

Historique des techniques de génie biologique appliquées aux cours d'eau

Sophie Labonne ^a, Freddy Rey ^a, Jacky Girel ^b et André Evette ^a

La lutte contre l'érosion dans les cours d'eau peut faire appel à des techniques d'ingénierie écologique qu'il faut savoir maîtriser. À cet égard, il est très utile de se remémorer les concepts et les effets des très anciennes techniques de protection dont certaines sont encore employées. Dans cet historique, les auteurs nous rappellent de manière pédagogique ces principales techniques, en se référant à de nombreuses sources datant parfois du XVII^e siècle. Cette analyse est d'autant plus intéressante qu'elle peut contribuer à nous éclairer sur l'utilisation de matériaux modernes comme les géosynthétiques.

Les végétaux vivants sont depuis des temps immémoriaux utilisés pour lutter contre l'érosion des terres, rectifier les cours d'eau, « éteindre » les torrents, préserver les dunes de l'avancée de la mer ou aménager des pêcheries sur les fleuves. Les techniques mettant en œuvre des végétaux vivants sont regroupées sous le terme de « génie végétal », composante du « génie biologique ».

Quelques repères réglementaires et bibliographiques

Des ouvrages issus du génie biologique ont été réalisés au cours des siècles selon les nécessités économiques, sociales ou de protection là où sévissait l'érosion torrentielle. En France, suite aux inondations dévastatrices du milieu du XIX^e siècle, des lois sur le reboisement et le gazonnement des montagnes ont été promulguées en 1860 et 1864, encourageant la réalisation d'ouvrages de protection et de restauration en montagne. En 1882, la loi sur la restauration des terrains en montagne (RTM) est publiée. Aux côtés ou parfois en opposition au génie civil (Fesquet, 2005), le génie biologique a connu un essor en Europe au XIX^e siècle. La redécouverte de ces techniques dans les Alpes dans les années 30, s'explique d'une part par la nécessité de protéger les hommes contre une nature extrême (torrents, avalanches) et, d'autre part, par la possibilité de disposer de matériaux sur place dans des secteurs inaccessibles, à une époque où les moyens

financiers sont limités (Stiles, 1988 et 1991). À ces justifications s'ajoute aujourd'hui la prise en compte de l'intérêt écologique de ces « forces vivantes », comme les appelait Surell en 1841.

L'atout des ouvrages issus du génie biologique réside notamment dans l'accroissement, dans le temps, de leur efficacité. En effet, les végétaux qui constituent les aménagements, utilisés sous forme de boutures, de branches ou de piquets, se développent dans les sédiments retenus, renforçant ainsi la solidité de l'ouvrage. Lorsque cette végétation meurt, l'ouvrage dure peu et nécessite un entretien onéreux (Barlatier de Mas, 1899). Le plus souvent, les ouvrages combinent différentes espèces végétales et techniques d'assemblage, afin d'atteindre des objectifs précis et satisfaire aux exigences du milieu. Les cours d'eau sont en effet caractérisés par une érosion souvent forte, due aux contraintes hydrauliques qu'ils subissent. Les niveaux de pente retenus sont inférieurs à 1,5 % pour les rivières, entre 1,5 et 6 % pour les rivières torrentielles et supérieurs à 6 % pour les torrents (Surell, 1870). L'écoulement des eaux y est permanent ou temporaire.

Il existe de nombreux documents bibliographiques, principalement français mais aussi anglo-saxons ou germaniques, traitant d'aménagements en génie biologique. Les plus anciens datent du début du XVII^e siècle, mais la source la plus importante reste le XIX^e siècle, avec les apports de Surell, Demontzey, Thiéry, Mathieu, Défontaine ou Bernard, qui sont forestiers,

Les contacts

a. Cemagref, UR Écosystèmes montagnards, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

b. Laboratoire d'écologie alpine, CNRS, UMR 5553, Université Joseph Fourier, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

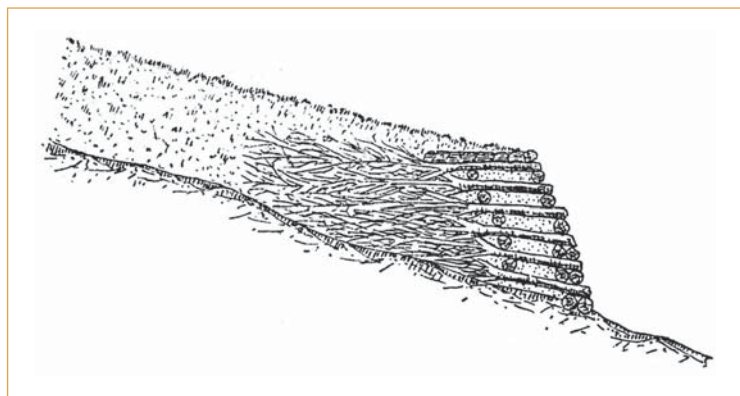
ingénieurs des Ponts et Chaussées, enseignants ou fonctionnaires des grands corps de l'État. La plupart des aménagements en génie biologique qu'ils proposent s'inscrivent dans le contexte de la RTM ; la composante torrentielle y est donc forte et la perspective globale consiste à lutter contre l'érosion par le reboisement et la stabilisation des lits torrentiels. Plus récemment, des auteurs reviennent sur l'histoire du génie biologique en Europe, nous éclairant sur la genèse des concepts et méthodes utilisés. L'histoire de la RTM, en France, est revisitée par des écologues (Vallauri, 1998 ; Rey, 2004) ; les aménagements fluviaux anciens contre les crues, en France et en Suisse, sont inventoriés (Girel, en cours ; Vischer, 2003) ; enfin, Schlüter (1984), Stiles (1988) et Lachat (1999) resituent les ouvrages de génie biologique dans leur contexte historique en Europe.

Nous proposons, dans cet article, de compléter cette bibliographie par un historique des techniques de génie biologique appliquées aux cours d'eau. Il s'agit de caractériser, de la manière la plus exhaustive possible, les principaux ouvrages anciens intégrant du génie biologique, mis en œuvre dans les cours d'eau et sur leurs berges. Nous comparons ensuite les techniques d'autrefois aux pratiques contemporaines afin d'en dégager les principales évolutions et d'en saisir la dynamique.

Les anciens ouvrages de génie biologique à rôle de protection

Nous avons répertorié les ouvrages selon leur niveau de résistance aux contraintes hydrauliques et selon leur fonction de protection. Ces paramètres sont directement liés à la localisation des ouvrages sur les cours d'eau.

▼ Figure 1 – Barrage en caisson végétalisé (Thiéry, 1891).



Stabilisation du fond du lit

Les ouvrages destinés à stabiliser le fond du lit des cours d'eau sont surtout décrits par les auteurs du XIX^e siècle. À cette époque, la lutte contre l'érosion torrentielle, dans les Alpes du Sud et en Suisse, est une préoccupation forte qui donne lieu à de nombreuses réalisations. Nombre d'entre elles sont situées dans des zones de ravines (petits bassins versants) à forte érosion, où les écoulements sont peu fréquents mais violents, et où les blocs ne sont pas disponibles (substrat marneux ou marno-calcaire).

LES GARNISSAGES DE BRANCHES

Les garnissages de branches agissent en freinant l'écoulement de l'eau et en piégeant les sédiments. Ils sont réalisés en plaçant, dans le lit du torrent, des branches tournées vers l'amont, dont la base est maintenue par des piquets (Mathieu, 1864 ; Thiéry, 1891). Ces ouvrages sont aussi appelés « façonnages de lit » dans les publications de la RTM.

LES BARRAGES EN CAISSONS VÉGÉTALISÉS

Les barrages ont pour objectif de bloquer le profil en long du cours d'eau pour éviter les érosions ultérieures. Des barrages très solides, en caissons végétalisés (figure 1), ont été construits en Suisse. Le premier réalisé se trouve dans le torrent de Rœtzligrund et mesure 10 m de hauteur sur 40 m de large ; c'est le plus grand ouvrage de ce type recensé à la fin du XIX^e siècle. Il est constitué de couches de troncs d'arbres superposées, branches tournées vers l'amont, enfoncées dans les alluvions. Des pièces transversales, dont les extrémités sont engagées dans les berges, maintiennent chaque couche (Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927).

LES BARRAGES EN FASCINAGES

Les fascines sont constituées de fagots d'environ 1 m de circonférence, généralement en saule vivant, empilés à l'amont de piquets (Forest de Béliador, 1730 ; Depelchin, 1887 ; Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927). En piégeant les éléments fins entre leurs branches enchevêtrées, ces ouvrages constituent des barrages solides.

En 1730, Forest de Béliador préconise l'utilisation de fascines comme « faux radiers », pour limiter l'affouillement aux pieds des écluses. Posées sur un lit de glaise battue, elles sont constituées de chêne, frêne, saule ou aulne. Elles sont conçues pour résister à trois sortes de courants : ceux du fond du cours d'eau, les flux et reflux maritimes et enfin le courant provoqué par le lâcher de la retenue.

Il cite aussi en exemple la construction de « faux radiers » à Gravelines, par Vauban, en 1699.

Considérés comme plus économiques et plus rapides à construire, les fascinaiges sont cependant, pour Depelchin (1887), moins résistants que les clayonnages, que nous étudions plus loin. On distingue, selon leurs dimensions, les fascinaiges de 1^{er} ordre et les fascinaiges de 2^e ordre :

– **les fascinaiges de 1^{er} ordre** (figure 2) sont constitués de 3 à 5 fagots de branches de saules superposées, de 1 m de circonférence. Ces fagots sont disposés perpendiculairement au lit du torrent, attachés à des piquets en bois dur ou en saule, plantés tous les mètres et formant une ligne légèrement convexe à l'amont. Ils sont encastres de chaque côté dans les berges et la hauteur de l'ouvrage est d'environ 1,5 m ;

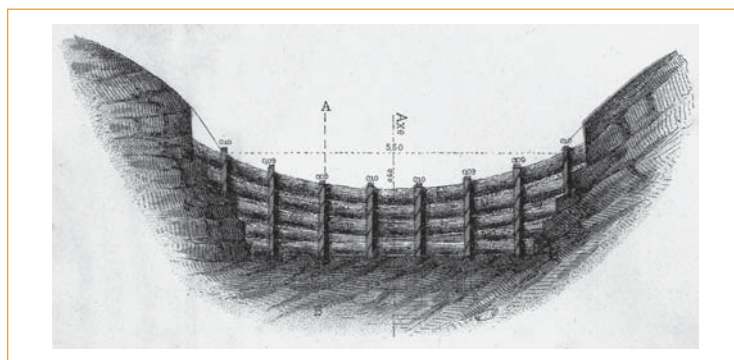
– **les fascinaiges de 2^e ordre** ne comprennent que 2 fagots fixés au sol par des piquets de saules qui les traversent (Bechmann, 1887 ; Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927).

LES BARRAGES EN CLAYONNAGES

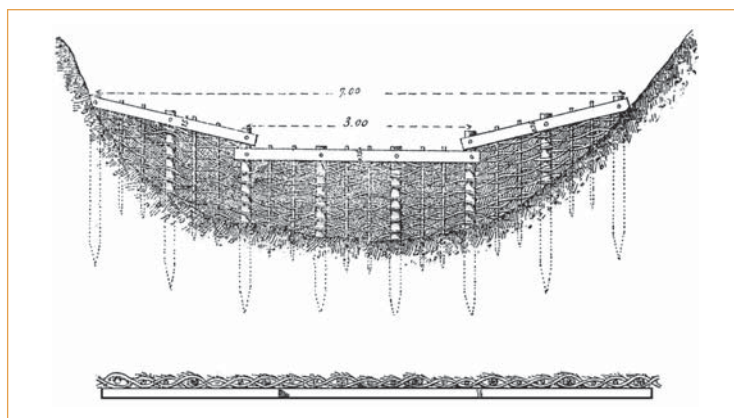
Les clayonnages sont constitués d'une rangée de piquets autour desquels des branches (les clayons), généralement en saules, sont entrelacées. Comme les fascinaiges, les clayonnages se déclinent en clayonnages de 1^{er} ordre et clayonnages de 2^e ordre :

– **les clayonnages de 1^{er} ordre** (figures 3 et 4) peuvent mesurer de 20 à 30 m de longueur sur 1,50 m de hauteur. Ils sont implantés perpendiculairement à l'axe du torrent et constitués de gros piquets de bois dur (chêne ou mélèze), plantés tous les mètres, entre lesquels on espace 3 plançons¹ de saule. Les piquets, autour desquels des branches de saules sont tressées, sont reliés à leur tête par des longrines² en chêne ou en mélèze (Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927) ;

– **les clayonnages de 2^e ordre** mesurent 0,50 à 0,60 m de hauteur. Ils sont constitués uniquement de piquets en saule et ne comportent pas de longrines (Depelchin, 1887 ; Thiéry, 1891 ; Kuss, 1903 ; Bernard, 1927).



▲ Figure 2 – Barrage en fascinaige de 1^{er} ordre (Demontzey, 1875).



▲ Figure 3 – Barrage en clayonnage de 1^{er} ordre à 1 parement (Thiéry, 1891).

Demontzey décrit, en 1875, un projet de grande envergure situé dans le torrent du Bourget, à l'exemple de celui, plus petit, réalisé dans le torrent du Labouret (Alpes de Haute-Provence). L'ouvrage, situé entre deux barrages, a pour objectif de ralentir l'écoulement de l'eau ; il comprend des clayonnages transversaux, des clayonnages longitudinaux et des lignes obliques de boutures de saules sur les berges. Les clayonnages transversaux, de 2^e ordre, sont implantés sur les atterrissements des barrages, espacés de 5 m. Pour limiter l'affouillement, la hauteur des clayonnages ne dépasse pas 0,50 à 0,60 m et leur pied est garni de pierres. Il est nécessaire d'entretenir ces ouvrages annuellement. Demontzey recommande ces clayonnages qui dispensent de la confection de radiers³ au pied des barrages.

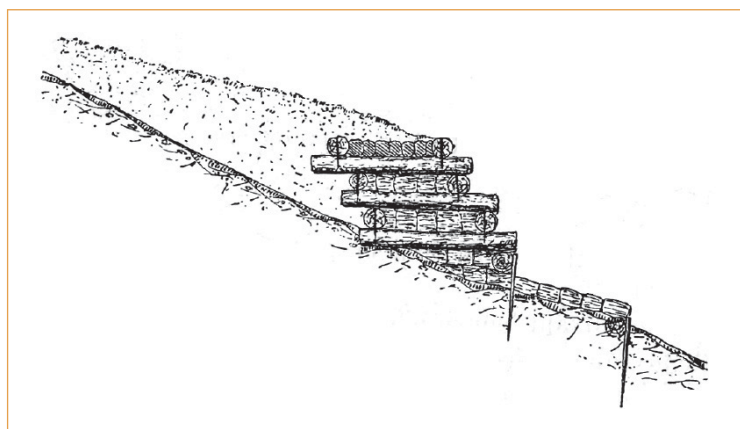
1. Le plançon, appelé aussi plantard, est une branche de saule utilisée comme bouture (Lachat, 1994).

2. Les longrines sont des pièces de construction horizontales, reposant sur plusieurs points d'appui sur lesquels elles répartissent une charge (Le Petit Larousse).

3. Le radier désigne la partie inférieure, plutôt horizontale et généralement bétonnée ou maçonnée d'un ouvrage de transport d'eau (canal, coursier d'un évacuateur de crue) ou d'un seuil mobile. Parfois, ce mot est utilisé pour désigner le fond d'un cours d'eau sur lequel l'eau s'écoule rapidement (Degoutte, 2006).

► Figure 4 – Clayonnages dans le torrent de l'Echarina, Isère (Kuss, 1903).

4. Le gabion est un panier en grillage métallique dans lequel on entasse des cailloux pour former des murs (Lachat, 1994). Avant le XIX^e siècle, les gabions étaient en osier.



▲ Figure 5 – Barrages en bois avec fascines (Thiéry, 1891).

5. Les moises sont des pièces de charpente assemblées de façon à enserrer et à maintenir d'autres pièces (Le Petit Larousse). Il s'agit là de poutres en bois.
6. Un épi est un ouvrage transversal au courant, enraciné dans la berge, ne barrant qu'une partie du lit et au moins partiellement submersible (Degoutte, 2006).

Toutefois, ils ne conviennent pas pour les cours d'eau charriant de gros matériaux (Demontzey in Mathieu, 1875).

LES TECHNIQUES COMBINÉES

Les ouvrages cités précédemment peuvent se combiner entre eux ou être renforcés par d'autres techniques végétales (figure 5) ou par des opérations de génie civil. Ainsi, les barrages peuvent être consolidés par des gabions⁴ ou des clayonnages (Bechmann, 1905). De même, mais cela en réduit la résistance, il est possible d'intercaler des rangs de fascines entre les couches de troncs d'arbres. Des traverses en bois séparent alors chaque couche et une assise de fascines, ajoutée au pied de l'ouvrage, le protège des affouillements (Thiéry, 1891).

On peut également renforcer la résistance des clayonnages de 1^{er} ordre en leur ajoutant différents éléments. Ainsi, les clayonnages de 1^{er} ordre à un parement peuvent être précédés, 1,50 m en amont, d'une rangée de piquets reliés à la longrine par des moises⁵. L'ouvrage est remblayé et bouturé à l'amont, de façon à le protéger contre les crues. Ces clayonnages peuvent aussi être surmontés de longrines encastrées dans les berges. Enfin, les clayonnages de 1^{er} ordre à 2 parements, d'une hauteur supérieure à 1,50 m, sont composés de 2 clayonnages distants de 1 m, reliés par des pièces transversales. Des lits de boutures sont implantés entre les 2 parements (Thiéry, 1891).

Canalisation de l'eau

Des ouvrages de génie biologique ont été utilisés pour réguler ou orienter le cours des rivières, éviter leur dispersion ou au contraire, les diriger sur des champs de divagation (Mathieu, 1875). Ils permettaient également de protéger les rives et de reconquérir des terres qui avaient été ravagées par les eaux.

LES ÉPIS EN FASCINES

Afin de réduire la vitesse du Rhin, Forest de Béliador préconise, dès 1730, la confection d'épis⁶ en fascines, aussi dénommés *tunes*. Un siècle plus tard, Défontaine (1833) les recommande en guise de barrage pour fermer les « faux-bras » de ce fleuve. Ces ouvrages sont constitués d'un couchis de fascines chargé d'un lit de graviers et traversé par de gros piquets en saule reliés par des clayons ; ils sont ancrés dans les berges. Ils sont simples à réaliser, économiques et efficaces, mais pour Défontaine, ces ouvrages ne sont pas destinés à durer (Forest de Béliador, 1730 ; Bourdet, 1773 ; Défontaine, 1833). Les épis en fascines conviennent aux rivières calmes à faible charriage et non aux torrents et rivières de montagne (Surell, 1872).

LES DIGUES EN GABIONS ET FASCINES

Avec un objectif semblable mais plus adapté aux contraintes torrentielles des Alpes de Haute-Provence, Dugied décrit, en 1819, les digues en gabions et fascines qui ont été réalisées avec succès le long de la rivière très rapide de l'Asse. Schématiquement, elles sont composées de gabions coniques en osier de 5 m de longueur, placés côte à côte, la pointe orientée vers la rivière, sur un glacis de buissons. Ces gabions sont progressivement remplis de plusieurs tonnes

de pierres, puis des boutures de saules et de peupliers sont enfoncées dans les intervalles, au travers du glacis. À la première crue, les limons emplissent les espaces vacants. On implante alors, entre les pointes des gabions, de nouvelles boutures de saules ou de peupliers dont la reprise est ainsi favorisée. À la crue suivante, l'eau ne traverse plus l'ouvrage, dont la solidité se renforce d'année en année.

LES « SAUCISSONS »

Les « saucissons » (figure 6) sont fréquemment utilisés au XIX^e siècle, dans les bassins supérieurs du Rhin. Ces ouvrages, d'un diamètre de 1 à 1,20 m, sont constitués de terre et de pierres ou de sable enveloppés de branchages. Ils sont resserrés tous les mètres grâce à un fil de fer. Selon leur usage, ils sont utilisés seuls ou par groupes de trois saucissons superposés, sur les cônes de déjection de torrents, le long des berges ou à la base de barrages (Mathieu, 1875).

Stabilisation des berges

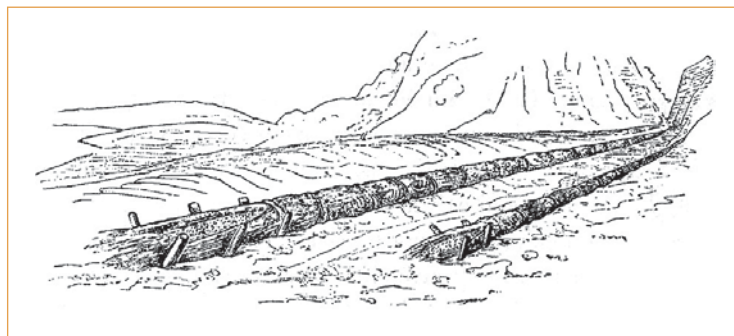
LE BOISEMENT

La végétalisation, qualifiée de boisement dans les ouvrages anciens, est préconisée depuis fort longtemps contre l'érosion des berges. Elle peut être obtenue par différents moyens, depuis la plantation élémentaire jusqu'à la combinaison de différentes techniques de génie biologique.

• La plantation

Dès le XV^e siècle, en Italie, Léonard de Vinci recommande de planter des saules afin d'empêcher l'érosion des berges des fleuves (Grabrecht, 1981, *in* Schlüter, 1984). De même, le roi de Prusse ordonne, en 1735, de planter des saules afin de « fortifier les rives » (Stadelmann, 1878, *in* Schlüter, 1984). Toujours dans cet objectif, Dugied préconise, en 1819, en plus des saules et des peupliers, les plantations de vernis de Chine⁷ et de mûrier à papier⁸ car ces deux essences à croissance rapide produisent un grand nombre de drageons et forment rapidement d'épaisses barrières (Dugied, 1819).

Woltmann décrit, en 1791, un ouvrage original conçu par Bettoni, en vue de maintenir les berges et de ralentir le courant. Le long des berges, perpendiculairement au cours d'eau, des fossés sont creusés, dans lesquels on installe des saules avec racines ou de grandes branches dont les feuillages aboutissent dans le fleuve. Les fossés sont ensuite



▲ Figure 6 – Établissement d'un système de saucissons parallèles sur un cône de déjection de torrent (Mathieu, 1864).

comblés par de la terre, permettant le développement des saules et la consolidation de la berge. Le long du cours d'eau, les branches s'entrecroisent pour former une barrière qui empêche l'érosion de la berge (Schlüter, 1984).

• Le bouturage

En 1600, en France, Olivier de Serres préconise d'implanter des boutures ou des rejets de végétaux, tamaris, saules, aulnes et osiers connus pour leurs racines fortes, leur flexibilité et considérés comme des « arbres aquatiques ». Les rejets sont ôtés à la main durant les deux premières années. En 1772, Silberschlag recommande de mettre en terre des boutures de saules sur les rives puis d'en marcotter les branches de façon à rendre la berge infranchissable. Les branches pourront aussi être utilisées pour la confection de fascines (Schlüter, 1984).

• Les techniques combinées

Scheyer a réalisé, en 1774, des ouvrages destinés à la protection des rives. L'un d'eux est constitué de rejets de saules plantés en croisillons sur le bord du fleuve, entre lesquels un mélange de trèfles et de graminées est semé. En terrain abrupt ou fortement affouillé, il propose de mettre en terre des boutures de saules, puis de plaquer des branches entre les boutures pour empêcher l'érosion (Schlüter, 1984). En 1792, August décrit différents ouvrages destinés à consolider les berges, parmi lesquels l'implantation de souches, fixées par des piquets de saules puis couvertes de sable. Des boutures de saules sont ensuite enfoncées entre les souches, formant un maillage large, puis les branches sont marcottées (Schlüter, 1984).

Le boisement de berge peut également être réalisé à partir d'un garnissage de branches vivantes. Celles-ci sont destinées à produire des rejets ou

7. Il peut s'agir d'*Ailanthus altissima*, ou faux vernis du Japon, caractérisé par un fort pouvoir drageonnant.

8. Il s'agit du mûrier blanc, *Morus Alba*.

utilisées comme support de substrat pour une plantation. Dans le premier cas, on couvre le sol de branches de saules, gros bouts tournés vers le cours d'eau, fixés au sol. Hormis la pointe des branches, l'ensemble est recouvert de terre ; l'enracinement est ensuite assez rapide et les branches fournissent un grand nombre de rejets qui peuvent être repiqués dans les intervalles des ramilles, puis marcottés dans tous les sens. Ce boisement peut être complété par un embroussaillage avec des plants racinés d'aulne, de cytise ou de frêne. Dans le cas où les branches servent en priorité de substrat à la plantation, elles sont disposées sur les parties « déchirées » de la berge et leur base est appuyée sur un obstacle inaffouillable. Le sol en amont des branches s'érode, comblant de matériaux le tapis de branches pour constituer un milieu stable, poreux et fertile dans lequel auront lieu les plantations (Bernard, 1927).

LES FASCINAGES ET CLAYONNAGES SUR BERGES

Les fascinaiges et les clayonnages présentés précédemment peuvent également avoir pour objectif de fixer les berges en limitant leur affouillement, en diminuant la pente du talus par la formation de petits atterrissements à l'amont des ouvrages, en créant des obstacles pour briser l'écoulement des eaux ou en canalisant les eaux de ruissellement pour assécher le terrain.

• Les fascinaiges

Les fascines, utilisées pour protéger les rives contre l'érosion, sont reliées entre elles et peuvent être fixées au sol par des clayonnages (figure 7).

Les Romains utilisaient déjà des fascines et des faisceaux de saules pour les hydroconstructions. De même, en Chine, des tapisseries anciennes montrent des ouvriers chinois, en 28 avant J.-C., utilisant des faisceaux de saules pour stabiliser les berges de la Rivière Jaune (Finney, 1993).

En 1774, Frisi, qui parcourt l'Italie du Nord et commente les ouvrages en place, recommande la

► Figure 7 – Fascines tenues par des piquets clayonnés (Barlatier de Mas, 1899).



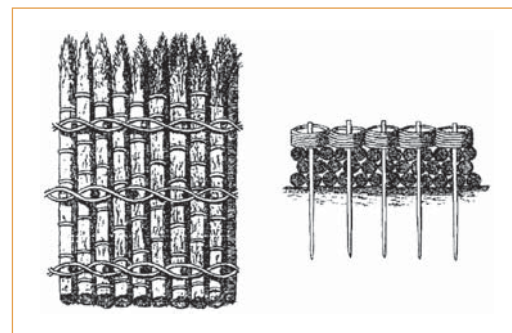
pose de fascines sur les berges au détriment des « éperons » qui provoquent des affouillements importants. Il signale en outre qu'à son époque, le fascinaige le plus important est situé sur la Meuse, à Rotterdam.

• Les clayonnages

Les matériaux et techniques employés pour la confection des clayonnages (figure 8) varient peu dans l'histoire.

Des vestiges de panneaux clayonnés datant du début de l'époque mérovingienne ont été trouvés lors de fouilles le long de la Seine à Paris et un tressage du VII^e siècle a été retrouvé le long d'un ancien cours d'eau, dans le Jura Suisse, à l'occasion de la construction de l'autoroute A16 (Lachat, 1999 ; Pion, 2004). En 1600, Olivier de Serres évoque l'établissement de buissons attachés à « des pieux et des osiers », pour protéger la chaussée des étangs des « coups de l'eau ».

Les clayonnages sont considérés, à la fin du XIX^e siècle, comme un excellent moyen pour protéger les talus ouverts de grande hauteur ainsi que les terrains attaquables par les eaux (Mathieu, 1875 ; Pontzen, 1891 ; Arnould, 1913). Ils ont aussi l'avantage d'être plus économiques que les ouvrages en pierre, mais en revanche, ils nécessitent de trouver les essences adéquates à proximité du lieu d'utilisation (Thiéry, 1891).

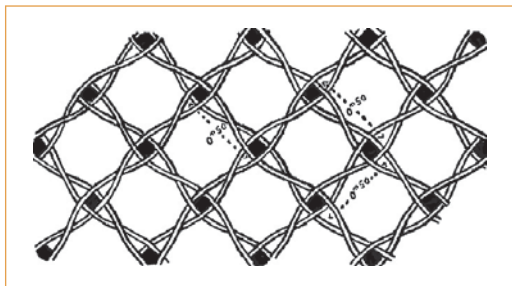


▲ Figure 8 – Fascinaiges et clayonnages (Forest de Béliador, 1730).

Les piquets sont généralement des boutures de saule ou de robinier, de 2 à 4 cm de diamètre, enfoncés de 15 à 30 cm dans le sol et espacés de 40 à 80 cm, selon la pente. Des branches flexibles, ou clayons (ou gaullettes – Arnould, 1913), sont entrelacées autour de ces piquets.

Contrairement aux clayonnages utilisés pour la stabilisation des fonds de lit, la hauteur préconisée ne dépasse pas 50 cm au-dessus du sol, pour éviter les risques d'affouillement puis de déchaussement des piquets (Bernard, 1927). En terrain humide, les piquets prennent racine et forment des buissons tandis que les clayons les plus proches du sol se développent au contact de la terre ; cela prévient la détérioration et consolide durablement l'ensemble de l'ouvrage (Pontzen, 1891). Ensuite, des atterrissements se forment en amont des clayonnages et s'imbibent d'humidité, ce qui facilite l'installation de la végétation.

Pontzen recommande, en 1891, de disposer les clayonnages de façon oblique plutôt qu'horizontale afin que les eaux arrivant sur les dépôts s'écoulent longitudinalement par rapport à la tranchée. Il considère que la disposition dite « en losange », préconisée par Thiéry en cas de forte pente ou de glissements de terrain, est la moins recommandable car les eaux se concentrent en ruisseaux et déchaussent les piquets d'angle à l'aval (Thiéry, 1891 ; Pontzen, 1891). Enfin, dans les « cours de navigation intérieure » de l'École nationale des Ponts et Chaussées, en 1899, Barlatier de Mas conseille les montages en croisillons (figure 9), clayons inclinés à 45°, lorsque les pierres font défaut.



▲ Figure 9 – Clayonnage en croisillons (Barlatier de Mas, 1899).

Un autre agencement des clayonnages est parfois recommandé : le clayonnage en « arête de poisson ». Ces ouvrages sont implantés de façon oblique sur la berge et se raccordent, sommets à l'amont, à des rigoles descendant la pente du talus. Pour éviter le ravinement, ces rigoles doivent être protégées par un pavage ou des briquettes de gazon (Thiéry, 1891 ; Pontzen, 1891).

Lorsque les clayonnages sont installés, leur partie supérieure peut être remblayée et garnie de bou-

tures de saules qui seront marcottées après un an ou deux, afin d'obtenir un « rempart vivant » dont le pied sera inaffouillable (Bernard, 1927).

Dans son projet de correction du torrent du Bourget de 1875, Demontzey décrit une combinaison de grande ampleur, constituée de clayonnages transversaux dans le lit du torrent et de clayonnages longitudinaux aux pieds des berges. Les piquets de ces derniers sont en saule et en mélèze, et des boutures sont implantées dans l'intervalle entre les deux parements (Demontzey in Mathieu, 1875).

L'ENHERBEMENT

L'enherbement permet de protéger superficiellement les berges de rivières et de torrents en limitant le ruissellement des eaux et en retenant la terre des terrains instables. Le gazonnement sur berge a aussi été utilisé au milieu du XVII^e siècle pour contenir les eaux dans leur lit mineur. Il peut également être préparatoire à l'implantation de ligneux, surtout lorsque le terrain est instable (Surell, 1872 ; Pontzen, 1891 ; Thiéry, 1891 ; Demontzey, 1875 ; Barlatier de Mas, 1899 ; Bechmann, 1905 ; Bernard, 1927 ; Bensaadoun et al., 2005).

L'engazonnement est réalisé de différentes façons : semis, installation en mottes ou briquettes. La technique utilisée dépend du substrat, de la pente du talus, de la présence ou non de gazon à proximité du lieu des travaux et de la main-d'œuvre disponible.

En ce qui concerne le semis, il peut s'effectuer à la volée, par enfouissement des graines en traînant des branches sur le sol, ou bien dans des sillons suivant les courbes de niveaux de la berge. Ces sillons formeront de petits barrages vivants efficaces contre le ruissellement et l'érosion (Surell, 1872 ; Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927).

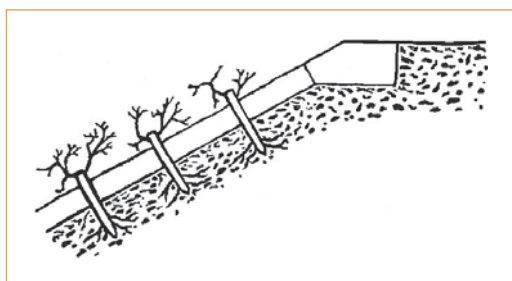
Le gazonnement peut aussi être réalisé par l'installation de mottes d'herbacées, d'éclats ou de plants dans des trous creusés dans la berge. Ce système a été abondamment employé, avec succès, dans le torrent de Riou-Bourdoux, dans la vallée de l'Ubaye (Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927).

Des briquettes de gazon peuvent être utilisées pour engazonner des terrains plats ou peu pentus. Ce sont des carrés de gazon prélevés sur les terrains voisins des berges à consolider, puis posés sur le talus et fixés par des fiches en bois. Si la

penne est plus soutenue, on peut les superposer par assises normales au talus ou les aligner dans des entailles ouvertes dans la berge. Par économie, les briquettes peuvent être contenues autour de carrés de 1 à 3 m de côté dont les intervalles, non recouverts, sont ensuite semés (Pontzen, 1891 ; Barlatier de Mas, 1899 ; Bernard, 1927). Déjà, en 1600, Olivier de Serres préconisait, pour les chaussées d'étang, de bâtir deux murailles de gazon « taillé en quartiers comme des pierres », dont l'intervalle est rempli d'argile arrosée et pressée.

LES TECHNIQUES COMBINÉES

Le génie biologique peut aussi venir en complément du génie civil, comme dans cette technique mixte en pierre et végétation : les « perrés », « perrés à plat », ou « placages ». Ils correspondent à un mince revêtement de pierres posées à plat et fixées à la rive par de la végétation. Il peut également s'agir de moellons de forme arrondie appelés « têtes de chiens » (Meuse). Les pierres sont posées côte à côte et des boutures de saules sont plantées entre leurs joints pour, en se développant, relier les pierres entre elles et les fixer au sol. Il est indispensable d'entretenir ensuite ces plantations pour les maintenir à l'état de buisson et éviter le développement d'une tige maîtresse (gêne du halage et risque d'arrachement). Sur la berge, ces perrés sont généralement limités à la hauteur de crue ordinaire (figure 10), soit 2 à 3 m au-dessus de l'étiage (Barlatier de Mas, 1899 ; Défontaine, 1833).



▲ Figure 10 – Perrés en haut de berge (Barlatier de Mas, 1899).

Du génie biologique à l'ingénierie écologique, quelles évolutions ?

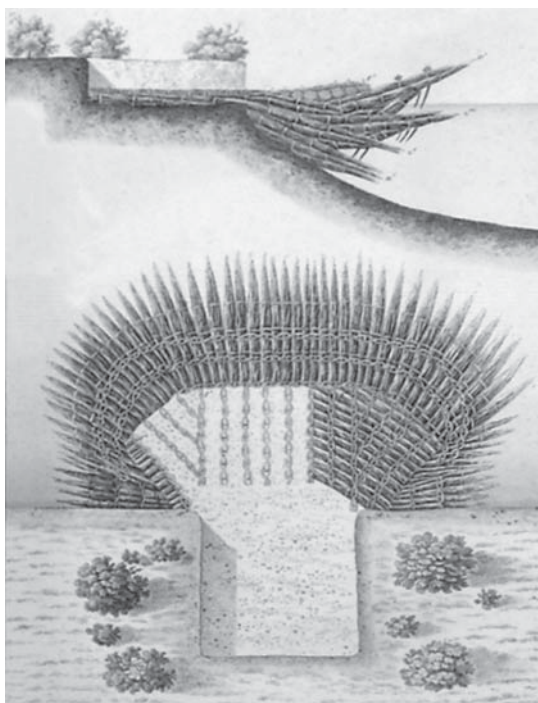
Le terme de « génie biologique » a parfois été remplacé par l'appellation d'« ingénierie biologique » telle que l'a définie Kruegener en 1951,

prenant en compte, pour la construction d'ouvrages, les lois physiques de l'ingénierie mais aussi les lois biologiques, en utilisant des plantes vivantes comme matériaux de construction (Schlüter, 1984 ; Stiles, 1991). Aujourd'hui, on parle volontiers d'« ingénierie écologique », qui regroupe les stratégies, les outils et les techniques végétales pour l'intervention sur les milieux dégradés, sur la base des connaissances en écologie (Bergen *et al.*, 2001 ; Gattie *et al.*, 2003).

Ces évolutions terminologiques traduisent des changements d'utilisation du génie végétal au cours du temps. Certaines techniques ont perduré tandis que d'autres ont fortement évolué ou disparu.

Ainsi, l'utilisation du génie végétal pour la réalisation de barrages de stabilisation du fond des lits a montré ses limites (*cf.* photographies dans Vallauri, 1998). En effet, ces techniques restent efficaces dans les petits ravins où l'écoulement de l'eau est temporaire, mais ne sont pas à même de se développer dans les milieux constamment immergés et connaissant un transport solide très abondant. De plus, le développement de la mécanisation a favorisé la réalisation rapide de gros ouvrages en enrochement et en béton. Ce sont les techniques de génie civil qui sont maintenant exclusivement utilisées pour stabiliser le fond des torrents et rivières. Ces ouvrages inertes ont par ailleurs été préférés à partir de la dernière guerre, car ils permettaient de protéger à très court terme les enjeux socio-économiques dans les vallées, via la construction de plages de dépôts stoppant les crues à la sortie des bassins versants. À cela s'ajoute la très forte augmentation des coûts de main-d'œuvre du génie biologique, qui ne peuvent souvent plus être assumés. Ceci explique que les ouvrages de génie biologique très sophistiqués du passé (figure 11), demandant beaucoup de main-d'œuvre, ont très largement disparu en France. Enfin, les travaux d'entretien, pourtant fortement conseillés, sont en fait peu souvent réalisés et les techniques de renforcement par bouturage et marcottage se sont perdues.

À l'inverse, les techniques de protection de berges comme le clayonnage, le fascinage, les matelas de saules ou les épis végétalisés sont encore très largement utilisées (Lachat, 1994), surtout dans les pays d'Europe centrale (Schiechl et Stern, 1996), les pays anglo-saxons (Gray et Sotir, 1996) ou encore en Asie (Barker *et al.*, 2004). En France, ces techniques connaissent un regain d'intérêt



Fonction : défense des rives, maîtrise du cours des fleuves.

Constitution : couches de fascines maintenues par des piquets clayonnés et recouvertes de graviers.

Fascines : 1 mètre de circonférence, en bois blanc (saule), 4,50 m de longueur, 4 cm de diamètre.

Piquets : 1,50 m de longueur, en saule pour les parties supérieures de l'ouvrage, 4 à 6 cm de diamètre.

▲ Figure 11 – Tunages ordinaires, pose des fascines (Défontaine, 1833).

depuis ces dernières années, les chercheurs tentent de capitaliser l'immense expérience française des services RTM, ces derniers relançant parallèlement la réalisation de chantiers de génie végétal sur les terrains érodés.

En outre, l'apparition récente de nouveaux matériaux comme les grillages, les géotextiles, les géogrilles ou les éléments alvéolés a permis le développement de nouvelles techniques. Par exemple, la protection des terres contre l'érosion juste après la mise en place d'un ouvrage, était autrefois assurée par l'installation de couvertures en branches de saules, tandis qu'on utilise plus facilement un géotextile biodégradable aujourd'hui. De même, le clayonnage en croissons tel qu'il était proposé (figure 9), correspond à une structure alvéolaire qu'il est plus aisé et économique de reconstituer avec des structures synthétiques préfabriquées. Ces matériaux nouveaux sont généralement inclus dans des ouvrages mixtes, les associant avec des plantations, bouturages ou semences. On peut également noter l'utilisation actuelle d'hélophytes⁹ qui n'est pas signalée dans la littérature des protections

de berges des XVIII^e et XIX^e siècles, mais qui est évoquée pour protéger des digues en Hollande dès le XIII^e siècle (Williams, 1990, in Girel).

La forte prise en compte aujourd'hui du concept de multifonctionnalité plaide également en faveur d'un renouveau du génie biologique. Les ouvrages anciens avaient d'ailleurs des fonctions secondaires reconnues, dont les habitants pouvaient tirer partie. Ainsi, les saules étaient très largement utilisés pour la vannerie, mais également pour la salicine (ancêtre de l'aspirine) qui était extraite de leur écorce (Kuzovkina et Quigley, 2005). Le vernis de Chine, planté pour retenir les berges, pouvait être valorisé en bois de charpente tandis que les fruits du mûrier à papier nourrissaient les porcs, ses feuilles étant consommées par les vers à soie (Dugied, 1819). Quant à l'orme champêtre, recommandé pour fixer les atterrissements des barrages, il fournissait un excellent fourrage (Thiéry, 1891). La disparition de ces fonctions de production associées aux ripisylves peut d'ailleurs expliquer, en partie, le désintérêt actuel des gestionnaires pour l'entretien des ouvrages. Autre composant de la multifonctionnalité,

9. Les hélophytes sont des plantes qui s'enracinent sous l'eau mais dont les tiges, les fleurs et les feuilles sont aériennes.

l'intérêt paysager des ouvrages était également revendiqué dès le début du XIX^e siècle. Voit, par exemple, préconisait dès 1820 de planter les rives non seulement pour les renforcer mais aussi pour améliorer la qualité du paysage en Bavière (Schlüter, 1984). Les considérations paysagères font aujourd'hui partie intégrante des préoccupations d'ingénierie écologique.

La préservation de la biodiversité n'était, quant à elle, pas recherchée en tant que telle dans le

passé, même si pour des auteurs importants tel que Surell (1870), « l'imitation de la nature » et de ses procédés était un gage de réussite. Aujourd'hui, la préservation de la diversité biologique est un enjeu à part entière. Elle peut être prise en compte par l'ingénierie écologique car cette dernière permet de recréer des habitats propices à la faune et à la flore, contribuant ainsi à restaurer la fonctionnalité écologique des cours d'eau. □

Remerciements

Nous remercions chaleureusement Bernard Lachat (Biotec) et Frédéric Liébault (Cemagref Grenoble) pour leur relecture attentive de cet article ainsi que Oliver Jancke et Thomas Spiegelberger (Cemagref Grenoble) pour la traduction des articles en allemand, ainsi que Nicole Sardat pour la réalisation de l'infographie. Ce travail a été réalisé avec le concours du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durable (Direction de la prévention des pollutions et des risques).

Résumé

Les végétaux vivants sont utilisés depuis fort longtemps, partout dans le monde, pour l'aménagement d'ouvrages de lutte contre l'érosion des terres. Florissant en France au XIX^e siècle, le génie biologique connaît un regain d'intérêt en Europe depuis les années 30. Cet article répertorie, à partir d'une riche bibliographie, les différents types d'aménagements réalisés dans le passé, dans les cours d'eau et sur leurs berges, principalement en Europe. Depuis les barrages en fascines ou clayonnages jusqu'à l'enherbement des berges en briquettes de gazon, en passant par les gabions en osier, de nombreuses techniques, simples ou combinées, sont proposées. Aujourd'hui, les ouvrages associent de plus en plus des matériaux modernes (géotextiles par exemple), parfois synthétiques, aux végétaux.

Abstract

Living plants are used since a very long time, everywhere in the world, in structures against soil erosion. At its best in France during the 19th century, bioengineering has increased in attention in Europe since the thirties. This paper identifies, based on an extensive bibliography, different kinds of structures built in the past, in the rivers and on the riverbanks, mainly in Europe. From booms in fascine or weaving until sowing on the riverbanks or wicker basket, many techniques, single or blinded, are outlined. Today, structures combine more and more modern materials (geotextiles for example), sometimes synthetic, and plants.

Bibliographie

- ARNOULD, C., 1913, *Constructions rurales et améliorations agricoles*, J-B. Baillière et fils, Paris, 464 p.
- BARLATIER DE MAS, F., 1899, *Cours de navigation intérieure de l'École Nationale des Ponts et Chaussées : rivières à courant libre*, Baudry, Paris, 479 p.
- BARKER, H. et al., 2004, *Ground and water bioengineering for erosion control and slope stabilization*, Enfield (USA) : Science Publishers, 419 p.
- BECHMANN, G., 1905, *Hydraulique agricole et urbaine*, C. Béranger, 634 p.
- BENSAADOUNE, S. et al., 2005, Les aménagements hydrauliques du bassin amont du Crould (Val d'Oise, France) : perceptions stratigraphiques de leurs impacts environnementaux, in : *La rivière aménagée : entre héritages et modernité*, SERNA, V., GALLICE A., *Æstuarina*, Orléans, p. 67-82.
- BERGEN, S.-D. et al., 2001, Design principles for ecological engineering, *Ecological engineering*, vol. 18, p. 201-210.
- BERNARD, C., 1927, *Cours de restauration des montagnes*, 1^{er} fascicule, École Nationale des Eaux et Forêts, manuscrit, 788 p.
- BOURDET, M., 1773, *Traité pratique des digues le long des fleuves et des rivières*, Charles-Antoine Jombert, Paris, 164 p.
- DEFONTAINE, A., 1833, *Destravaux du fleuve du Rhin (régime, digues, barrages, coupures)*, Annales des Ponts et Chaussées, Paris.
- DEGOUTTE, G., 2006, *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières*, Lavoisier, 394 p.
- DEMONTZEY, P., 1875, Reboisement des montagnes. Compte-rendu des travaux de 1869 à 1874, in : *Le reboisement et le regazonnement des Alpes*, MATHIEU, A., Imprimerie nationale, Paris, 168 p.
- DEPELCHIN, F., 1887, *Les forêts de la France*, Alfred Mame et fils, Tours, 398 p.
- DUGIED, P.-H., 1819, *Projet de boisement des Basses-Alpes*, Imprimerie royale, Paris, 113 p.
- FESQUET, F., 2005, La lutte contre les inondations au XIX^e siècle : aménagement des cours d'eau ou reboisement des montagnes. Entre opposition et complémentarité des démarches, in : *La rivière aménagée : entre héritages et modernité*, SERNA, V., GALLICE A., *Æstuarina*, Orléans, p. 299-314.
- FINNEY, F., 1993, History of soil bioengineering. Eleventh Annual California Salmonid Restoration Federation Conference, Eureka, CA, in : *Soil Bioengineering – an alternative to roadside management – a practical guide*, LEWIS, L.
- FOREST DE BELIDOR, B., 1730, *Architecture hydraulique, 2^e partie, tome 2 : l'art de diriger les eaux*, Barrois et Firmin Didot, Paris, 480 p.
- FRISI, R.-P., 1774, *Traité des rivières et des torrents*, Imprimerie Royale, Paris.
- GATTIE, D.-K. et al., 2003, Ecological engineering : the state-of-the-field, *Ecological engineering*, vol. 20, p. 327-330.
- GIREL, J., 2007, non publié, *Histoire des aménagements fluviaux : expérience ancienne (XVIII^e-XIX^e siècles) et enseignement pour l'ingénierie écologique*, 17 p.
- GRAY, D.-H., SOTIR, R.-B., 1996, *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization : a practical guide for erosion control*, New York (USA), John Wiley & Sons, Inc., 378 p.
- KUSS, M., 1903, *Le reboisement des montagnes*, Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 40 p.

- KUZOVKINA, Y.-A., QUIGLEY, M.-F., 2005, Willows beyond wetlands : uses of salix L. species for environmental projects, *Water, Air, and Soil Pollution*, n° 162 (1-4), p. 183-204.
- LACHAT, B., 1994, *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales*, Ministère de l'Environnement, DIREN Rhône-Alpes, Paris, 135 p.
- LACHAT, B., 1999, Quelques souvenirs historiques et perspectives d'avenir du génie biologique en Suisse romande et en francophonie, *Génie biologique*, n° 4/99, p. 7-14.
- MATHIEU, A., 1864, *Le reboisement et le regazonnement des Alpes*, Imprimerie nationale, Paris, réédition 1875, 168 p.
- PION, P., 2005, L'histoire de Paris vue du fond : une pêcherie mérovingienne associée à un moulin (?) dans un chenal secondaire de la Seine à Paris Quai Branly, in : *La rivière aménagée : entre héritages et modernité*, SERNA, V., GALLICE, A., *Æstuarina*, Orléans, p. 31-51.
- PONTZEN, E., 1891, *Procédés généraux de construction. Travaux de terrassements, tunnels, dragages et dérochements*, Baudry, Paris, 559 p.
- REY, F., 2004, Efficacité du génie biologique par bouturage en petite correction torrentielle, *Revue Forestière Française*, vol. LVI, n° 2, p. 155-163.
- SCHIECHTL, H.-M., STERN, R., 1996, *Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control*, Oxford (UK), Blackwell Science, 146 p.
- SCHLÜTER, U., 1984, Zur Geschichte der Ingenieurbiologie, *Landschaft + Stadt* 16 (1/2), p. 2-9.
- STILES, R., 1988, Engineering with vegetation, *Landscape Design*, (172), p. 57-61.
- STILES, R., 1991, Re-inventing the wheel ?, *Landscape Design*, (203).
- SERRES (DE), O., 1600, *Le théâtre d'agriculture et mesnage des champs*, Acte Sud, 1996, 1 461 p.
- SURELL, A., 1870, *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*, Tome 1, Dunod, Paris, 1^{re} édition 1841, 317 p.
- SURELL, A., 1872, *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*, Tome 2, Dunod, Paris, 1^{re} édition 1841, 382 p.
- THIERY, E., 1891, *Restauration des montagnes. Correction des torrents. Reboisement*, Baudry, Paris, 413 p.
- VALLAURI, D., 1998, Relecture par un écologue des principaux écrits sur la restauration d'espaces érodés dans les Alpes du Sud, *Revue Forestière Française*, vol. L, n° 4, p. 367-378.
- VISCHER, D.-L., 2003, *Histoire de la protection contre les crues en Suisse – Des origines jusqu'au XIX^e siècle*, Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Rapports de l'OFEG, Série eau, Bienne, 208 p.
- VON KRUEDENER, A., 1951, *Ingenieurbiologie*, Ernst Reinhardt, Munich, 172 p.