes dans les travaux de terrassement et d'aménagement hydraulique.
- ⇒ Le génie biologique comme **technique d'ingénierie biologique** en complément des constructions dures.
- ⇒ **Protection** des couches de roche et de sol menacées d'érosion par une **couverture végétale protectrice** et un **système racinaire**.
- ⇒ Actuellement environ **350 membres**.
- ⇒ Membre de la **fédération européenne pour le génie biologique FEGB** (www.efib.org).



EFIB - fédération européenne
pour le génie biologique

Ce que l'association fait

- **Point de contact** pour tous ceux intéressés par le génie biologique.
- **Echange d'expérience** dans les pays alpins.
- **Publication** d'exemples de **projets** de génie biologique et **littérature spécialisée**.
- **Promotion et formation** de la théorie à la pratique.
- **Symposiums, excursions** et **cours de formation continue**.
- Attribution du **prix du génie biologique (ex-prix cours d'eau Suisse)** comme reconnaissance d'un aménagement et développement quasi-naturel jusqu'en 2015 avec les trois associations swv, vsa et pro natura



Groupes de travail

Groupe de travail pour la végétalisation en altitude (AGHB)

Le groupe se consacre à la promotion d'une végétalisation écologique adaptée aux stations d'altitude. Il attribue le **Prix de végétalisation** à des projets de reverdissements exemplaires dans les Alpes.

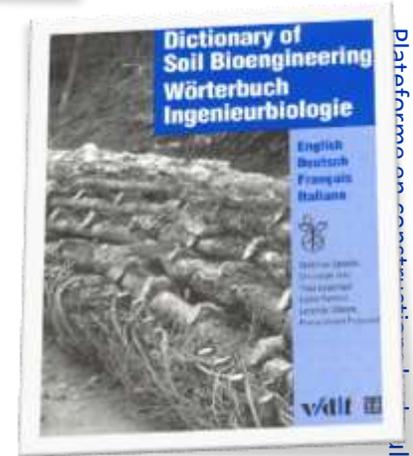
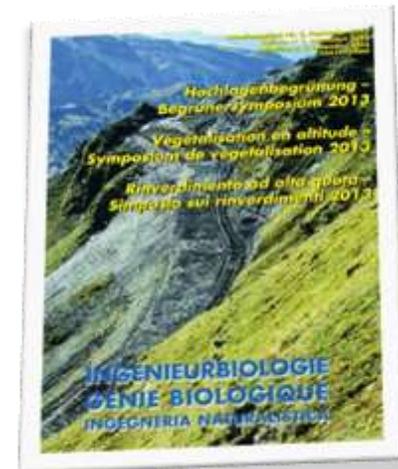
Groupe de travail sur les rives lacustres (AGS)

L'idée directrice du groupe AGS comprend la préservation et la valorisation des rives lacustres et une utilisation adaptée au contexte local.



L'Offre

- **Site internet** www.ingenieurbiologie.ch
- **Base de données littéraires** sur le génie biologique avec plus de 6000 entrées.
- **Bulletin spécialisé** trimestriel avec contributions actuelles sur le thème du génie biologique.
- **Dictionnaire** sur le génie biologique (E, D, F, I).
- **Manuel de construction** en plusieurs langues.



Contact et devenir membre

Association pour le Génie Biologique / Verein für Ingenieurbiologie

c/o OST Hochschule für Technik Rapperswil

ILF-Institut für Landschaft und Freiraum

Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil

E-Mail: sekretariat@ingenieurbiologie.ch

Internet: www.ingenieurbiologie.ch



☺ ou venez me voir, je suis le président de l'association ☺