



Les fascines de ligneux en génie végétal

GUIDE TECHNIQUE

MARIE DIDIER, ANDRE EVETTE, EMMA SCHMITT, SOLANGE
LEBLOIS, DELPHINE JAYMOND, JEAN-BAPTISTE EVETTE,
ELEONORE MIRA, PIERRE RAYMOND, PIERRE-ANDRE
FROSSARD, ANNE VIVIER

AVRIL 2023

INRAE



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

Sommaire

Remerciements	7
Préambule	8
1. Généralités sur les fascines	9
1.1. Définition	9
1.2. Origine	10
1.3. Les fascines en tant que technique de stabilisation.....	14
2. Techniques de fascinage	15
2.1. En berge de rivière	15
2.1.1. Fascines de pied de berge	15
2.1.2. Mur de fascine.....	21
2.1.3. Fascines à noyau (Saucissons)	22
2.1.4. Fascines dans les caissons	24
2.2. Dans le lit de la rivière	25
2.2.1. Épi de fascines	25
2.2.2. Fascines de diversification du lit mineur	30
2.2.3. Fascines transversales	32
2.2.4. Plateforme/ grillage en fascines (Zinkstuk/Sinkstück)	35
2.3. Sur les talus.....	37
2.3.1. Fascine drainante	37
2.3.2. Fascine de pente.....	41
2.3.3. Matelas en fascine.....	44
2.4. Fascine morte	45
3. Mise en œuvre.....	46
3.1. Éléments constitutifs de la fascine	46
3.1.1. Essences.....	46
3.1.2. Période de pose.....	51
3.1.3. Matériel végétal	51
3.2. Conception de la fascine	53
3.2.1. Pieux	53
3.2.2. Branches	58
3.2.3. Fagots	60
3.3. Coût des fascines	63
3.4. Entretien.....	63
3.5. En milieu tropical.....	64
4. En pratique	65

4.1. Défaillance	65
4.2. Devenir	67
5. Conclusion	68
6. Bibliographie.....	69

Table des tableaux

Tableau 1: Contraintes tractrices des fascines calculées pour des crues selon (Bonin et al., 2013; Leblois et al., 2016)	15
Tableau 2 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines de pied de berge (Adam et al., 2008; Biotec, 2011; Lachat, 1994; Lequertier et al., 2015; Zeh, 2000, 2010)	20
Tableau 3 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des murs en fascines (Florineth and Molon 2005).....	22
Tableau 4: Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines à noyau (Bonin et al., 2013; Mathieu, 1864; Zeh, 2010).	24
Tableau 5 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des épis de fascine (Bonin et al., 2013; Zeh, 2000, 2007)	27
Tableau 6 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des barrages en fascines (Bélicor 1739)1730 ; Depelchin, 1887 ; Bernard, 1927)	33
Tableau 7: Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines de lit de ravine (adapté de Rey 2012).....	34
Tableau 8: Tableau récapitulatif du dimensionnement des plateformes à échouer en fascines (Kümmer 1849, Ronna 1890, Van Breen 1920, Evette et al. 2009)	36
Tableau 9 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines drainantes (Donat, 1995; Gray & Sotir, 1996)	41
Tableau 10 : Espacement recommandé pour les rangées de fascines vivantes sur les pentes (Gray & Sotir, 1996)	41
Tableau 11 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines de talus (Gray & Sotir, 1996; Zeh, 2007; Coufourier et al., 2008; Zeh, 2010; Lequertier et al., 2015).....	43
Tableau 12 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des matelas de fascines (Zeh, 2010)	45
Tableau 13 : Essences utilisées pour fabriquer les pieux et les fagots en Europe Occidentale	49
Tableau 14 : Synthèse bibliographique du dimensionnement des pieux	54
Tableau 15: Longueur des pieux morts en fonction de la nature du sol selon (Eubanks & Meadows, 2002)	55
Tableau 16 : Synthèse bibliographique du dimensionnement des branches pour les fascines.....	60
Tableau 17 : Synthèse bibliographique du dimensionnement des fagots pour les fascines.....	62
Tableau 18: Essences utilisées pour fabriquer les pieux et les fagots en milieu tropical	65

Table des figures

Figure 0-1- Fascine de pied de berge sur le Borne © Sébastien De Danieli	8
Figure 1-1: Voyage d'inspection dans le Sud de l'empereur Kangxi XVIIème Siècle, où l'on peut observer de nombreux travailleurs construisant des fascines © RMN-Grand Palais (MNAAG, Paris) / Michel Urtado	11
Figure 1-2: Cornelius Meyer 1685, construction d'ouvrages à base de fascines et tressage pour la navigation. Un ouvrier coupe les saules à droite, un second plante les pieux à gauche, deux mettent en place les fascines, un autre tresse (clayonnage) pour bloquer les fascines et un dernier les couvre de gravier, alors que l'on peut observer une berge érodée au fond.	12
Figure 1-3: Tapis subaquatique tissé sur les berges du Mississipi à la fin du 19ème Siècle, « la portion au premier plan est lestée et prête à être coulée » (US Army 1922)	13
Figure 1-4: Illustration d'une fascine simple de saule en pied de berge © Cécile Dorget	15
Figure 2-1: Fascines de pied de berge sur le Vorz (A) juste après installation en 2007 © Belleudy et (B) durant la saison de végétation suivant la mise en place © André Evette	16
Figure 2-2: Exemple d'aménagement d'une fascine en pied de berge associée à une matelas de branches, d'après Bonin et al. 2013, inspiré du CFPF	17
Figure 2-3: Branches anti-affouillement pour la protection de la fascine © Pierre André Frossard	18
Figure 2-4: Technique d'assemblage des fagots via l'utilisation d'un support métallique ou en bois ©TerraErosionControl	19
Figure 2-5: Mise en place des couches de branches en alternance avec des couches de terre assurant le bon contact entre les branches et la terre © André Evette	20
Figure 2-6 : Ajout de matériaux terreux sur l'ouvrage en phase d'être terminé afin de limiter le dessèchement des branches vivantes	20
Figure 2-7: Principe du mur de fascines inspiré de Florineth et Molon (2005).....	21

Figure 2-8: Exemple de d'aménagement avec fascines multiples, adapté de Zeh 2010.....	22
Figure 2-9: Canalisation d'un torrent par construction de saucissons parallèles sur les berges (Mathieu 1864)	23
Figure 2-10: Stabilisation des berges de la Broye au moyen de fascines à noyau, selon le système de Gumpfenberg (ingénieur en Bavière), vers 1865 (Vischer 2003).	23
Figure 2-11: Principe d'un caisson en fascines en profil et vue de face, inspiré de Florineth et Molon (2005) ...	24
Figure 2-12: Illustration d'un épi en fascine © Cécile Dorget	25
Figure 2-13: Succession d'épis plongeants sur les berges de l'Adour (A) pendant les travaux (automne 1999) et (B) 4 ans après les travaux © CFPF Bonin et al. 2013	26
Figure 2-14: Profil schématique d'un ouvrage avec épi en fascines en vue rapprochée	27
Figure 2-15: Différentes phases de construction d'un épi en fascines d'après Joseph von Schemerl (1809).....	28
Figure 2-16 : Exemple de principe d'aménagement et disposition des épis en fascines réalisés sur L'Adour (Bonin et al. 2013,CFPF 2000)	29
Figure 2-17: Fascines de diversification en chevron réalisé sur l'Yzeron ©André Evette	30
Figure 2-18: Fascine de diversification en arche réalisé sur la Leysse © André Evette	31
Figure 2-19: Fascines de diversification en diagonal réalisé sur la Leysse © André Evette	31
Figure 2-20: Barrage en fascinage illustré par Demontzey 1875	32
Figure 2-21: Fascines de lit de ravine juste après installation et quelques mois après © Freddy Rey	33
Figure 2-22: Mise en place d'un zinkstuk (plateforme à échouer) – Vieland, Pays-Bas (années 1930) © Islander – Dirk Bruin	35
Figure 2-23: Fascinage "en barbe" présentant les différentes couches de la structure par Ronna (1890)	36
Figure 2-24: (A) Vue de l'installation finalisée d'une fascine drainante à Beaver Creek en Octobre 2004 © Terra Erosion Control et (B) Schématisation détaillée de la configuration en chevron de fascines drainantes, adapté selon Sotir et McCaffrey (1997)	37
Figure 2-25: Système d'ancrage des drains latéraux (A) avec pieux morts et vivants, (B) seulement des pieux morts et lits de plançons, et (C) Système d'ancrage du drain central adapté de Gray et Sortir (1996).....	38
Figure 2-26: Tracé peint sur la pente © Terra Erosion Control.....	39
Figure 2-27: Excavation des tranchées ©Terra Erosion Control.....	39
Figure 2-28: Fagots principaux et latéraux mis en place avant remblayage ©Terra Erosion Control	39
Figure 2-29: Mise en place terminée © Terra Erosion Control	40
Figure 2-30: Profil par étape de la mise en œuvre d'une fascine drainante, inspiré de Schiechl et Stern (1996). (1) Mise en place du pieu vivant, (2) Implantation de la tranchée latérale, en amont du pieu, prévue pour accueillir un drain latéral, (3) Mise en place du fagot drain latéral, (4) Mise en place du pieu mort, (5) Développement de la fascine drainante	40
Figure 2-31: Fascines de pente à St Gingolph juste après l'installation (A) et après développement (B) © Pierre-André Frossard	42
Figure 2-32: Exemple d'ouvrage incluant des fascines de pente	43
Figure 2-33: Matelas en fascines réalisé en Roumanie © André Evette.....	44
Figure 2-34: Matelas en fascines illustré par Bernard Forest de Belidor en 1730	45
Figure 2-35: Fascine de pente morte sur la Drevenne ©Marie Didier.....	46
Figure 3-1: Saules en croissance dans des fascines sur le Vorz, fascines après une saison de végétation© André Evette	47
Figure 3-2: Système racinaire de l'Aulne glutineux en pied de berge © Hervé Piégay.....	50
Figure 3-3: Trempage des fagots avant installation à Beaver Creek © Terra Erosion Control	53
Figure 3-4 : Méthode de découpe des pieux morts	56
Figure 3-5: Exemple d'agrafe en bois utilisé pour le maintien de géotextile ©André Evette.....	56
Figure 3-6: Exemple d'attaches en bois via 2 rangées de pieux liées © Pierre-André Frossard	56
Figure 3-7: Exemple d'utilisation combinée de pieu mort et vivant	57
Figure 3-8: Battage mécanique des pieux sur la Bourbre © Marie Didier Restauration de la continuité écologique de la Bourbre-maîtrise d'ouvrage : les Autoroutes APRR et AREA	58
Figure 3-9: Branches de saules pour la confection de fagots© Pierre-André Frossard	58
Figure 3-10: Diversité des diamètres des branches de saules avant fabrication des fagots © Sébastien De Danieli	59
Figure 3-11: Branches de saules formant des fagots © Sébastien De Danieli	60

Figure 3-12 : Pieds des branches vivantes prêtes à être enfouies dans le sol à l'arrière de la fascine dans le talus © Pierre-André Frossard.....	61
Figure 3-13: Zone de chevauchement entre deux fagots ©André Evette	63
Figure 3-14: Installation d'une fascine vivante de <i>Piper dilatatum</i> , et d'une fascine morteensemencée de graines d'une espèce indigène d'arbre de ripisylve (<i>Inga ingoides</i>) en pied de berge de la rivière Lézarde Petit Bourg, Guadeloupe, Novembre 2022. © Pierre Raymond.	64
Figure 4-1: Évolution d'un ouvrage réussi ©André Evette et Pierre-André Frossard.....	68

Remerciements

Cet ouvrage n'aurait pu voir le jour sans l'aide, la volonté et le soutien des différents co-auteurs du guide, chacun à leur échelle ayant apporté leur pierre à l'édifice. Leurs regards, critiques et suggestions ont indéniablement permis d'améliorer le propos. Ainsi, nous est-il agréable de remercier chaleureusement et en premier lieu, *Emma Schmitt*, *Solange Leblois* (INRAE), *Delphine Jaymond* (INRAE), *Jean-Baptiste Evette* et *Eleonore Mira*.

Nous tenions également à remercier les relecteurs de cet ouvrage, *Pierre Raymond* (Terra Erosion Control Ltd.), *Guillaume Piton* (INRAE) et *Pierre-André Frossard* (HEPIA), pour leur collaboration amicale et efficace. Cet ouvrage n'aurait pu aboutir, tant sur sa forme que dans son contenu, sans leurs remarques avisées.

Nous tenions à saluer particulièrement *Cécile Dorget* pour l'utilisation de ses illustrations, particulièrement à propos dans ce guide ainsi que *Sébastien De Danieli* pour ses photographies.

Marie Didier et André Evette
INRAE Grenoble
Le 25 Avril 2023

Comment citer ?

Didier, M., Evette, A., Schmitt, E., Leblois, S., Jaymond, D., Evette, J-B., Mira, E., Raymond, P., Frossard, P-A & Vivier, A. (2023). Les fascines de ligneux en génie végétal. Guide technique par l'Office Français de la Biodiversité avec l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, 74 pages.

Préambule

Les techniques de génie végétal pour le contrôle de l'érosion en rivière font fréquemment appel aux techniques de fascinage. Ces techniques ancestrales consistent généralement en la mise en place en pied de berge de fagots de saules vivants fixés à des pieux (Figure 0-1). C'est la technique de protection de pied de berge la plus utilisée dans les ouvrages de génie végétal en France, elle y constitue ainsi 26 % des ouvrages de pied de berge (Jaymond et al., 2021). Les fascines s'insèrent le plus souvent dans une combinaison de techniques, chacune apportant sa contribution pour une bonne protection de la berge et/ou du talus. Le fascinage est ainsi régulièrement combiné à d'autres techniques de génie végétal ou génie civil afin de répondre précisément à chaque particularité, spécificité, et besoin du talus ou cours d'eau considéré. On trouve notamment des associations avec du bouturage, des lits de plants et plançons pour le génie végétal et avec de l'enrochement pour le génie civil.

Bien que simples à première vue et connues pour leur forte résistance mécanique, ces techniques demandent un réel savoir-faire pour résister durablement et connaître une bonne reprise végétale. Le type d'espèces utilisées, la qualité du matériel végétal, la nature du contact avec la terre, la hauteur d'implantation par rapport à la ligne d'eau sont autant de facteurs déterminants dans la réussite et la bonne tenue des ouvrages.



Figure 0-1- Fascine de pied de berge sur le Borne © Sébastien De Danieli

Les modalités d'application des fascines sont variées, elles peuvent se présenter sous différentes formes : mortes ou vivantes, en pied de berge ou sur les talus, de petit ou de grand diamètre, sous forme de barrière ou de drain. Leurs modalités de mise en œuvre sont également multiples : une ou deux rangées de pieux ; installation *in situ* sous forme de fagot pré-confectionné ou branche par branche ; pied des branches ancrées ou pas dans la berge ; fixation avec du fil de fer ou de la corde coco... Pourtant aucun document technique ne décrit l'ensemble de ces possibilités et les avantages et inconvénients de l'ensemble de ces différentes techniques. Les profils techniques disponibles sont

souvent similaires et prennent rarement en compte les différentes possibilités offertes, ni les contraintes afférentes. Outre ces formes classiques de fascinage, le terme fascine inclut également la fascine d'hélophytes, également un ouvrage de protection/végétalisation de pied de berge. Toutefois, cette technique ne sera pas décrite dans ce guide, on ne s'intéressera qu'aux techniques de fascinages avec des ligneux.

Fort de ces constats, le présent guide a pour vocation de répondre à ce manque de document techniques en contribuant à l'amélioration de l'utilisation et la mise en œuvre des techniques de fascinage. L'objectif est de rendre disponible à tous, la diversité de leur modalité d'utilisation, et les avantages et inconvénients de chacune en exposant les diverses applications dans le détail. Il s'agit d'abord de décrire la grande variabilité des techniques de fascinage, en fournissant des spécifications techniques et des profils détaillés, ainsi que les modalités précises d'utilisation, leurs limites, leurs avantages et inconvénients. L'objectif finalisé est de mettre à portée de chacun les préconisations techniques précises à apporter aux gestionnaires pour la bonne réalisation de fascines, depuis les matériaux constitutifs jusqu'à l'entretien en passant par les modalités de mise en œuvre et les conditions de milieux appropriées à ce type d'ouvrage.

Ce document constitue un support technique pratique pour les concepteurs, maîtres d'œuvre, techniciens et maîtres d'ouvrage ou grand public. Il ne constitue pas une réponse à toutes les situations en matière de protection de berge, ni un catalogue de recettes à appliquer sans se poser de question. Les techniques décrites sont régulièrement combinées à d'autres techniques afin de répondre précisément à chaque particularité et spécificité du tronçon de cours d'eau considéré. La conception d'un ouvrage de stabilisation à l'aide de techniques végétales nécessite des compétences multiples et pluridisciplinaires aussi bien en botanique, en écologie mais également en sciences de l'ingénieur, pédologie ou hydraulique en intégrant une connaissance complémentaire des processus érosifs et morphodynamiques. La conception d'un ouvrage de génie végétal demande un diagnostic et une étude précis et rigoureux, s'appuyant sur une bonne analyse du terrain et débouchant sur des plans et spécifications techniques associées.

1. Généralités sur les fascines

1.1. Définition

Le mot « fascine », ensemble de branchage lié en faisceau, vient du latin classique *fascina* qui a d'abord désigné le fagot pour le feu puis en latin tardif la fascine destinée à l'ingénierie. Il appartient à la même famille que « faix » ou « faisceau ». Orthographié *faissine* en vieux français, il avait surtout le sens de « fardeau », puis il semble avoir été refait sur le modèle de l'italien au XVI^e siècle pour se spécialiser dans un sens technique, tandis que « fagot » restait plus indifférencié et davantage lié au feu. Au XVII^e siècle se développe son dérivé « fascinage », ouvrage de fascines, déjà plus abstrait. Le Grand Robert le date de 1693, mais on le retrouve en réalité dès 1679 à propos de travaux d'endiguement à Boulogne (Donneau de Vizé (dir.), 1679) et dans une ordonnance royale de la Marine en 1681 (Louis XIV, 1714). Beaucoup de langues européennes recourent au même radical : *fascine* en anglais (mais aussi parfois *brush* et *brush work*), *Faschine* en allemand, *fascina* en italien, *fajina* en espagnol. Le néerlandais se distingue avec *rijshoot* et *rijswerk*. Le premier dictionnaire de l'Académie française (1694) lui accorde une place dans l'article « faisceau » : « Gros fagot de branchages, dont on se sert pour combler des fosses, accommoder des mauvais chemins, et aider à faire des batteries pour le canon, etc. » Au XVIII^e, l'ingénieur Belidor la définit ainsi : « Ce sont des fagots de menues branches, liés par les deux bouts et par le milieu ; on en fait de diverses longueurs et grosseurs, suivant l'usage auquel elles sont destinées... » (Belidor, 1755).

Le nombre de liens ou « harts », en osier séché au feu ou au soleil, pour assembler la fascine varie de deux à trois d'un texte à l'autre. On la composait sur un chevalet, en utilisant parfois des chaînettes pour la resserrer, quoique l'un des premiers guides pratiques sur les fascines dû au Prussien Eytelwein (1800) estimât ces dernières inutiles (Eytelwein, 1800). Les branches sont parfois réunies autour d'une perche plus solide. Eytelwein conseille d'utiliser des rameaux encore en feuilles, car ils seraient plus faciles à submerger et à lester. Quand on achète les fascines toutes faites, il convient, écrit-il, de vérifier que les rameaux qui la constituent ont bien la même longueur. Les essences qu'il préconise sont le saule et le peuplier, ou à défaut le chêne et le hêtre, ou même des épineux, tandis que les conifères, l'aune et le bouleau fonctionnent moins bien. Pour lui, les dimensions idéales d'une fascine sont 21 cm de diamètre, pour 2,8 à 3 m de longueur, pour des raisons de maniabilité. En 1885, l'Allemand Scheck, donne des dimensions et des essences sensiblement analogues, mais conseille d'utiliser trois liens et de recourir au fil de fer (Scheck, 1885). Entre-temps en 1849, à Bruxelles, Kümmer, publie en français un *Essai sur les travaux de fascinages et la construction des digues* (Kümmer, 1849), qui distingue quatre types de fascines utilisées sur l'Escaut, de dimensions et compositions différentes, en s'inspirant d'un *Cours de construction* de l'Académie militaire de Bruxelles (Demagnet, 1847) :

- a. la fascine de Hollande : longueur 3 m à 3 m 50, circonférence de 35 à 50 cm, en saule « en pleine croissance » ;
- b. la fascine de Gueldre : plus ample, de forme conique, avec une circonférence de 60 à 10 cm (le *Cours de construction* décrit lui une « fascine d'Ostende »), de même longueur que la précédente, armée de deux grosses branches de 1 m 20 et 1 m 40 de longueur ;
- c. la fascine de Moerbeek : 2 m 50 de longueur (Demagnet, 1847), armée d'une « forte branche » de 1 m 20, circonférence de 40 à 50 cm, majoritairement en chêne, accompagné de frêne, bouleau et noisetier ;
- d. la fascine de Brabant : longueur de 1 m 50 à 1 m 70, armée d'une branche de 1 m, et d'une longueur circonférence 30 à 37 cm, en bois de cinq années de croissance, provenant du chêne, du bouleau, du frêne ou du noisetier ; « on admet un quart de remplissage en saule ou aulne » (Demagnet, 1847).

Parmi ces différentes variétés de fascines, seule la fascine de Hollande offre des possibilités de repousse, avec le recours au saule, mais Kümmer ne le précise pas.

En tout cas, peu coûteuse, maniable et renouvelable par recépage, vivante ou inerte, la fascine est l'élément de base de nombreux ouvrages d'ingénierie.

1.2. Origine

L'archéologie témoigne que la pratique du fascinage précède de loin la publication des premiers traités techniques sur le sujet. On pense que des fascines ont été utilisées dès le mésolithique dans les aménagements de pièges à poisson (Billard & Bernard, 2016). Les archéologues en ont retrouvé dans les barrages et digues du réseau d'irrigation et de canalisation des civilisations mésopotamiennes (Kupper, 1988) où apparaissent les premiers ingénieurs spécialisés, *sêkirum* dans les tablettes akkadiennes de Mari (Viollet, 2010). Outre son usage de comblement, attesté depuis qu'on franchit des fossés ou des marais (par ex. César dans La Guerre des Gaules), les fascines, maintenues par des piquets ou caissons de bois, ont été employées très largement dans les chantiers du monde romain, pour construire des soubassements de chaussées en milieu humide (Deshoulières, 2002), des fondations, des berges (Paquet & Guillot-Pingue, 2017), des digues temporaires ou durables. Elles servent souvent à créer une interface entre un milieu meuble et une construction en dur (Allinne, 2007). La technique de construction de quais en comblement de fascines et gravier réapparaît aussi plus tard, à l'époque médiévale, à Rennes (dans la chronique de site, place Saint-Germain du 2 février

2015). La capacité des fascines à laisser circuler l'eau en sous-sol a également permis la pose de drains en fascines (voir monthly Reports of the Department of Agriculture for the Year 1871, 1872).

En Chine, on a découvert dans la province de Shaanxi des aménagements à base de fascines, pour protéger le pont de Shahe, vieux de plus de 2000 ans (Mai et al., 2022). Confrontée à des crues violentes depuis des millénaires, la Chine possède même un souverain légendaire, Yu le Grand, fondateur du pays, victorieux des inondations, qui aurait vécu 2000 ans avant notre ère. La littérature chinoise mentionne très tôt l'emploi de fascines (*sao*) en ingénierie, en l'occurrence pour réparer une digue. Le sinologue Joseph Needham cite un débat sur la meilleure manière de procéder, relaté par l'astronome et hydraulicien Shen Kuo (ou Kua), au XI^e siècle (Needham, 1971). Ces travaux de canalisation ou d'endiguement ont parfois consommé des quantités astronomiques de fascines, et l'historien de l'environnement Ling Zhang, a décrit la catastrophe écologique provoquée pendant la dynastie Song, aux XI^e et XII^e siècles, par le fascinage des crues du fleuve Jaune qui a abouti à l'abattage de tous les arbres, y compris ceux qu'un édit impérial interdisait de prélever sur les bords même du fleuve (Zhang 2009, voir aussi Zhang 2016). Un rouleau de soie peint autour de 1698, conservé au musée Guimet à Paris, représente avec précision des opérations de fascinage inspectées par l'empereur Kangxi sur la berge du fleuve Jaune. L'image a souvent été reproduite pour illustrer l'histoire du génie végétal (Figure 1-1), mais le plus souvent avec une datation fantaisiste (Finney 1993, Lewis 2000, Hoag 2005, etc.). L'ouvrage de Needham est illustré d'une fascine géante utilisée pour colmater une digue, tirée du *Hsiu Fang So Chih*, « Bref traité de la réparation des digues », vers 1775 (Needham, 1971). Elle aurait été principalement constituée de *sorgo*, dit aussi « kaoliang », et renfermait de la terre emballée entre les fibres végétales.



Figure 1-1: Voyage d'inspection dans le Sud de l'empereur Kangxi XVII^eme Siècle, où l'on peut observer de nombreux travailleurs construisant des fascines © RMN-Grand Palais (MNAAG, Paris) / Michel Urtado

En Occident, quand les traités d'ingénierie ou les *Theatrum machinarum* (ouvrages sur des techniques variées, illustrés et légendés) des XVI^e et XVII^e siècles abordent le fascinage, ils évoquent des techniques déjà maîtrisées et complexes, qui recourent parfois aux propriétés du vivant. Ainsi en 1587, l'opuscule *Discorso sopra i ripari del Po et d'altri fiumi* (« Discours sur les rives du Po et d'autres fleuves ») de l'ingénieur florentin Lupicini (Lupicini, 1587), conseille pour protéger les berges et le lit de l'érosion d'immerger partiellement une « machine » de bois, sorte de plate-forme à échouer composée de fascines (sans doute analogue au *zinkstuk* néerlandais), lestée et puissamment charpentée, renforcée de liens de saule, et constituée « de bois tendre capables de germer, tels que des saules, etc., mis en place à l'état frais ». Il explique que la partie immergée se conserve très bien, et que l'autre poussera des racines qui l'amarront à la rive. L'inspiration vient peut-être des Pays-Bas, en effet des fouilles archéologiques menées à Vianen, près d'Utrecht, ont révélé des restes de *zinkstuk* datés du XV^e siècle (Caspers, 2021). En Espagne, une copie manuscrite du XVII^e d'un original perdu du XVI^e siècle attribué à Turriano, ou plus récemment à Lastanosa (mort en 1576), consacre plusieurs pages illustrées aux épis de fascinages et renforts de digues (Turriano, XVI^e-XVII^e s.). Les essences conseillées sont la matricaire, la sabine et autres genévriers. Dès ces exemples anciens, le fascinage est combiné avec d'autres techniques, plantation, gabion, clayonnage, enrochement.

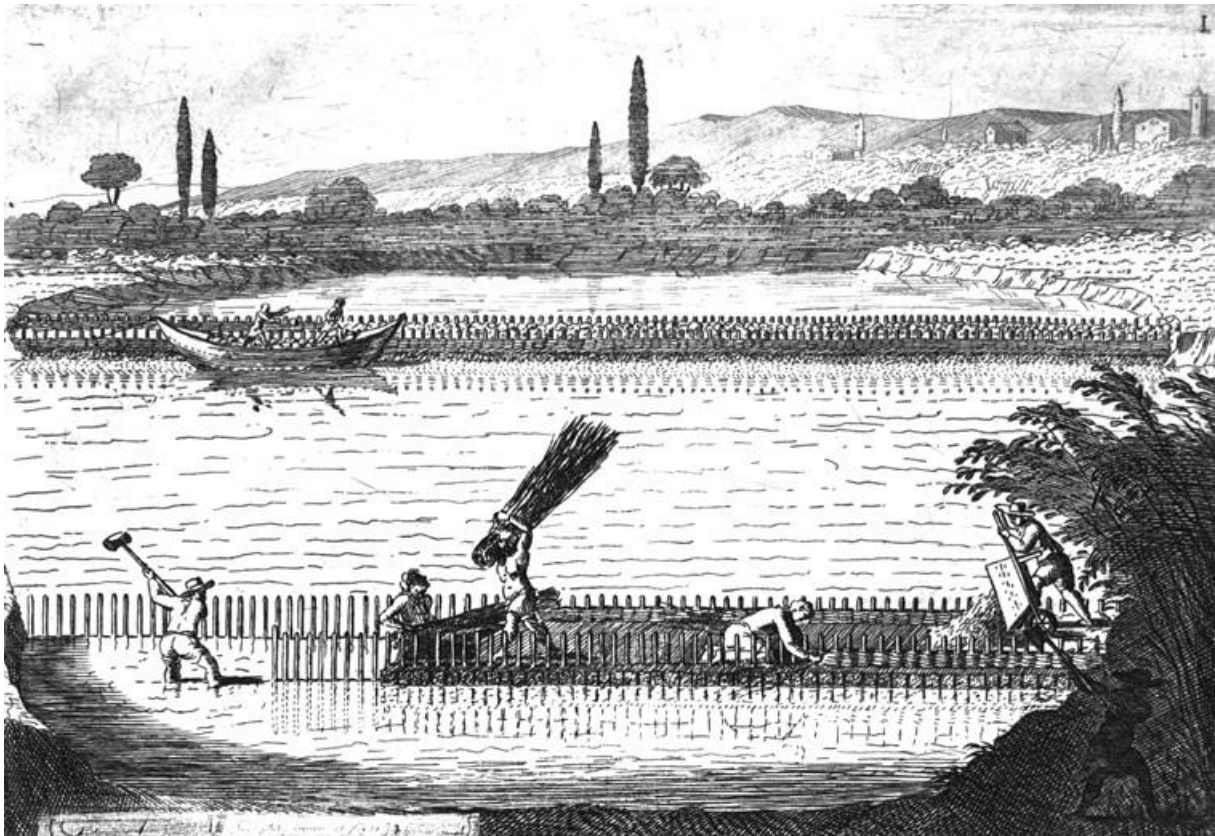


Figure 1-2: Cornelius Meyer 1685, construction d'ouvrages à base de fascines et tressage pour la navigation. Un ouvrier coupe les saules à droite, un second plante les pieux à gauche, deux mettent en place les fascines, un autre tresse (clayonnage) pour bloquer les fascines et un dernier les couvre de gravier, alors que l'on peut observer une berge érodée au fond.

À la fin du XVII^e siècle, un ingénieur hollandais installé à Rome, Cornelis Meijer (ou Meyer) publie un traité illustré qui se propose de rendre le Tibre plus navigable (Meijer, 1695). Pour protéger les berges, il propose de les doubler d'une digue de pilotis garnie de fascines de saule « qui repoussent et germent aisément » (Figure 1-2). L'ouvrage sera traduit rapidement en français par un certain Bouillet, puis en allemand par J. R. Zäsch (Bouillet, 1693). De même, l'ingénieur français au service du roi de Prusse, Bourdet, soucieux que les aménagements résistent aussi à la glace, écrit en 1771 : « Lorsqu'on est

obligé d'employer des fascinages pour garantir les digues du côté du fleuve, il est essentiel que ces fascinages soient faits de bois de bouture comme le saule, parce que les branches de ces sortes d'arbres prennent racines dans les fascinages, les fortifient et se consolident avec eux, de sorte que l'un et l'autre, poussant ensemble leurs branches s'opposent d'autant plus au choc des glaçons. » (Bourdet, 1771). Le XVIII^e est aussi marqué par deux grands traités en plusieurs volumes, comme celui du français Forest de Belidor (Belidor, 1782), paru à Paris de 1782 à 1790, qui consacre de nombreuses planches aux fascinages de protection ou d'épis, sans toutefois s'intéresser à leur capacité à repousser, ou celui de l'Allemand Reinhard Woltman publié à Göttingen, à partir de 1791 (Woltman, 1791). Woltman cite fréquemment Belidor, témoignant aussi de la vigueur et de la rapidité des échanges internationaux relatifs aux techniques.

Parmi les ouvrages consacrés exclusivement au fascinage, figure, outre Eytelwein (1800), Kümmer (1849) et Scheck (1885) cités plus haut, un ouvrage néerlandais richement illustré de (Van Breen (1920). Entre-temps, sans se cantonner à la fascine, le génie végétal avant la lettre a connu un véritable essor en France au XIX^e siècle. Les travaux du Rhin qui avaient déjà inspiré Belidor sont relatés en détail en 1833 par Antoine Defontaine qui décrit deux types de fascines (Defontaine, 1833). Les premières, destinées au tunage, construction d'épis en fascines, ont 4 m 50 de long, nouées de quatre harts, avec des branchages récoltés après la chute des feuilles. Les secondes, en saule, de 1 m 50 à 2 m, ne sont retenues que par un seul lien. Defontaine construisit aussi des barrages en utilisant des saucissons « bourrés en gros gravier », de 4 m de long, composés du contenu de sept fascines, fortement liés par douze harts.

Dans la seconde moitié du XIX^e, la prise de conscience que la surexploitation des ressources végétales en montagne conduisait à des phénomènes d'érosion, glissement de terrains, avalanches, inondations aboutit aux lois de 1860 et 1882 sur la restauration et la conservation des terrains en montagne (RTM). Elles font naître une abondante littérature technique, en particulier sur le contrôle des torrents. Thiéry (1891), par exemple, propose des modèles de barrages en fascines retenues par des piquets ou des claies (Evette et al., 2009; Labonne et al., 2007).



Figure 1-3: Tapis subaquatique tissé sur les berges du Mississippi à la fin du 19^{ème} Siècle, « la portion au premier plan est lestée et prête à être coulée » (US Army 1922)

Enfin, si le fascinage reste utilisé au début du XX^e siècle, avec de monumentales plates-formes de fascines à échouer déployées dans le Mississippi par exemple (Figure 1-3), on préfère bientôt des matelas articulés en béton, ou en asphalte, jusqu'à la renaissance du génie végétal proprement dit (United Nations, 1953).

Après avoir connu un certain abandon pendant les « Trente glorieuses », ces techniques connaissent un nouvel essor depuis une trentaine d'années (Lachat, 1999). Le génie végétal s'est d'abord redéveloppé en Autriche grâce aux travaux précurseurs de Hugo Meinhard Schiechl (Schiechl 1980) puis, ces travaux ont diffusé vers l'ouest en Europe, mais aussi en Amérique du Nord où des échanges ont eu lieu avec les auteurs d'un autre ouvrage faisant aujourd'hui référence (Gray and Sotir 1996). En 1994, Bernard Lachat publie pour le compte du Ministère de l'Environnement un ouvrage devenu une référence en France et décrivant les principales techniques de génie végétal ainsi que leurs modalités de mise en œuvre et de dimensionnement. Depuis, de nombreux travaux, à l'instar de ce présent guide, ont été menés pour développer, comprendre et concevoir les techniques de génie végétal et assurer leur efficacité. Le génie végétal connaît donc une renaissance depuis 30 ans et continue son développement en France. L'arrivée de nouvelles connaissances scientifiques dans différentes disciplines, physiologie et écologie végétale, hydraulique, ou sociologie contribue à cet essor. Les nouveaux matériaux comme les géotextiles et des machines modernes performantes comme les pelles hydrauliques articulées sont également des atouts précieux (Adam et al., 2008). Enfin, le développement de programmes de recherches appliquées incluant guides et ouvrages expérimentaux a aussi pu contribuer à l'utilisation de ces techniques au-delà de leurs limites d'utilisation habituelles (Evette et al. 2017; Mira et al. 2021).

1.3. Les fascines en tant que technique de stabilisation

Au-delà des « avantages environnementaux » régulièrement abordés dans la promotion du génie végétal et documentés ailleurs (Evette et al., 2022), les fascines présentent d'autres intérêts associés spécifiques. Elles constituent la technique de génie végétal la plus utilisée en pied de berge en France du fait de ces nombreux avantages. L'intérêt principal et spécifique des fascines réside dans leur protection immédiate contre l'érosion des sols.

Un ouvrage de génie civil est construit avec un haut niveau de performance qui ne cesse de se dégrader à l'usage (Bigham, 2020; Pinto et al., 2016) et nécessite par conséquent un entretien régulier. C'est un ouvrage inerte qui n'a pas la capacité auto-réparatrice du vivant.

Le génie végétal voit à l'inverse une augmentation de sa résistance avec le temps. Il connaît ainsi une période de relative fragilité avant la reprise de la végétation (Frossard & Evette, 2009). Ces techniques ne sont pleinement efficaces que 2 à 4 ans après réalisation grâce notamment à la force et la profondeur du système racinaire des plantes ligneuses suffisamment bien établies qui apportent une protection à long terme contre l'érosion. Les performances théoriques des ouvrages, sous réserve d'un entretien approprié du site, ne cessent ensuite d'augmenter. L'accroissement de leur capacité de résistance à l'arrachement dans le temps le confirme (Leblois et al., 2016; Peeters et al., 2018). Leur résistance aux forces d'arrachement est comparable, voire supérieure après quelques années, à certaines techniques de génie civil habituelles (Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1997) mais impose d'avoir une vigilance accrue des ouvrages les premières années après leur réalisation.

Le Tableau 1 récapitule l'évolution des valeurs de contraintes tractrices des fascines avec le temps, selon la littérature.

Tableau 1: Contraintes tractrices des fascines calculées pour des crues selon (Bonin et al., 2013; Leblois et al., 2016)

FASCINES	CONTRAİNTE TRACTRICE [N/M ²]		
	À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
	20 ⁽¹⁾ -60 ⁽²⁾	50 ⁽¹⁾ -60 ⁽¹⁾	80 ⁽²⁾ -250 ⁽³⁾

(1) (Venti et al., 2003) ; (2) (Schiechl & Stern, 1996); (3) (Lachat, 1994)

Le fascinage est donc une méthode de protection contre l'érosion et l'instabilité des sols, consistant en la mise en place d'un ou plusieurs fagots ou couches de branches généralement de saules (fascines) entre une ou deux rangées de pieux battus mécaniquement (Lachat, 1994), tel qu'illustré Figure 1-4. Bien que très générique, cette définition inclut en réalité une diversité de modalités, de techniques de poses et d'objectifs concernant les fascines. Le fascinage peut être réalisé dans le lit d'un cours d'eau, en pied de berge ou sur des talus avec des fagots pré-confectionnés ou encore des couches de branches. Les fagots et les pieux peuvent être réalisés à partir de bois mort ou vivant.

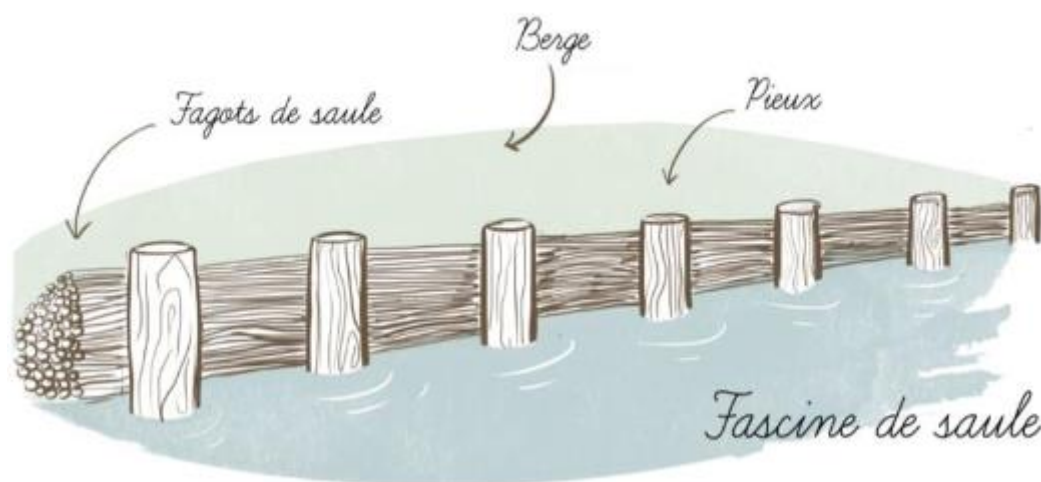


Figure 1-4: Illustration d'une fascine simple de saule en pied de berge © Cécile Dorget

En dépit de son caractère naturel et écologique, il est crucial de rappeler que l'utilisation des fascines pour la stabilisation des berges doit être réservée aux cas où la stabilisation est strictement nécessaire pour protéger les biens et les personnes. Lorsque cela est possible, il est préférable de laisser divaguer le cours d'eau, permettant la création d'habitats pionniers et la recharge solide. Il y a lieu de privilégier le déplacement des enjeux plutôt que de stabiliser les berges. Par ailleurs, quelle que soit la technique considérée de fascinage et comme tout ouvrage concernant les cours d'eau, le travail dans le lit mineur doit être justifié et faire l'objet d'autorisations spécifiques au titre du code de l'environnement, et ce en amont de toute intervention.

2. Techniques de fascinage

2.1. En berge de rivière

2.1.1. Fascines de pied de berge

> **Technique** : La technique de fascinage la plus courante pour protéger les berges de rivières contre l'érosion est la fascine de pied de berge, qui demeure une méthode très répandue en France de nos jours. L'ouvrage suit le pied des berges de la rivière et le sens du courant (Figure 2-1), en faisant l'interface entre l'eau et la berge et permet une bonne protection immédiate contre l'érosion (Adam

et al., 2008; Lachat, 1994; Zeh, 2010). Cette méthode est utilisée dans des situations hydrauliques et morphologiques variées. Si l'on souhaite aussi protéger la partie supérieure de la berge, la fascine est alors accompagnée d'autres techniques comme le lit de plants et plançons, les couches de branches à rejet ou la plantation de boutures (Figure 2-2).

La diversité des modalités d'implantation de fascines en pied de berge est grande. Par exemple, les pieux peuvent être placés en quinconce ou en vis-à-vis, en double ou simple rangée. Cela dépend du contexte et des objectifs recherchés. Les fagots mis en place peuvent être ramenés déjà assemblés ou fait directement sur place, ils peuvent être composés de branches mortes, vivantes, ou les deux. Dans ce dernier cas les branches mortes permettent de limiter le nombre de branches vivantes si l'approvisionnement est difficile. Par souci d'économie des matériaux vivants, Zeh (2010) conseille de mettre entre 30 et 80 % de branches mortes dans les fagots de branches vivantes. Les essences utilisées sont nombreuses et sont décrites dans la partie partie 3.1.1.



Figure 2-1: Fascines de pied de berge sur le Vorz (A) juste après installation en 2007 © Belleudy et (B) durant la saison de végétation suivant la mise en place © André Evette

Bien que simples à première vue, ces techniques demandent un réel savoir-faire pour résister durablement et connaître une bonne reprise végétale. Le positionnement de celle-ci par rapport à la hauteur d'eau est par exemple un facteur essentiel à considérer. Une fascine placée trop bas sera noyée pendant la saison de végétation et ne survivra pas, une fascine située trop haut pourra ne pas

résister à la première sécheresse estivale et périra pareillement, ces deux facteurs de sécheresse et d'enneigement étant renseignés comme des causes importantes de défaillance de ces ouvrages (Leblois et al., 2022) (voir partie 4.1). La plupart des ouvrages recommandent de faire correspondre le milieu du fagot avec la hauteur d'eau moyenne (Adam et al., 2008; Zeh, 2000). Cette méthode est censée permettre de garantir l'eau nécessaire pour la reprise des branches vivantes ainsi qu'une protection contre l'érosion directe. Mais si cette approche fonctionne en général, elle ne prend pas en compte les différents régimes hydrologiques des cours d'eau et demande à être ajustée en observant les modèles naturels. En effet les ligneux de pied de berge (et notamment les saules) existant naturellement aux alentours sont intégrateurs des conditions hydrologiques demeurantes et garantissent que les ligneux qui seront installés à cette hauteur le seront dans les bonnes conditions stationnelles. Pour cela on parcourra le cours d'eau à proximité et on pourra avantageusement placer la fascine au niveau moyen des ligneux les plus bas observés. La hauteur de calage de la fascine va dépendre du régime hydrologique du cours d'eau. En ce qui concerne le régime nivo-glaciaire, le niveau moyen des crues printanières-estivales donne une bonne indication du niveau d'eau à considérer pour les ouvrages de pied de berge.

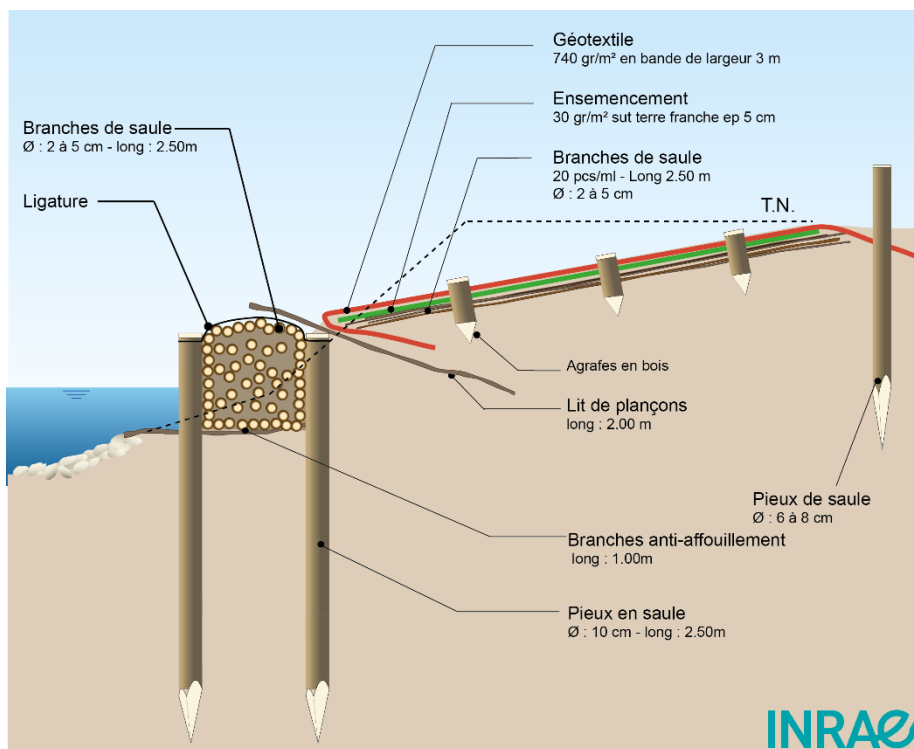


Figure 2-2: Exemple d'aménagement d'une fascine en pied de berge associée à un matelas de branches, d'après Bonin et al. 2013, inspiré du CFPF

Pour les fascines vivantes, le contact entre les branches et la terre doit également être réalisé avec soin de manière qu'une part significative des branches puissent développer des racines. Là encore la faiblesse du contact entre les branches et la terre est un important facteur d'échec de ces techniques (Leblois et al. 2022). En fonction du contexte et des objectifs, une fascine morte peut quant à elle être placée sous le niveau moyen des eaux ou au-dessus, la reprise des végétaux n'étant pas attendue (Zeh, 2000). Pour qu'une fascine morte dure, on choisira plutôt des branches d'espèces de bois dur difficilement dégradables.

L'affouillement, processus naturel et localisé des courants, est une des causes majeures de défaillance structurelle des fascines de pied de berge. Les racines qui se développent à partir des branches de la fascine vivante vont limiter ce risque. Toutefois ces racines ne sont pas encore présentes lors de la mise en place de la fascine. En attendant que les racines se développent sous la fascine, il est possible

d'envisager l'ajout de ramilles de saules ou autre branches, perpendiculairement au sens de la protection (Figure 2-3) (Adam et al., 2008). Ces ramilles de 0.5 à 3 cm de diamètre pour 70-150 cm de long sont disposées en couche d'environ 40 pièces par mètre linéaire et ancrées en dessous de la fascine de sorte à ressortir d'environ 1 mètre dans le lit de la rivière (Adam et al., 2008; Biotec, 2011; Recking et al., 2019). Ces branches sont souvent mortes, assez souples pour pouvoir se plier avec le courant et pour le ralentir (Recking et al., 2019). Elles ont une action perturbatrice sur le courant qui n'aura plus la même intensité d'érosion, elles augmentent ainsi la rugosité et donc diminuent la vitesse et la force tractrice du courant. De plus, en se couchant sur les berges, elles créent un effet tapis qui va bloquer les sédiments. Ces ramilles ont un effet marqué pour réduire l'érosion en pied de berge dans les premiers temps après la mise en place des fascines (Recking et al. 2019). Dans les zones où les risques d'affouillement sont importants, il est souvent proposé une protection sous la forme d'un pied en enrochement. Mais une autre possibilité existe sans faire appel à de l'enrochement, à savoir de positionner une seconde fascine sous la première. Pour cette seconde fascine qui est morte et se situe sous le niveau de l'eau, on utilisera plutôt du bois dur qui se dégrade peu.



Figure 2-3: Branches anti-affouillement pour la protection de la fascine © Pierre André Frossard

La mise en œuvre des fascines en pied de berge a été décrite à de nombreuses reprises dans la littérature (Adam et al., 2008; Lachat, 1994; Zeh, 2000). Elle suit généralement les étapes suivantes :

- 1) Creuser avec le dos d'une pelle hydraulique une assise dans la berge, dimensionnée pour accueillir l'ouvrage, afin de poser les fascines sur une surface plane. L'objectif est de stabiliser l'ouvrage (Lachat 1994, Adam et al. 2008).
- 2) En fonction des contraintes, disposer une couche de ramilles anti-affouillement sous la fascine.
- 3) Pour un ouvrage avec une seule rangée de pieux, battre les pieux de manière mécanique à travers les fagots. Pour un ouvrage avec deux rangées parallèles, disposer les fagots et battre les pieux de manière mécanique (partie 3.2.1).
- 4) Pour la mise en place des fagots, deux options sont possibles :
 - i. Assembler les fagots (partie 3.2.3) avec du fil de fer galvanisé ou de la corde¹. Pour ce faire on peut utiliser un support métallique ou en bois (Figure 2-4). Placer les fagots dans la tranchée, de l'aval vers l'amont (Lachat, 1994). Une fois une fascine vivante en place, il faut y introduire la terre et d'éventuels matériaux graveleux pour en assurer la reprise. Attacher les fagots et les pieux ensemble, par-dessus la fascine (Lachat 1994) ou par-dessous (Zeh 2000). Une alternative permettant d'assurer un bon contact entre les branches et la terre consiste à disposer les fagots de manière à ce que les extrémités constituées de la base des branches soient rentrante dans la berge.
 - ii. Placer les branches une à une en alternant couche de branches et couche de terre, à raison d'environ 25 branches par mètre linéaire, tel que présenté sur la Figure 2-5 (Adam et al., 2008). Si possible, planter les pieds des branches dans la berge pour faciliter leur reprise. Poser les branches de l'aval vers l'amont. Relier les pieux entre eux par-dessus la fascine.



Figure 2-4: Technique d'assemblage des fagots via l'utilisation d'un support métallique ou en bois ©TerraErosionControl

¹ Le fil de fer peut être remplacé par de la corde, en fibres de coco ou encore chanvre, facilement dégradable à l'inverse du fer qui tend à rouiller et pollue les sols.



Figure 2-5: Mise en place des couches de branches en alternance avec des couches de terre assurant le bon contact entre les branches et la terre © André Evette

- 5) Battre mécaniquement les pieux pour compacter l'ouvrage (partie 3.2.3).
- 6) Recouvrir avec des matériaux terreux, c'est essentiel afin que les branches ne se dessèchent pas (Lachat, 1994), tel qu'illustré Figure 2-6.



Figure 2-6 : Ajout de matériaux terreux sur l'ouvrage en phase d'être terminé afin de limiter le dessèchement des branches vivantes

> **Éléments de conception** : Le dimensionnement des différents éléments constitutifs (pieux, branchages fagots) est détaillé dans la partie 3.2 et résumé dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines de pied de berge (Adam et al., 2008; Biotec, 2011; Lachat, 1994; Lequertier et al., 2015; Zeh, 2000, 2010)

Fil de fer	Branches		Pieux					Fagot	
Diamètre	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement longitudinal	Espacement latéral	Enfoncement	Diamètre	Longueur
2-3 mm	2-5 cm	> 200 cm	4-8 cm	> 150 cm	60-100 cm	40-50 cm	Au minimum 50 cm	20-40 cm	Egale à celle des branches

> **Avantages et inconvénients** : la fascine de pied de berge a une efficacité immédiate (Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1996; Zeh, 2000). Elle s'adapte aux irrégularités de la berge, et elle a une très bonne

résistance mécanique (Leblois et al. 2016). Son coût est peu élevé. Mais cette méthode nécessite une grande quantité de végétaux (Lachat, 1994). Sa hauteur de protection ne dépasse pas le pied de la berge (Lachat, 1994). Ce type d'ouvrage peut notamment convenir pour la stabilisation de niches d'érosion le long des cours d'eau où l'étiage est sévère et où les fascines se retrouvent hors de l'eau, cependant, les risques d'échec en lien avec la sécheresse sont alors importants (Lachat, 1994).

2.1.2. Mur de fascine

> **Technique** : Le mur en fascine consiste en plusieurs rangées de fagots vivants posés les uns sur les autres jusqu'à ce qu'ils forment un mur vertical (Figure 2-7) (Florineth & Molon, 2005). Ils sont attachés à de solides poteaux de bois fixés devant la berge. La base de l'ouvrage peut être constituée d'un fagot immergé.

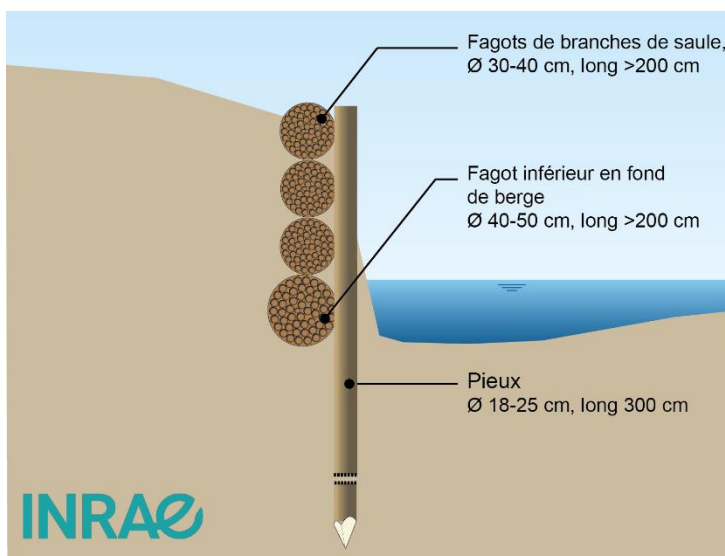


Figure 2-7: Principe du mur de fascines inspiré de Florineth et Molon (2005)

Avec ce système, on peut efficacement et très rapidement protéger des berges verticales ou très abruptes, d'une hauteur maximale de 1,0 m (Florineth & Molon, 2005). En raison de la verticalité et de l'ombrage consécutif des fagots inférieurs par les supérieurs, la viabilité des premiers sera partiellement réduite. C'est aussi pour cette raison qu'il est préférable de n'utiliser cette technique que lorsque la zone à travailler est limitée. Toutefois, cette technique génère un profil de berge pas très naturel et peu favorable à la biodiversité. Elle est à réserver aux situations contraignantes, par exemple un manque de place extrême, où d'autres possibilités ne sont pas possibles.

La mise en place de murs en fascines est de moins en moins courante, on préférera lorsque cela est possible, limiter la verticalité avec une structure alternative similaire qui consiste à disposer et empiler des fagots en rangées successives dans la pente, appelées des fascines multiples. Elles sont toujours placées horizontalement à la pente les unes sur les autres (Figure 2-8). Ces dernières ont toujours pour objectif le ralentissement et la diffusion des écoulements, stabilisant de ce fait le sol en limitant l'érosion et en favorisant la sédimentation.

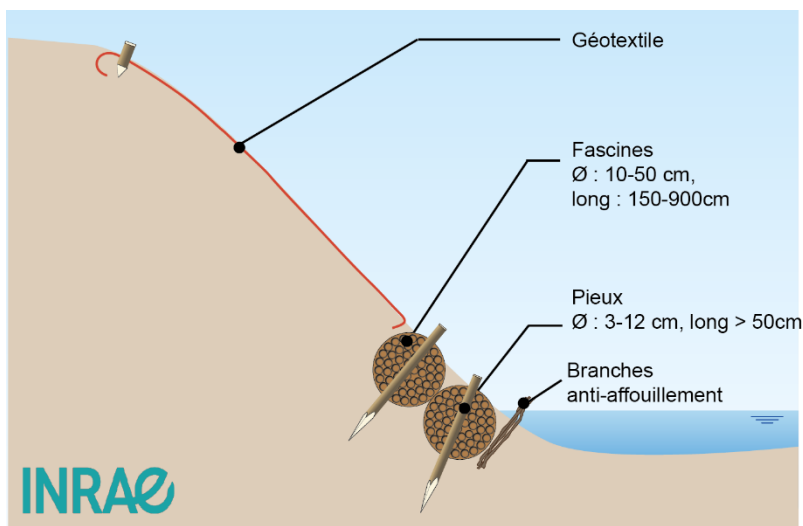


Figure 2-8: Exemple de d'aménagement avec fascines multiples, adapté de Zeh 2010

> **Éléments de conception** : Le dimensionnement des pieux, des branchages et des fagots est détaillé dans la partie 3.2 et résumé dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des murs en fascines (Florineth and Molon 2005)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot en fond de berge	Fagots supérieurs
	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement	Enfoncement	Diamètre	Diamètre
2-3 mm	2-5 cm	> 200 cm	18-25 cm	300 cm	200 cm	200 cm	40-50 cm	30-40 cm

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines de pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques au mur de fascines.

Le fagot du fond de berge, immergé en totalité ou presque, est constitué essentiellement de branches mortes lestées au milieu par des pierres lâches afin de les faire couler dans l'eau. Ces fagots sont ancrés aux pieux (Florineth & Molon, 2005).

> **Avantages et inconvénients** : Ce système permet de protéger efficacement des zones où l'espace de travail est limité avec des berges verticales. La présence de fagots en fond assure une excellente défense au pied de la berge. Un inconvénient de cette technique à prendre en compte est la forte dépendance de la fonction de protection à l'égard de la durabilité des pieux de bois, auxquels les fagots individuels sont liés (Florineth & Molon, 2005).

2.1.3. Fascines à noyau (Saucissons)

> **Technique** : Les saucissons, encore appelés fascines à noyau, sont des structures de stabilisation des berges des cours d'eau utilisant les fascines comme élément constitutif (Bonin et al., 2013; Kümmer, 1849; Mathieu, 1864; Zeh, 2010). Ce sont généralement des structures de plus gros diamètre, les branchages entourant en leur cœur du sable, gravier, de la terre ou encore des pierres, formant des pièces cylindriques (Figure 2-9). La grande rugosité de l'ouvrage permet de réduire la vitesse du courant, produisant une protection contre l'érosion ainsi qu'un effet d'endiguement. La berge reste perméable et offre de bons abris à la petite faune (Zeh, 2010). En France, l'utilisation de cette

technique demeure marginale et les ouvrages existants présentent souvent des diamètres inférieurs à ceux préconisés anciennement dans la littérature.

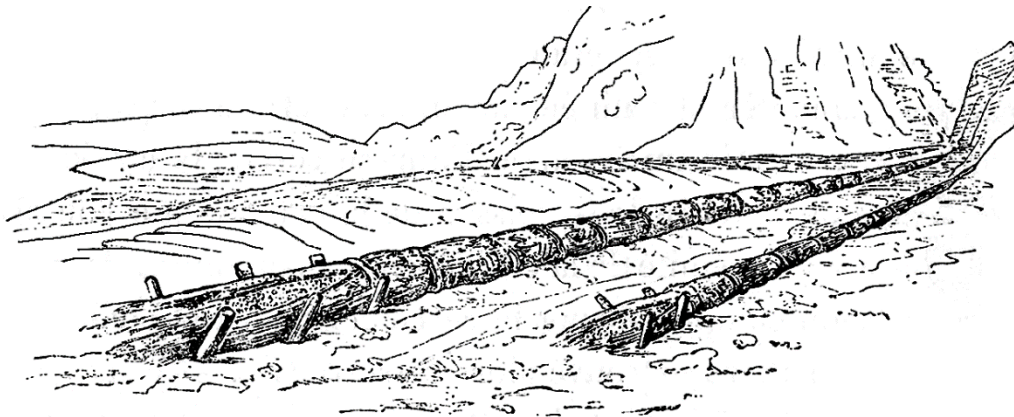


Figure 2-9:
Canalisation d'un
torrent par
construction de
saucissons
parallèles sur les
berges (Mathieu
1864)

Les fascines à noyau peuvent être utilisées seules, pour la canalisation d'un cours d'eau par exemple ou juxtaposées par deux ou trois, pour la stabilisation de berges (Figure 2-10). La fascine à noyau s'emploie également comme un tunage, lorsque l'économie de temps doit être prise en compte.

La mise en œuvre des fascines à noyau est proche de celle des fascines de pied de berge, dimensions des fagots et pieux exclues. Les branches sont emboîtées les unes aux autres afin de former un fagot long de plusieurs mètres. En raison de son poids, il est préférable de fabriquer la fascine sur place. Le remplissage des saucissons est maintenu avec les branches par des harts² (Kümmer, 1849). La fascine à noyau peut être totalement immergée en pied de berge (Zeh, 2010). Lorsque l'immersion de la fascine est inévitable ou voulue, on préférera travailler avec des branches mortes et donc plutôt avec des bois durs imputrescibles.

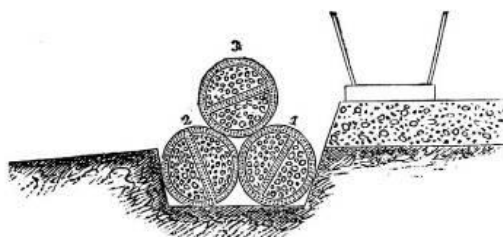


Fig. 1.

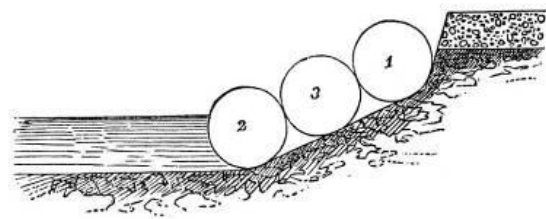


Fig. 2.

Figure 2-10: Stabilisation des berges de la Broye au moyen de fascines à noyau, selon le système de Gumpfenberg (ingénieur en Bavière), vers 1865 (Vischer 2003).

> **Éléments de conception** : Kümmer (1849) indique qu'il n'existe pas de longueur ou d'épaisseur déterminées, leurs dimensions étant fixées d'après l'usage auquel elles se destinent. Toutefois, on peut retrouver des ordres de grandeurs concernant les dimensions pour des fascines à noyau immergées (Zeh, 2010). Le dimensionnement des éléments constitutifs est détaillé et résumé dans le Tableau 4.

²Lien fait d'osier ou d'autre bois souple

Tableau 4: Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines à noyau (Bonin et al., 2013; Mathieu, 1864; Zeh, 2010).

Fil de fer	Branches		Pieux				Saucisson	
Diamètre	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement	Enfoncement	Diamètre	Longueur
3 mm	2-5 cm	50-900 cm	15-20 cm	150 cm	60-100 cm	Minimum 50 cm	80 – 120 cm	300-600 m

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines de pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques au mur de fascines.

> **Avantages et inconvénients** : La flexibilité de la fascine à noyau est sa principale qualité. Elle est susceptible de se prêter facilement aux ondulations du terrain. Son gros diamètre lui donne une bonne résistance et fait que sa partie inférieure peut limiter les risques d’affouillement si elle est positionnée sous le fond du lit.

2.1.4. Fascines dans les caissons

> **Technique** : La technique de caisson végétalisé est connue et couramment appliquée dans le domaine du génie végétal (Bonin et al., 2013). Cette structure est constituée de plusieurs étages, réalisés par des rangées parallèles de rondins de bois (longrines) sur lesquelles sont fixés des rondins perpendiculaires (moises). Les espaces entre les longrines sont généralement remplis de matériaux terreux protégés par un géotextile, mais une variante moins courante à cette technique consiste au remplissage de ces espaces avec des fagots (Florineth & Molon, 2005). Dans la partie immergée de la structure, les espaces entre les rondins de bois sont remplis de pierres ou fagots de matériaux morts. Les espaces au-dessus du niveau d’eau sont fermés par des fagots vivants, qui prennent racine dans le remblai gravo-terreux ajouté par-dessus (Figure 2-11). Cette structure peut être en forme d’escaliers ou de mur **subvertical**.

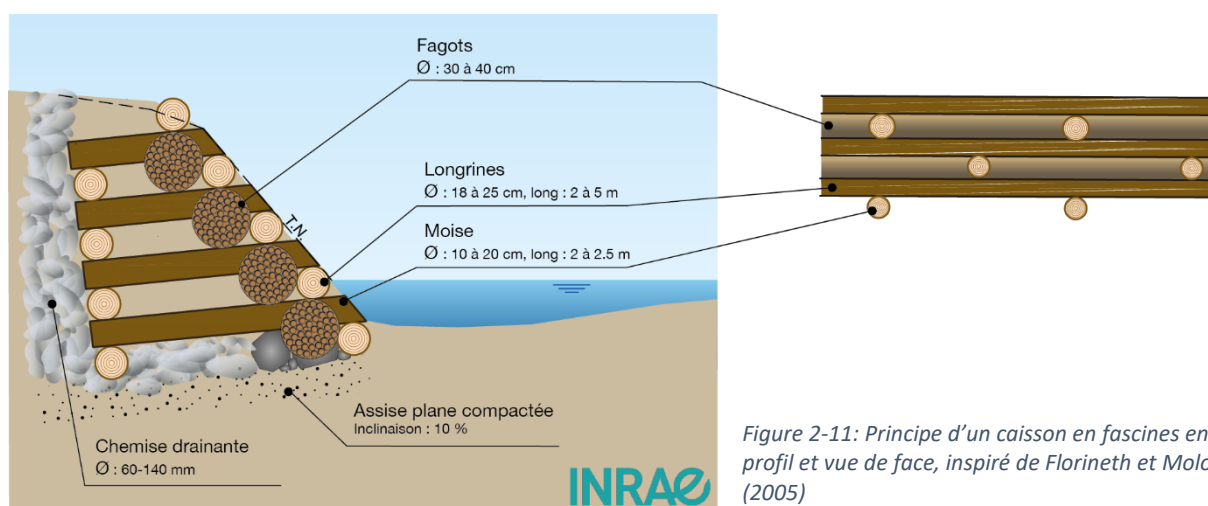


Figure 2-11: Principe d'un caisson en fascines en profil et vue de face, inspiré de Florineth et Molon (2005)

La protection de la berge s’effectue dès la mise en place de manière mécanique via la structure de soutien en bois, mais également dans un second temps grâce à la reprise des branches vivantes au sein des fagots qui assurera, avec le développement des racines, la stabilisation durable du sol. Les rondins tendent à pourrir avec le temps, on estime sa durée de vie entre 20 et 35 ans (Zeh, 2010), mais ce temps est très variable en fonction de l’essence utilisée et des conditions d’humidité notamment. Ce

sont ensuite les racines qui remplacent la fonction de stabilisation initialement assurée par les rondins et drainent le talus.

Pour la mise en œuvre, chaque étage est monté à partir d'une série de 2 longrines disposées sur un terrain préparé entre lesquels on vient disposer des matériaux terreux ou des fascines recouvertes de matériaux gravo-terreux. Les caissons sont ensuite fermés grâce aux moises par fixation des rondins entre eux au moyen de tiges d'acier. Le montage est répété autant de fois que nécessaire pour la hauteur souhaitée. Il faut veiller à ne pas réaliser des caissons trop verticaux afin de limiter la concurrence entre les végétaux et le dépérissement des étages inférieurs (Adam et al., 2008).

Pour les éléments de conception et les avantages et inconvénients des caissons végétalisés, se référer à la littérature ad hoc (Adam et al. 2008, Roman et al 2009).

2.2. Dans le lit de la rivière

2.2.1. Épi de fascines

> **Technique** : Un épi de fascine est un ouvrage partant de la berge, s'avancant sur une partie du cours d'eau et orienté perpendiculairement au cours d'eau, ou légèrement vers l'amont ou l'aval (Figure 2-12). Particulièrement adapté aux rivières dynamiques, ce type d'ouvrage a pour but de « délester » la berge d'une part non négligeable des contraintes hydrauliques dont elle fait l'objet en provoquant un effet directionnel sur les écoulements (Adam et al., 2008). Les épis dévient les courants de la berge, réduisant la vitesse près de la berge et empêchant l'érosion dans les zones critiques. La capacité de l'ouvrage à repousser le courant permet ainsi de diminuer la contrainte hydraulique le long de la berge. Ils peuvent également être utilisés pour réduire la largeur du cours d'eau et induire à long terme un dépôt de sédiment le long de la berge entre les épis (Baird et al., 2015). C'est un comblement par les sédiments qui est attendu avec une végétalisation progressive des « casiers » constitués par les intervalles entre les épis (Degoutte, 2006). Dans un contexte de restauration, les épis sont également susceptibles de participer à la diversification des substrats et des hauteurs d'eau au sein du lit, de favoriser la création de caches et abris pour la faune aquatique et piscicole (Adam et al., 2008).

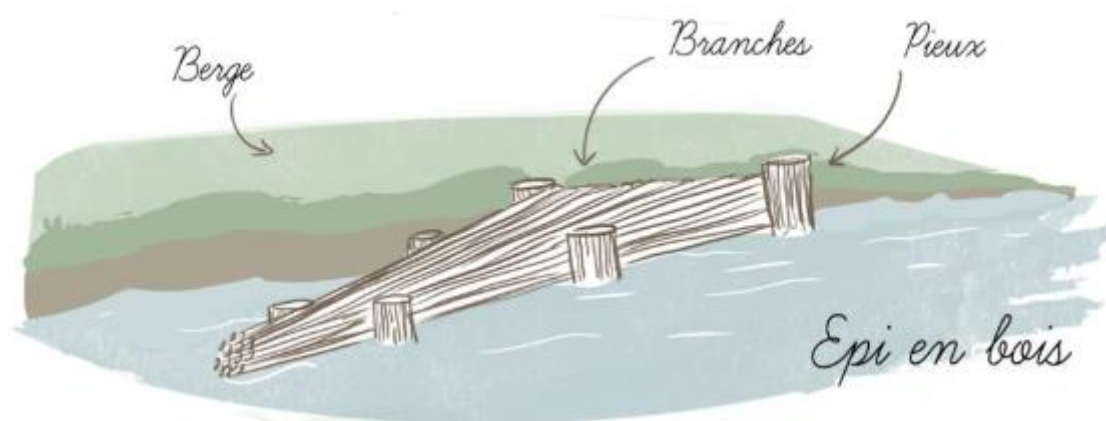


Figure 2-12: Illustration d'un épi en fascine © Cécile Dorget

Les épis de fascine sont généralement utilisés et décrit dans la littérature sur des cours d'eau de plus de 10 m de large (Schiechl & Stern, 1997). Les épis sont implantés en série (Figure 2-13, Figure 2-14) pour une dissipation d'énergie et une protection des berges optimale (Bonin et al., 2013). Sur une série, le premier épi (à l'amont) est le plus sollicité par le courant et par les corps flottants. Il peut être

orienté vers l'aval même si les autres sont orientés vers l'amont et est appelé épi de rejet ou épi déflecteur (Bonin et al., 2013). L'interface entre les épis peut être remplie de structures en peigne faites de branches vivantes pour favoriser la sédimentation (Donat, 1995).



Figure 2-13: Succession d'épis plongeants sur les berges de l'Adour (A) pendant les travaux (automne 1999) et (B) 4 ans après les travaux © CFPF Bonin et al. 2013

Si le caractère vivant de la fascine veut être maintenu, le noyau de la fascine doit être rempli de matériaux terreux, au moins sur la partie supérieure près de la berge, là où les fascines émergent suffisamment et où les saules peuvent se développer. On ne cherche pas nécessairement à avoir des fascines ou des pieux vivants (surtout ceux qui sont clairement dans le lit du cours d'eau). En effet, s'ils sont constamment immergés, ils ne survivront pas. Les pieux peuvent donc être vivants ou morts (Zeh, 2007). Pour une meilleure durabilité des ouvrages, on privilégiera des bois durs et imputrescibles. On peut par exemple utiliser le châtaignier, essence peu putrescible et qui ne rejette pas (Bonin et al., 2013). La tenue et la densité des pieux dans le temps sont importantes car les rangées de pieux peuvent continuer à jouer le rôle d'épi longtemps, même si la fascine s'est dégradée. Quelle que soit l'espèce choisie, les racines des épis doivent être soigneusement ancrées dans les berges, tandis que les têtes sont fixées grâce aux pieux pour limiter les turbulences du courant (Zeh, 2010). Pour des raisons

hydrauliques et esthétiques, les contours de l'épi doivent être arrondis et non anguleux (Schiechl & Stern, 1997).

Les épis peuvent être réalisés selon le même principe que les fascines en pied de berge (voir partie 2.1.1), les fagots devant être ancrés dans la berge sur au minimum 50 cm, plongeant vers le cours d'eau (Zeh 2000).

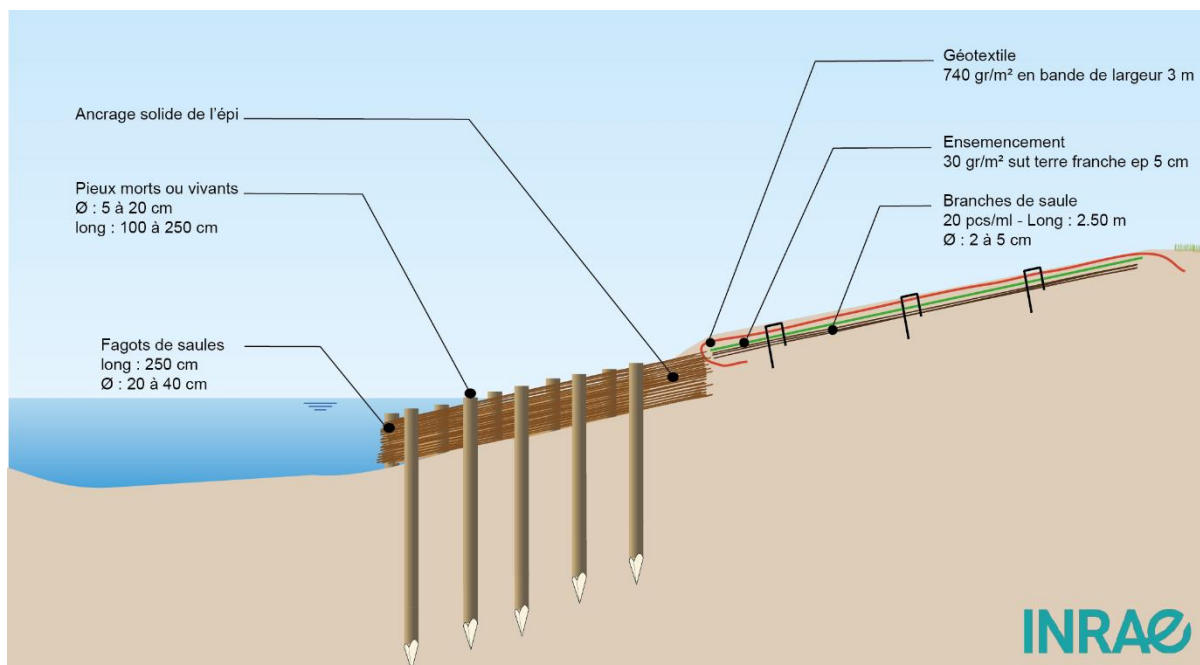


Figure 2-14: Profil schématique d'un ouvrage avec épi en fascines en vue rapprochée

> **Conception historique** : Historiquement, les épis en fascines sont notamment retrouvés dans plusieurs ouvrages du XIX^e siècle (Defontaine, 1833; Eytelwein, 1800; Schemerl, 1809) (Figure 2-15). Ces ouvrages étaient constitués de couches de fascines, maintenues par des piquets souvent clayonnés, et recouvertes de gravier. Les travaux de Defontaine (1833) concernent notamment le Rhin et portent parfois le nom de « tunes » (Labonne et al., 2007). Aujourd'hui, ces épis historiques impliquant une structure complexe en génie végétal ont très largement disparu en France du fait d'une demande en main d'œuvre trop importante et de l'utilisation simple des enrochements avec la machinerie.

> **Éléments de conception** : Les caractéristiques techniques des pieux, branchages et fagots sont détaillées dans la partie 3.2, et résumé dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des épis de fascine (Bonin et al., 2013; Zeh, 2000, 2007)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot		Épis	
	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement latéral	Enfoncement	Diamètre	Longueur	Ancre dans la berge	Espacement
2-3 mm	2-5cm	50-250 cm	5-20 cm	> 150 cm	60-100 cm	Autant que possible	20-40 cm	250 cm	Maximum	Largueur du cours d'eau ou 1,5 à 2,5 fois la longueur d'un épi

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines de pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques aux fascines en épis.

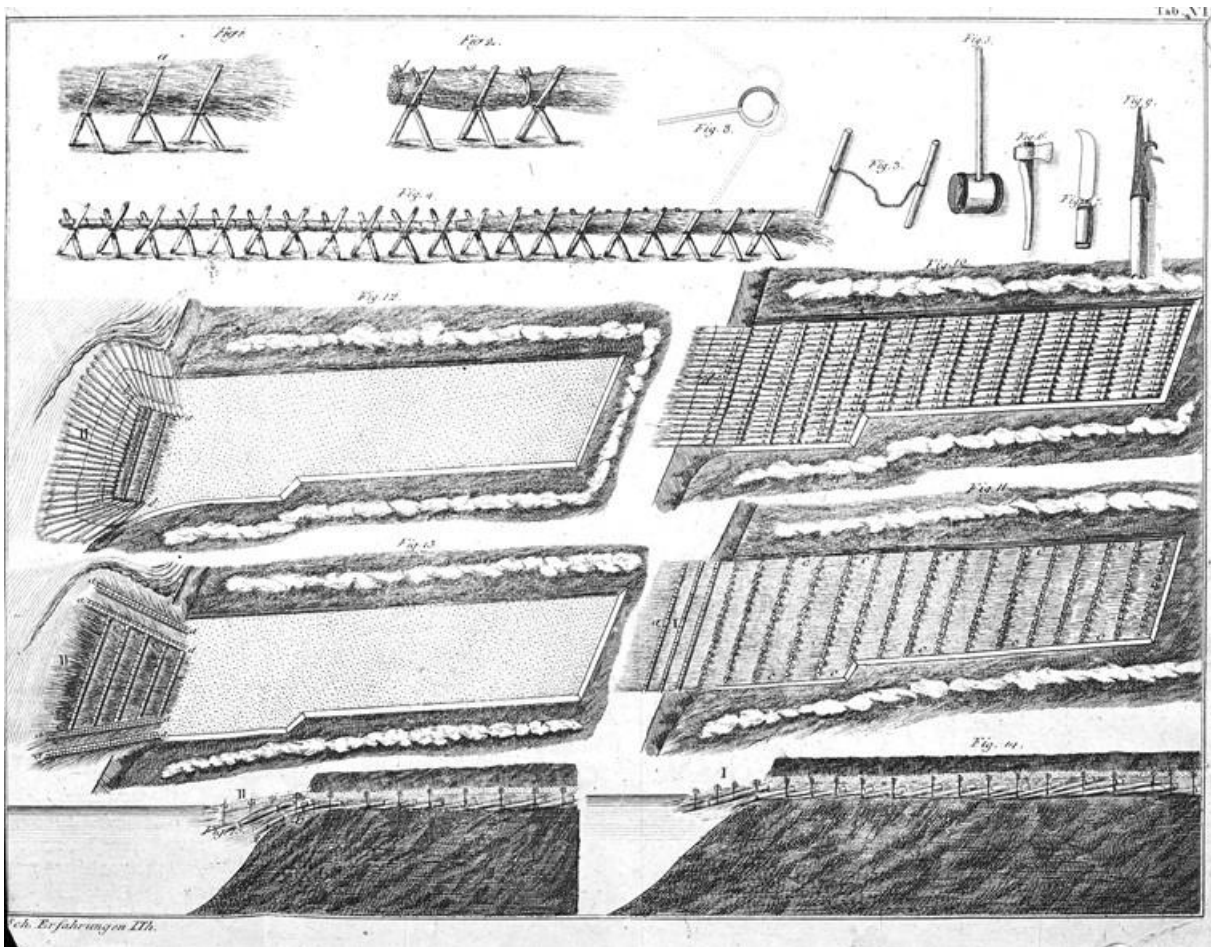


Figure 2-15: Différentes phases de construction d'un épi en fascines d'après Joseph von Schemerl (1809)

Longueur d'un épi

Il n'existe pas de consensus concernant la longueur de l'épi. Certains guides recommandent des longueurs d'épi allant d'un dixième à la moitié de la largeur du chenal actif, certaines longueurs représentent 20 % de la largeur du chenal actif (Lagasse et al., 2009; McCullah et al., 2005). Pour que les effets sur les écoulements soient significatifs, la longueur de l'épi doit être comprise entre $\frac{1}{4}$ et la moitié de la largeur du cours d'eau selon (Rutherford et al., 2000). Adam et al. (2008) ont proposé de prendre $\frac{2}{3}$ de la largeur du cours d'eau comme référence de longueur d'ouvrage. Globalement, on estime qu'un épi doit avoir une longueur comprise en 0.5 à 15 m selon les besoins (Zeh, 2010).

Largeur, hauteur et pente

La largeur de l'épi peut varier entre son implantation au niveau de la berge et son extrémité dans le cours d'eau.

La hauteur des épis est calculée pour coïncider avec le niveau moyen d'écoulement (Zeh, 2010). Des niveaux d'écoulement plus élevés submergeront l'épi, ce qui nécessite une protection adéquate du sommet et des pentes latérales. Il est nécessaire que l'épi diminue en hauteur vers le centre du cours d'eau. Les observations sur le terrain ont montré que des crêtes d'épi plus hautes semblent être associées à une augmentation du comblement par les sédiments de l'espace entre épis (Baird et al., 2015). La pente amont de l'épi doit être comprise entre $1V/2H$ et $1V/3H$, la pente aval doit être plus douce pour limiter le ressaut hydraulique à l'aval, soit entre $1V/3H$ et $1V/4H$. La pente à la tête de l'épi

orientée vers le centre de la rivière varie selon le type de cours d'eau et devrait être de $1V/4H$ à $1V/10H$. La partie supérieure de l'épi est inclinée vers les berges (pente inférieure à $1V/10H$) et son ancrage dans la berge est suffisamment large et profond (Donat, 1995; Schiechl & Stern, 1997).

Orientation

L'orientation de l'épi dépend de l'effet souhaité, les différentes possibilités ont été décrites par Zeh (2000). Un épi déclinant (orienté vers l'aval) forme une niche d'affouillement à la base de l'épi. Un épi perpendiculaire au lit forme un tourbillon à mi-hauteur tandis qu'un épi inclinant (orienté vers l'amont) forme un tourbillon en surface qui permet l'atterrissement des matériaux. L'orientation perpendiculaire a l'avantage de ne pas présenter de risques d'érosion pour les berges. Une mouille se crée à l'aplomb de l'extrémité et une zone de sédimentation se forme généralement directement en aval de l'ouvrage. Pour certains auteurs, les épis sont très souvent orientés vers l'amont. Dans ce cas de figure, l'écoulement est redistribué vers le milieu du lit et on observe la formation d'une mouille en amont de l'extrémité de l'ouvrage. L'ouvrage est orienté entre 60 et 80° vers l'amont par rapport au sens de l'écoulement. Pour les applications de protection des berges, un angle de 60° est recommandé (Baird et al., 2015; Rutherford et al., 2000).

Les épis peuvent être mis en place dans des cours d'eau charriant des matériaux de taille granulométrique très variée (aussi bien limoneux, sableux que graveleux). Certains épis en fascine ont ainsi pu tenir une vingtaine d'années sur des cours d'eau charriant des galets (Bonin et al., 2013). Par contre, comme n'importe quelle protection de berge, les épis ne sont pas recommandés dans les cours d'eau incisés (Rutherford et al., 2000). Ces derniers nécessitent une stabilisation préalable.

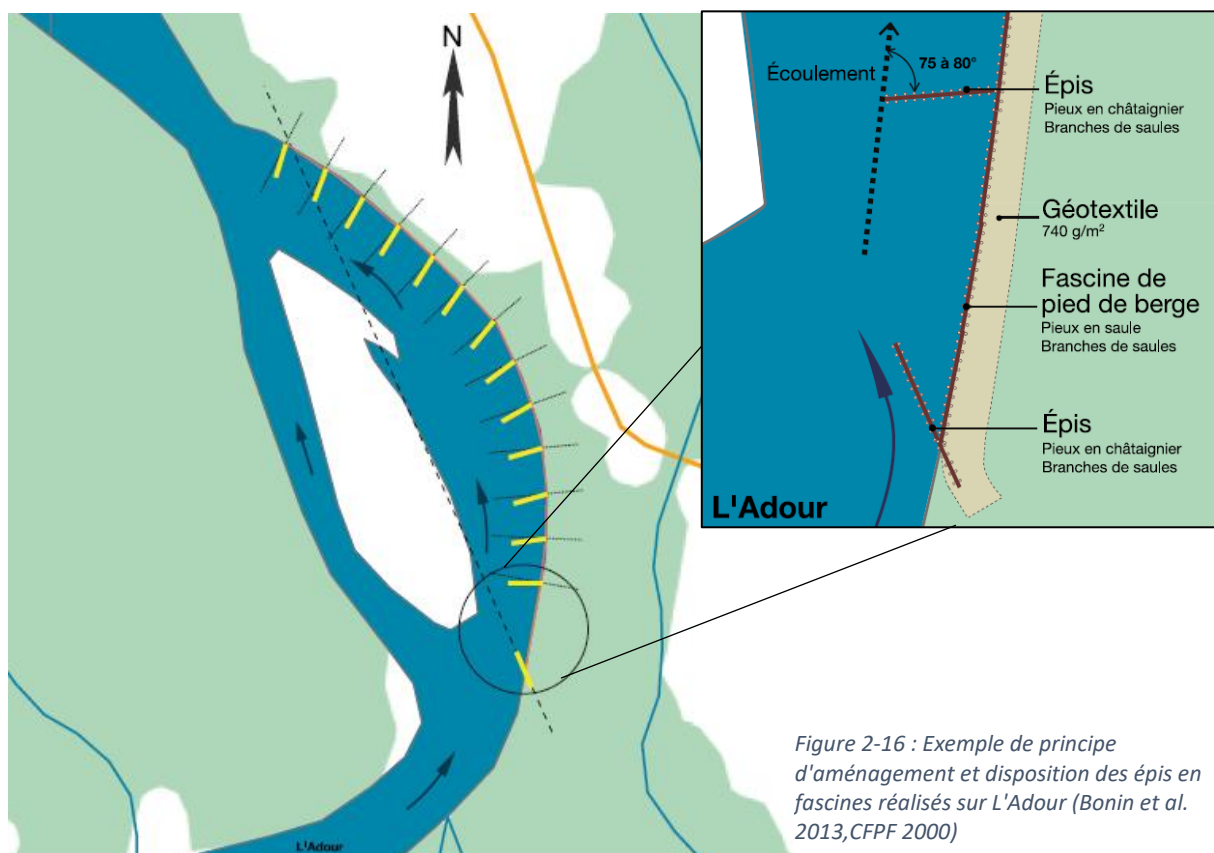


Figure 2-16 : Exemple de principe d'aménagement et disposition des épis en fascines réalisés sur L'Adour (Bonin et al. 2013, CFPF 2000)

Disposition des épis pour la protection de berge

L'agencement des épis dépend de l'objectif recherché (exemple d'aménagement Figure 2-16). Dans certains cas, lorsque l'on cherche à limiter la largeur du lit, les épis sont placés en vis-à-vis, de part et d'autre du cours d'eau. Dans ce cas de figure, l'espacement des épis le long des berges ne doit pas être plus large que la distance entre deux têtes d'épis situées sur les berges opposées, les épis sur les berges opposées doivent avoir la même distance d'écartement (Schiechtl & Stern, 1997). Lorsque l'objectif est de favoriser la formation de petits méandres, ils sont placés en chicanes (Zeh, 2000).

> **Avantages et inconvénients** : Ces ouvrages peuvent être adaptés à différentes largeurs de cours d'eau et évitent les ouvrages de protection longitudinaux (Zeh, 2000). Ce sont des structures flexibles qui peuvent être modifiées, rallongées ou raccourcies avec des dépenses d'investissement modestes. Ils ont une longue durée de vie et de faibles coûts d'entretien et de réparation (Schiechtl & Stern, 1997). Ces structures permettent d'utiliser des techniques de génie végétal pures sans utiliser d'enrochement sur des rivières dynamiques et peuvent faire face à certaines contraintes d'affouillement. Les constructions en épis peuvent créer des zones optimales pour la ponte des œufs et le développement des poissons (Zeh, 2010).

Toutefois, il faut veiller à ne pas utiliser cette technique sur de longs linéaires ou sur les deux berges de cours d'eau au risque de canaliser le cours d'eau et engendrer des désordres hydromorphologiques comme l'incision. Sur le plan hydraulique, ces épis peuvent provoquer des courants transversaux et des affouillements à la tête des épis ou à leur base selon les configurations (déclinants ou inclinants) (Zeh, 2010). Des courants transversaux excessifs peuvent en effet provoquer des tourbillons érosifs, et le décollement des têtes d'épis pouvant nécessiter des coûts d'entretien périodiques plus élevés (Schiechtl & Stern, 1997). Les épis ne sont pas recommandés dans les cours d'eau étroits de moins de 15m de large (Baird et al., 2015) et occupent également plus d'espace dans le lit que les ouvrages longitudinaux de protection des berges.

2.2.2. Fascines de diversification du lit mineur

> **Technique** : Les fascines peuvent être utilisées en tant qu'aménagements de diversification des habitats aquatiques dans le cadre de travaux de restauration. Ces aménagements, mis en place dans le lit mineur du cours d'eau, viennent contraindre l'écoulement et le forcent soit à contourner l'obstacle, soit à passer par-dessus et à le submerger. La réorientation du courant influence la morphologie et l'hydraulique agissant par ce biais sur la fonctionnalité de la portion de cours d'eau considérée (Douane, 2011). Le cours d'eau présente ainsi des diversités d'habitats et de facies



Figure 2-17: Fascines de diversification en chevron réalisé sur l'Yzeron ©André Evette

d'écoulement, de hauteurs d'eau et des courants, accompagnés d'une diversification de la granulométrie au niveau de la zone d'ouvrage. Cela contribue à l'oxygénation et diversifie les habitats avec la mise en place de bois tout en créant des caches pour la faune aquatique. Ces techniques visant à améliorer la biodiversité sont de plus en plus employées en France, à l'instar du bois mort (tronc, souche, branches, etc.) disposé dans le cours d'eau pour favoriser la diversification.



Figure 2-19: Fascines de diversification en diagonal réalisées sur la Leysse © André Evette



Figure 2-18: Fascine de diversification en arche réalisée sur la Leysse © André Evette

À des fins de diversification, les fascines peuvent se présenter sous différentes formes. Elles résultent généralement de la créativité du maître d'œuvre. Perpendiculaire au courant ou en diagonal, sous la forme de pseudo épi ou seuil, plate ou courbée, la fascine se localise soit complètement dans le lit de la rivière soit allant du lit à la berge (Figure 2-17, Figure 2-19 et Figure 2-18). Les modalités de conception et de mise en œuvre sont tout autant diversifiées. Il n'existe pas de formes ni de dimensions universelles. Il est également possible de retrouver des barrages transversaux en fascines ayant pour objectif la diversification. Puisque présentant des fonctions diverses, cette technique particulière sera développée plus loin dans ce guide.

> **Avantages et inconvénients** : Ce type d'ouvrage qui génère une variété de granulométrie et d'écoulements associés à une végétation plus proche de la rivière, favorise l'hétérogénéité des habitats. Dans les milieux dégradés, il permet à la faune piscicole, de disposer d'habitats plus

favorables pour leur reproduction et leur croissance. En concentrant les faibles débits dans un lit plus étroit, en créant des fosses, ces aménagements permettront aux poissons et autres espèces aquatiques de mieux résister en cas de sécheresse. Ce type d'ouvrage est peu coûteux et de nombreuses variations peuvent être installées.

Toutefois, la présence de végétation dans le lit du cours d'eau peut augmenter la rugosité ou rehausser localement le fond de la ligne d'eau et avoir des impacts sur la hauteur d'eau en crue. Par ailleurs, le travail dans le lit mineur d'un cours d'eau doit être justifié et faire l'objet d'autorisations spécifiques au titre du code de l'environnement.

2.2.3. Fascines transversales

> **Technique** : Outre les épis et les fascines de diversification, d'autres techniques consistent à l'agencement transversal des fascines. Perpendiculaires aux ravines et constituées de pieux en bois derrière lesquels on empile des fagots vivants (Figure 2-20), les barrages en fascines peuvent participer à la stabilisation du lit en retenant les sédiments dans les ravines (Belidor 1739, Depelchin 1887, Bernard 1927). Ce type d'ouvrage, sous la forme de barrière solide, piège les éléments fins entre les branches enchevêtrées. Cette technique est particulièrement destinée à des cours d'eau temporaires.

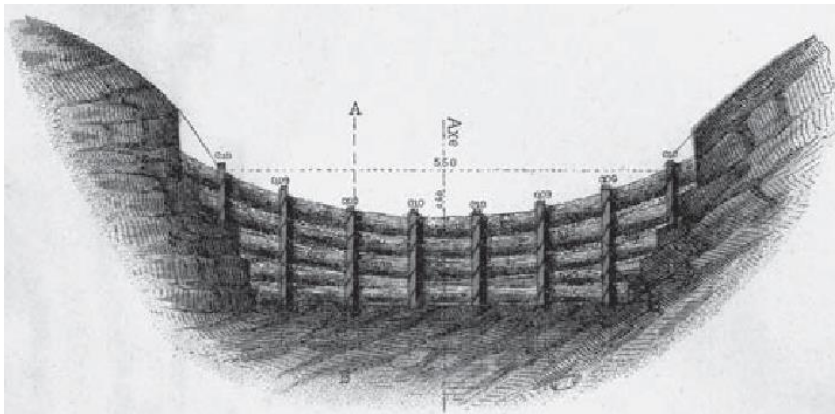


Figure 2-20: Barrage en fascinage
illustré par Demontzey 1875

Dans cette configuration transversale, le caractère vivant des fascines ne peut être assuré dans les cours d'eau du fait de l'immersion constante des fagots. Les fagots constamment immergés ne survivront pas, ce qui rend limitée la durabilité de cette technique lorsqu'il y a des écoulements permanents. Il est important de rappeler que la survie est également dépendante de la quantité de matériaux terreux ajoutée dans la fascine lors de l'installation. Cette technique n'est pas appropriée pour les cours d'eau transportant des sédiments grossiers du fait d'un fort risque d'endommagement de l'ouvrage (Demontzey, 1875). Pour renforcer la structure, les fascines peuvent être combinées ou renforcées avec des opérations de génie civil, par exemple des gabions ou clôtures en bois d'acacia (Bechmann, 1905).



Figure 2-21: Fascines de lit de ravine juste après installation et quelques mois après © Freddy Rey

En milieu à forte pente comme en montagne, les fascines de lit de ravine apparaissent comme adaptées aux lits de petites ravines de par leur forte résistance face aux contraintes hydrauliques (Figure 2-21). Les fascines de lit de ravines sont également appelées « barrages de broussailles » (Hudson 1981) ou « embroussaillage des ravins » (Zeh, 2000). Ce sont des ouvrages qui s’opposent aux flux et écoulements concentrés en piégeant les sédiments, participant ainsi à la stabilisation des sols et à la lutte contre l’érosion. Les fascines sont particulièrement efficaces dans les ravines du fait de l’importante rétention des sédiments érodés favorable au développement des boutures et des plants (Rey, 2002). Toutefois elles ne garantissent pas un piégeage immédiat des sédiments, cette fonction n’est possible qu’une fois la reprise des boutures engagée. Dans une ravine, ces ouvrages peuvent être efficaces si la surface drainée n’est pas trop importante (Rey, 2002).

> Éléments de conception:

Pour les barrages en fascine, il existe des éléments de conception et de mise en œuvre anciens qui distinguent, selon leurs dimensions, les fascinages dit de 1^{er} ordre et de 2^{ème} ordre (Evette et al., 2009):

- Les fascinages de 1^{er} ordre, 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 encastrés de chaque côté dans les berges et la hauteur finale de l’ouvrage est d’environ 1,5 m (Figure 2-20).
- Les fascinages de 2^{ème} ordre ne comprennent que 2 fagots fixés au sol par des piquets de saules qui les traversent (Bechmann, 1905; Bernard, 1927).

Les dimensions des éléments constitutifs des barrages sont détaillées dans le Tableau 7.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des barrages en fascines (Bélidor 1739)1730 ; Depelchin, 1887 ; Bernard, 1927)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot	
Diamètre	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement latéral	Enfoncement	Diamètre	Longueur
2-3 mm	2-5 cm	50-900 cm	5-20 cm	> 150cm	100 cm	minimum 50 cm	100 cm	Longueur des branches

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines de pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques aux fascines en épis.

Pour les fascines de ravines, il apparaît comme pertinent de combiner, dans les lits de ravines, les avantages des fascines aux avantages d’un tapis de boutures, qui eux présentent une partie aérienne

permettant de piéger immédiatement tel un peigne les sédiments (Rey, 2002). Les « fascines bouturées » qui en résultent sont construites par ajout de rangées de boutures sur l'atterrissement de matériaux au-dessus de la fascine créant ainsi des haies végétales allant d'une berge à l'autre du lit. Un tel ouvrage de 1 m² peut piéger une quantité moyenne de sédiments de 0,10 m³ sur un an (Rey et al., 2003).

La mise en œuvre des fascines de lit de ravine a été détaillée par Rey (2012) en ce qui concerne les ravines marneuses. En procédant de l'aval vers l'amont, la mise en œuvre débute par l'établissement d'un réseau de banquettes horizontales et larges de 30 à 50 cm, disposées en cascade. La terre déblayée servant de remblai pour l'atterrissement à l'amont de la fascine. Les ouvrages sont disposés avec un espacement variable, entre 2 m et 6 m selon la pente. La mise en place des pieux peut se faire à partir de trous creusés à la barre à mine, à la perforatrice, soit plantés à la masse. Ils doivent dépasser de 50 cm au-dessus de la surface des matériaux meubles. Les fagots, constitués de boutures liées par du fil de fer ou de la corde³, sont disposés directement contre les pieux. Deux à cinq fagots sont nécessaires en fonction de la hauteur souhaitée. Si plusieurs fagots sont nécessaires sur la longueur, les boutures doivent se recouper entre elles. Les fagots et l'ensemble de l'ouvrage sont recouverts finalement avec de la terre de remblai de manière à ce que les boutures soient en contact avec le sol.

Concernant les fascines de lit de ravine, le dimensionnement des pieux, des branchages et des fagots est résumé dans le Tableau 7.

Tableau 7: Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines de lit de ravine (adapté de Rey 2012)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot	
Diamètre	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement	Enfoncement	Diamètre	Longueur
2-3 mm	2-5 cm	50-200 cm	>5cm	70-100 cm	50-100 cm	Minimum 50 cm	20-40 cm	50-200 cm

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines de pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques aux fascines en épis.

> **Avantages et inconvénients** : Les fonctions associées à ces techniques sont diverses, tant des fonctions de diversification que de stabilisation du lit. Elle peut permettre de fixer le fond du lit de la ravine en retenant les des sédiments et permet une protection contre l'incision des fonds de ravines (Rey, 2002, 2012). Les fascines vont jouer un rôle de résistance aux processus érosifs et d'accumulation des sédiments. Les saules sont bien adaptés à l'enfouissement et vont pouvoir persister avec le dépôt des sédiments, continuant à assurer leur rôle de peigne.

Toutefois, la Directive-cadre sur l'eau (DCE), les SDAGE et les SRCE sont, en France, autant d'outils réglementaires qui encouragent plutôt à l'effacement des ouvrages transversaux sur les cours d'eau pour le rétablissement de la continuité écologique. La dynamique actuelle veut plutôt mettre l'accent sur la restauration de l'écosystème naturel en déconseillant ce type de techniques sur les cours d'eau. Ces ouvrages présentent également des risques de contournement et peuvent aussi être remplacés par des ouvrages en bois (Roman, 2009).

³ Le fil de fer peut être remplacé par de la corde, en fibres de coco ou encore chanvre, facilement dégradable à l'inverse du fer qui tend à rouiller et pollue les sols.

2.2.4. Plateforme/ grillage en fascines (Zinkstuk/Sinkstück)

> **Technique** : Les « *zinkstukken* » ou encore fascinage « en barbe », pouvant être traduit par des plateformes à échouer ou grillage en fascines, sont des grandes nattes tissées à la main et constituées de fagots de branches de saule et saucissons (Ronna, 1890; Scheck, 1885). Cette structure consiste en l'adjonction de grillages formés par les saucissons pour supporter les fascines. Ce cadre permet à la structure de glisser dans la rivière une fois terminée avant d'être lestés de roches. Sous le poids des lests, les plateformes coulent au fond des canaux, estuaires et rivières en s'appliquant sur le lit même pour former une plateforme robuste à des fins de protection et de stabilisation (Figure 2-22). Les plateformes à échouer en fascines constituent une technique ancienne, beaucoup pratiquée aux Pays-Bas où les pierres manquaient pour le revêtement des ouvrages des cours d'eau. Il est difficile à établir cette technique n'a pas été utilisée en France puisque l'appellation française n'est pas fixe. Il semble toutefois que cette technique soit toujours vivante en Europe, comme en témoigne un ouvrage récent réalisé à Hensies en Belgique.



Figure 2-22: Mise en place d'un zinkstuk (plateforme à échouer) – Vieland, Pays-Bas (années 1930) © Islander – Dirk Bruin

La structure est réalisée à la main, les plantations de taillis fournissant le bois pour le tressage du matelas. La structure est fabriquée sur terre pour ensuite être remorquée jusqu'au site puis coulée au fond avec du lest. L'assemblage commence par une sous-couche en forme de treillis ou grillage de saucissons attachés ensemble à leurs intersections (Figure 2-23). Kümmer (1849) conseille de poser les saucissons inférieurs transversalement au courant afin d'éviter les infiltrations en sous-œuvre. Avec cette configuration, le courant agit sur le côté de la plate-forme qui offre moins de résistance. Les saucissons sont attachés solidement pour former le treillis avec de la corde ou des harts, lien fait d'osier ou d'autre bois souple. Il est possible, vers les extrémités des encadrements et dans le corps de la plateforme, d'utiliser une corde plus forte et plus longue ponctuellement, à des distances variant de 7 à 10 m, permettant de servir de lien avec le treillis supérieur (Kümmer, 1849). La partie intermédiaire est composée de plusieurs couches de fascines, chaque couche étant perpendiculaire à celle du dessous. Les fascines sont placées de manière à assurer un recouvrement d'environ un tiers, en largeur, avec la fascine précédente. Il faut compter 3 lits de fascines successifs et plus idéalement six à sept lits (Kümmer, 1849; Ronna, 1890). Les couches de fascines sont liées par des piquets clayonnés. Le tout est ensuite recouvert d'un autre treillis de saucissons ayant les mêmes dimensions que la sous-couche initiale. La structure est ensuite serrée avec des cordes de chanvre formant un sandwich, comme illustré Figure 2-23. La structure doit rester flexible pour se prêter facilement aux mouvements du sol. Une fois assemblées, les nattes sont de grandes dimensions, de 10 à 150 m de long pouvant s'étendre sur les rives et les digues pour une largeur supérieure à 20 m et une hauteur d'environ 1 m

(Evette et al., 2009; Kümmer, 1849; Ronna, 1890; Van Breen, 1920). Les plateformes peuvent être empilées afin d'augmenter la hauteur de l'ouvrage et le porter ainsi à une hauteur déterminée d'avance (Kümmer, 1849; Ronna, 1890). La structure complète est finalement remorquée sur site puis coulée grâce à un lest, pouvant se composer de sable, de terre (parfois glaise), de pierres ou de décombres pour un ratio de 720 kg/m² (Kümmer, 1849; Ronna, 1890).

> **Éléments de conception** : Les caractéristiques techniques des saucissons, treillis et fagots sont détaillées et résumées dans le Tableau 8.

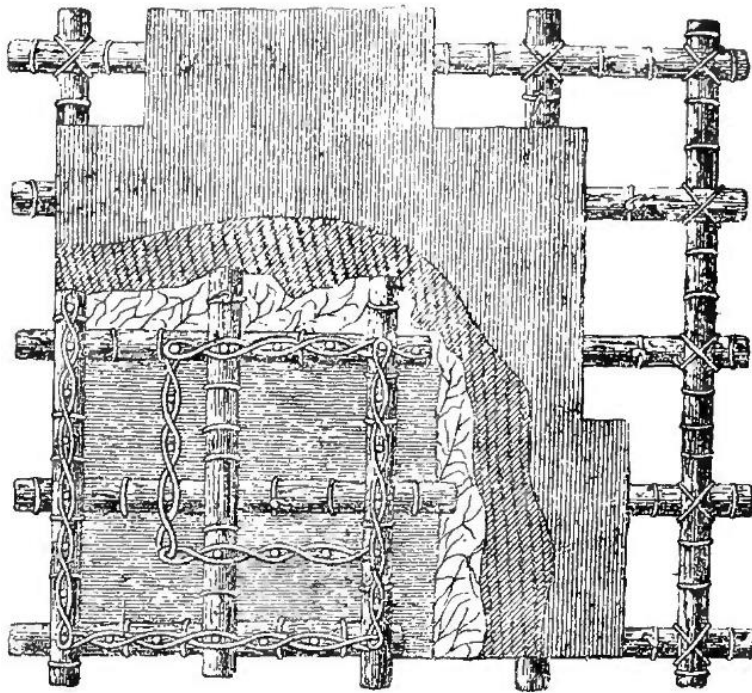


Figure 2-23: Fascinage "en barbe" présentant les différentes couches de la structure par Ronna (1890)

Tableau 8: Tableau récapitulatif du dimensionnement des plateformes à échouer en fascines (Kümmer 1849, Ronna 1890, Van Breen 1920, Evette et al. 2009)

Harts		Piquets		Saucissons			Treillis		Fagot	
Longueur	Longueur	Diamètre	Diamètre	Longueur	Lien tous les..	Longueur	Espacement des saucissons (milieu en milieu)	Longueur	Diamètre	
110 – 120 cm	120-150 cm	15cm	45cm	Dépend de l'usage	25-50cm	10-150 m	90cm	3.50m	20cm	

Pour augmenter la solidité de l'ouvrage, l'espacement des saucissons longitudinaux peut être amené à 70 cm de milieu en milieu, chaque pièce de treillis devant dépasser de la plateforme d'environ 30 cm (Kümmer, 1849).

2.3. Sur les talus

2.3.1. Fascine drainante

> **Technique** : Placées avec un angle sur la pente, un côté de la fascine dirigé légèrement vers l'amont et l'autre qui descend vers l'aval, les fascines peuvent également servir de système drainant (AMEC, 2012; Lewis, 2000). Toujours pratiqué dans de nombreuses régions du monde, ce système est utilisé sur les pentes humides où il y a des évidences d'infiltration ou de résurgences modérées à élevées, contribuant à la déstabilisation du talus (Gray & Sotir, 1996). Les systèmes de drainage à l'aide de fascines vivantes permettent le développement de la végétation et réduisent les risques d'érosion et de glissement grâce à un meilleur drainage, ce qui augmente la stabilisation de la pente. Les plantes, grâce à l'évapotranspiration après l'absorption par les racines, permettent également une forme d'épuisement ou d'évacuation accrue de l'eau souterraine. Les fascines drainantes peuvent également être mises en place en association avec des structures de protection inférieures en pied de berges (AMEC, 2012; Lewis, 2000). Pour améliorer les conditions de drainage local au niveau d'un ouvrage de fascines en pied de berge, des fascines vivantes supplémentaires sous forme de drains peuvent être installées immédiatement en amont du site (Campbell et al., 2008).

Le système consiste en des fagots cylindriques de branches vivantes placés dans des tranchées, et disposées dans la pente comme un réseau de drainage. L'objectif est de drainer l'excès d'humidité à l'origine de l'instabilité de la pente en guidant le surplus d'eau vers des chenaux (Figure 2-24). Ces fascines drainantes sont conçues pour collecter et rediriger les écoulements de surface et les écoulements souterrains peu profonds (Campbell et al., 2008). Les fascines drainantes sont généralement réalisées avec des fagots vivants, de large diamètre d'au moins 30 cm pour le drain central, installés dans une tranchée (Campbell et al., 2008). Les espèces qui prennent racine absorbent l'eau du sol, ce qui limite les écoulements et évite une partie de l'érosion (Zeh, 2007).

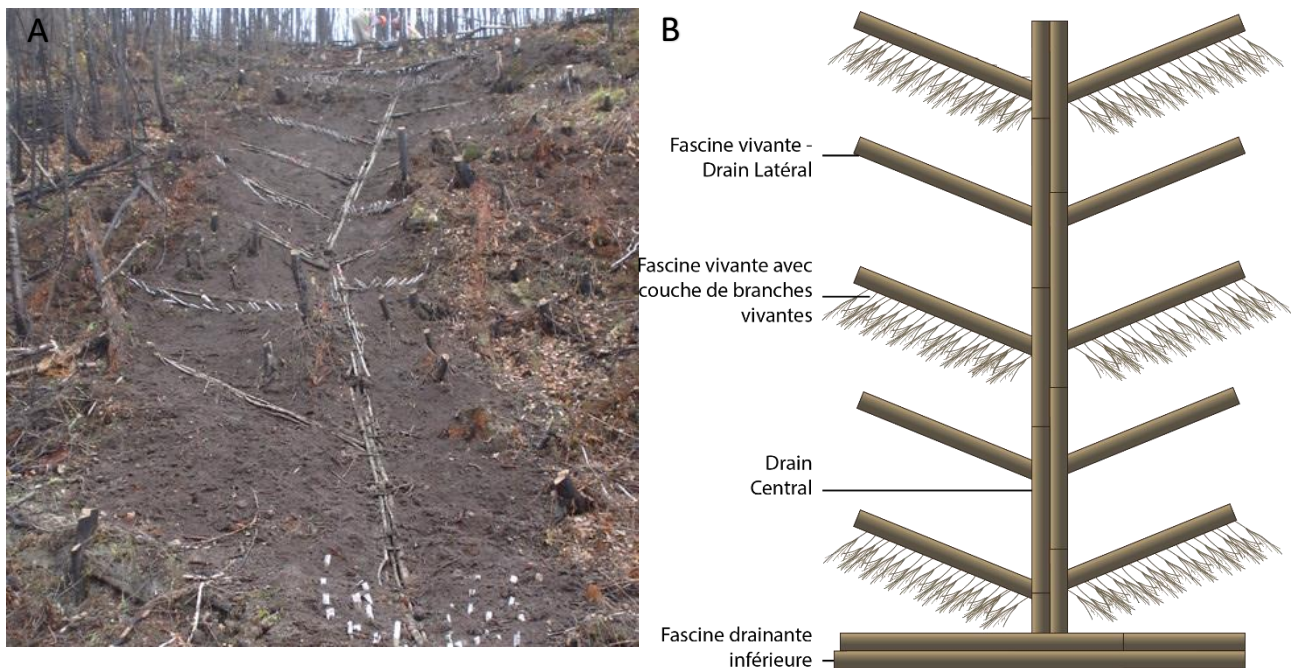
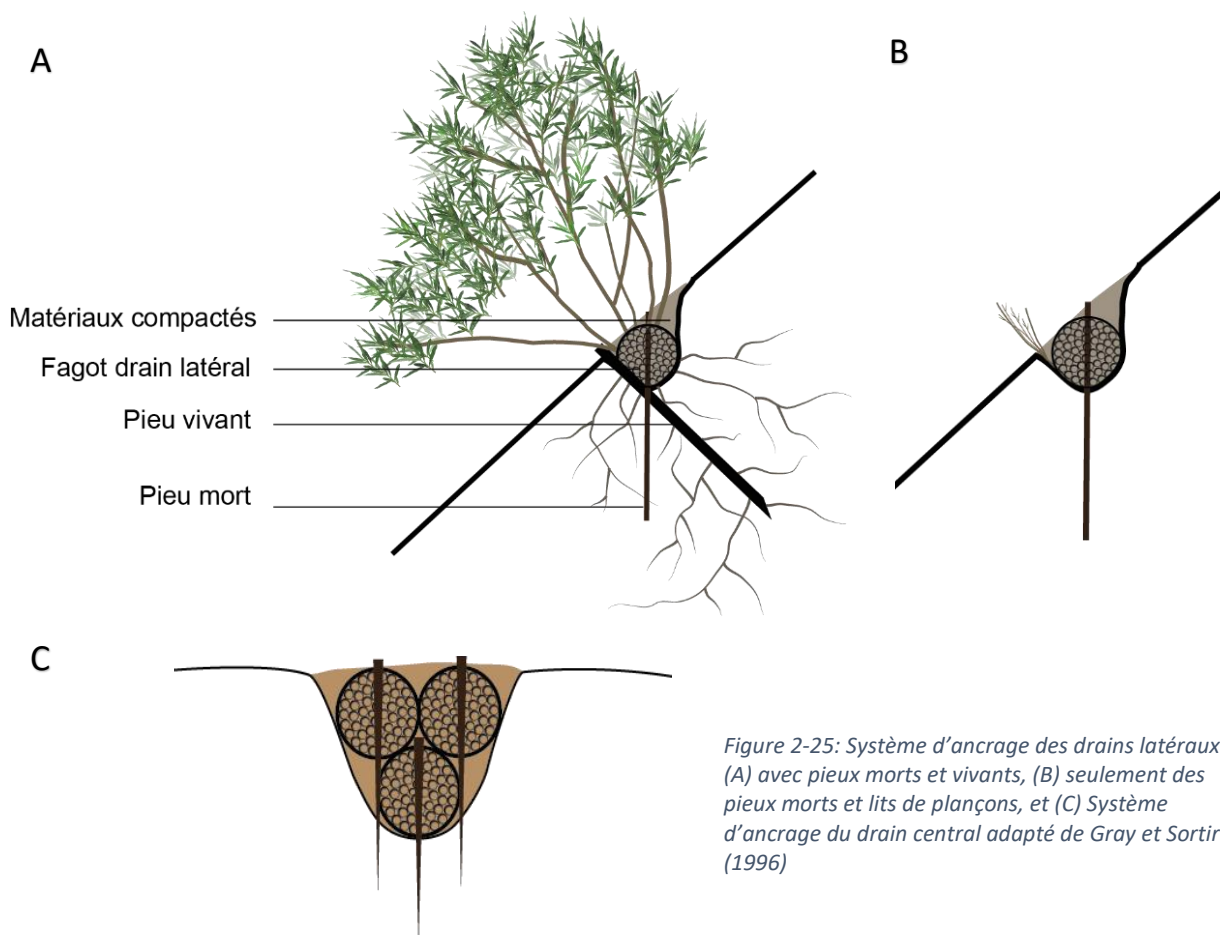


Figure 2-24: (A) Vue de l'installation finalisée d'une fascine drainante à Beaver Creek en Octobre 2004 © Terra Erosion Control et (B) Schématisation détaillée de la configuration en chevron de fascines drainantes, adapté selon Sotir et McCaffrey (1997)

Il convient d'utiliser une configuration en chevron (ou plus rarement en épi), là où se produit l'écoulement (Campbell 2008). Installées en chevron, les rangées de fascines vivantes se raccordent à un drain central de manière oblique (Figure 2-24). En général, les sections latérales en chevron sont composées de fagots de fascines vivantes uniques, tandis que le drain central, qui sert de drain collecteur primaire, est construit avec trois faisceaux de fascines regroupées (Gray & Sotir, 1996). Le ou les fagots constituant le drain central sont de plus gros diamètres que les fagots des drains latéraux (Donat, 1995; Gray & Sotir, 1996). Le système d'ancrage des fagots est adapté selon la position de celui-ci dans l'ouvrage, entre fagot latéral et fagot central (Figure 2-25). Des drains supplémentaires peuvent être installés en amont du drain central comme moyen supplémentaire d'améliorer les conditions locales de drainage (Campbell et al., 2008). Des roches / pierres de drainage, des pieux vivants voire même en fonction du contexte des tuyaux de drainage peuvent également être incorporés dans le drain central dans des conditions plus humides (AMEC, 2012). Les drains latéraux peuvent être construits avec ou sans lits de plançons (Figure 2-25 B&C).

Outre la capacité à ralentir et drainer les écoulements, la fascine drainante possède également un intérêt particulier dans le piégeage des matières en suspension en tant que barrière végétale, notamment sur les éléments les plus grossiers (Ouvry et al., 2012).



Deux guides développent la mise en place des fascines drainantes : Gray and Sotir (1996) et Schiechl and Stern (1996).



Figure 2-26: Tracé peint sur la pente © Terra Erosion Control



Figure 2-27: Excavation des tranchées © Terra Erosion Control



Figure 2-28: Fagots principaux et latéraux mis en place avant remblayage © Terra Erosion Control

- 1) Le système central est construit en premier. En commençant par le sommet de la pente, creuser la tranchée principale dans le sens et jusqu'au bas de la pente (Figure 2-26). La tranchée doit être de forme trapézoïdale d'une profondeur de 45 à 50 cm, d'une largeur de 30 à 35 cm à la base et 40 à 45 cm au sommet. L'implantation du système de drain doit suivre la ligne de plus grande pente.
- 2) Creuser les tranchées latérales en commençant par le sommet de la pente et en descendant avec une pente de 20 à 45° pour rejoindre la tranchée centrale. La première tranchée latérale doit rejoindre la tranchée centrale à quelques dizaines de centimètres sous le sommet de celle-ci (Figure 2-27).

Ces tranchées latérales doivent être espacées de 90 cm à 2.5 m en fonction de la pente (Tableau 10), généralement parallèles les unes aux autres, et avoir une longueur de 3 à 8 m.

- 3) Assembler les fagots (partie 3.2) avec du fil de fer galvanisé⁴.
- 4) Placer le fagot le plus large disponible (30 à 40 cm) au fond du drain principal. Ce fagot est fabriqué à partir de matériaux vivants maintenus par des pieux morts, plantés tous les mètres sur sa longueur par battage mécanique si le terrain le permet ou manuellement.
- 5) Placer deux fagots de 30 à 40 cm de diamètre fixés par des pieux morts plantés en quinconce, tous les mètres au-dessus (battage mécanique ou manuellement), couper les pieux à ras au niveau de la fascine ou dépassant de 5 à 10 cm.
- 6) Les fagots latéraux en chevron sont installés dans les tranchées précédemment construites. Ces fagots vivants doivent être suffisamment longs pour recueillir l'eau des zones d'infiltration sur la pente et doivent rejoindre au drain collecteur central (Figure 2-28).

⁴ Le fil de fer peut être remplacé par de la corde, en fibres de coco ou encore chanvre, facilement dégradable à l'inverse du fer qui tend à rouiller et pollue les sols.



7) Recouvrir de terre et tasser l'ouvrage pour garantir une bonne stabilité et un bon contact branches/terre (Figure 2-29).

Figure 2-29: Mise en place terminée © Terra Erosion Control

Sous forme de profil, les étapes de mise en place des drains latéraux suivent la chronologie Figure 2-30.

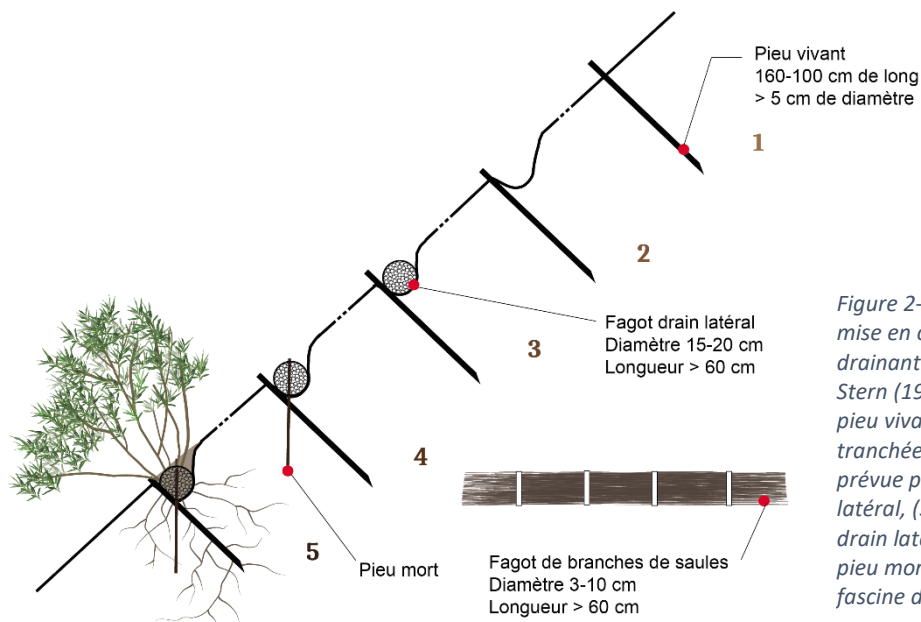


Figure 2-30: Profil par étape de la mise en œuvre d'une fascine drainante, inspiré de Schiechl et Stern (1996). (1) Mise en place du pieu vivant, (2) Implantation de la tranchée latérale, prévue pour accueillir un drain latéral, (3) Mise en place du fagot drain latéral, (4) Mise en place du pieu mort, (5) Développement de la fascine drainante

S'il est nécessaire d'avoir un drainage permanent dans le temps, il peut être utile de procéder à un entretien périodique en essayant de favoriser la croissance des plantes qui se sont développées à partir du fagot afin de maintenir leur capacité de drainage.

> **Éléments de conception** : le dimensionnement des pieux, des branchages et des fagots est détaillé dans la partie 3.2 et résumé dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines drainantes (Donat, 1995; Gray & Sotir, 1996)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot drain central		Fagot drain latéral	
	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement latéral	Enfoncement	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur
2-3 mm	3-10 cm	>60 cm	> 5 cm	> 100 cm	100 cm	Au minimum 50 cm	30-40 cm	> 60 cm	15-20 cm	> 60 cm

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines en pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques aux fascines drainantes.

Le Tableau 10 décrit l'espacement latéral des fascines drainantes latérales en fonction de la pente. Plus la pente est importante, plus les fascines sont rapprochées.

Tableau 10 : Espacement recommandé pour les rangées de fascines vivantes sur les pentes (Gray & Sotir, 1996)

Inclinaison de la pente (H :V)	Distance entre les tranchées de fascines (m)
1:1 à 1.5:1	0.3 - 0.9
1.5:1 à 2:1	0.9 - 1.5
2:1 à 2.5:1	0.9 - 1.5
2.5:1 à 3:1	1.2 - 1.5
3:1 à 4:1	1.5 - 2.1
4:1 à 5:1	1.8 - 2.4

Les essences utilisées sont décrites en partie 3.1.1.

> **Avantages et inconvénients** : Cette technique permet de traiter des problèmes de résurgence et de drainer des sols argileux avec des techniques purement végétales. L'eau drainée peut être dirigée selon les besoins vers la végétation, la ligne de fossé, et/ou un drain français (système de drainage utilisant la gravité pour faire circuler l'eau au sein d'un tuyau). Une fois que la végétation est établie, le couvert végétal va également participer à la fonction de drainage par absorption pour les besoins nutritifs (AMEC, 2012). Toutefois, une grande quantité de matériaux vivants est nécessaire.

2.3.2. Fascine de pente

> **Technique** : les fascines de pente sont des ouvrages horizontaux placés sur les talus pour lutter contre l'érosion des sols (Figure 2-31 et Figure 2-32). Ce type d'ouvrage peut être également utilisé sur des surfaces planes pour lutter contre le ravinement, notamment dans le milieu agricole (Ouvry et al., 2012; Richet et al., 2017). La végétation seule est responsable du ralentissement de l'écoulement, dont la vitesse peut être divisée par 3 (Richet et al., 2017). Les fascines de talus freinent le ruissellement, limitent le transfert de terre vers l'aval et par conséquent provoquent des zones de sédimentation (Coufourier et al., 2008). Les fascines ainsi mises en place agissent comme des barrières végétales, devenant avec le temps des haies arbustives.



Figure 2-31: Fascines de pente à St Gingolph juste après l'installation (A) et après développement (B) © Pierre-André Frossard

Les fascines de pente peuvent être réalisées en bois mort ou vivant (Richet et al., 2017). En bois mort, les fascines sont appelées fascines mortes et qualifiées de barrière végétale, leur fonction étant basée uniquement sur les caractéristiques mécaniques des branches. En bois vivant, la fascine évolue vers une haie arbustive. Dès leur installation, les branchages sont efficaces pour freiner le ruissellement et participer à la sédimentation (Richet et al., 2017; Zeh, 2010). Puis les arbustes qui vont se développer vont lutter contre le ruissellement tout en luttant contre l'érosion grâce à leur systèmes aérien et racinaire (Coufourier et al., 2008).

Certains guides indiquent un dimensionnement des fagots entre 30 à 50 cm (Zeh, 2010). Pourtant, les fagots utilisés peuvent être d'un diamètre inférieur (exemple de l'ouvrage à Saint-Gingolph, Figure 35). On peut trouver des fagots jusqu'à 10 cm de diamètre selon les besoins et spécificités du site, les gros diamètres sont à réserver à des secteurs à très fortes contraintes érosives. Quelles que soient leurs dimensions, les fagots peuvent comprendre entre 50 à 80 % de branches mortes (Zeh, 2010). Par ailleurs, puisque les conditions stationnelles sont potentiellement plus arides sur les talus qu'en berge de rivière, avec un contact direct avec l'eau occasionnel, on choisira les espèces en conséquence (soit comme dans toute conception d'ouvrage les choix des espèces doivent être réfléchis en fonction des conditions stationnelles). Les essences utilisées sont décrites en partie 3.1.1.

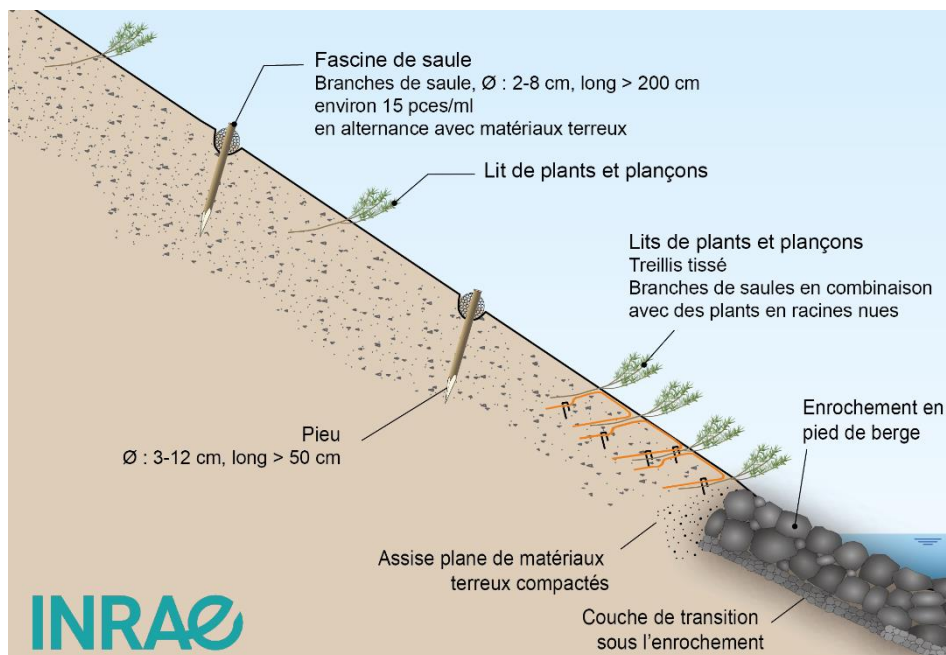


Figure 2-32: Exemple d'ouvrage incluant des fascines de pente

La mise en œuvre de cette technique ne diffère que très peu de la mise en place des drains latéraux d'une fascine drainante. Les fagots doivent être placés dans une tranchée légèrement plus large que le fagot, les extrémités plantées dans le sol. 1/3 de l'ouvrage doit sortir de la terre et 2/3 enfoncés dans la tranchée (Coufourier et al. 2008). Les pieux sont battus mécaniquement avant que l'ouvrage soit recouvert de matériaux terreux. Une variante à cette technique consiste à ajouter des boutures de saule dans le sol le long de la fascine (tous les 5 cm environ à environ 40 cm de profondeur), permettant la mise en place d'une haie arbustive dense en peu de temps (Richet et al., 2017).

> **Éléments de conception** : le dimensionnement des pieux, des branchages et des fagots est détaillé dans la partie 3.2 et résumé dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des fascines de talus (Gray & Sotir, 1996; Zeh, 2007; Coufourier et al., 2008; Zeh, 2010; Lequertier et al., 2015)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot	
Diamètre	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement	Enfoncement	Diamètre	Longueur
2-3 mm	2-8 cm	200-400 cm	3-12 cm	150 cm	30-100 cm	20-50 cm	10-50 cm	150-900 cm

> **Avantages et inconvénients** : Toujours pratiquées de nos jours, les fascines de pente sont faciles à mettre en place et offrent une efficacité immédiate. Elles s'adaptent aux irrégularités du terrain, et présentent un faible encombrement. Cependant, une grande quantité de matière végétale est requise pour ce type d'ouvrage. Certaines études montrent également une durée de vie limitée, maximum 7 ans selon Richet et al. (2017), dépendante des dépôts sédimentaires. Cette technique a un effet peu important en profondeur, et semble sensible aux mouvements du sol (Zeh, 2010).

2.3.3. Matelas en fascine

> **Technique** : Sur une rive à protéger, les matelas en fascines consistent en des fagots de branches posés verticalement le long de la berge, formant un matelas assez épais pour recouvrir le sol (Figure 2-33). L'extrémité inférieure des branches est plantée dans le sol permettant la reprise des végétaux. Le matelas assure une première protection mécanique lors de la mise en place en formant une couche dense sur la surface du sol. Il protège de l'effet du courant. Par la suite les branches et les rameaux prendront racine dans le sol profondément. Plus les racines s'enfonceront profondément dans le sol et plus la stabilisation du terrain en profondeur sera améliorée.



Figure 2-33: Matelas en fascines réalisés en Roumanie
© André Evette

Cette méthode, décrite dès 1730 par Bernard Forest de Belidor (Figure 2-34), est considérée comme ancienne mais n'est pas utilisée en France. La mise en œuvre s'effectue sur un terrain préalablement nivelé sur lequel on vient disposer les fagots afin de recouvrir le sol. Les fagots peuvent être constitués de branches vivantes avec jusqu'à 50% de branches mortes (Belidor 1730, Zeh 2010). L'extrémité inférieure des branches est plantée dans le sol ou éventuellement dans le lit de la rivière. L'extrémité supérieure des branches des fagots doit recouvrir l'extrémité inférieure de la prochaine rangée (Zeh, 2010). Il est important lors de la création du matelas de fagots d'ajouter de la terre au sein des fagots afin d'assurer la reprise. Les pieux sont battus mécaniquement lors de la mise en place pour éviter qu'ils soient emportés par le courant. Une fois les travaux terminés on recouvre le tout d'une fine couche de terre qui laisse encore apparaître les branches afin de favoriser le contact entre la terre et les branches et assurer leur reprise.

> **Éléments de conception** : Le dimensionnement des pieux, des branchages et des fagots est détaillé dans la partie 3.2 et résumé dans le Tableau 12.

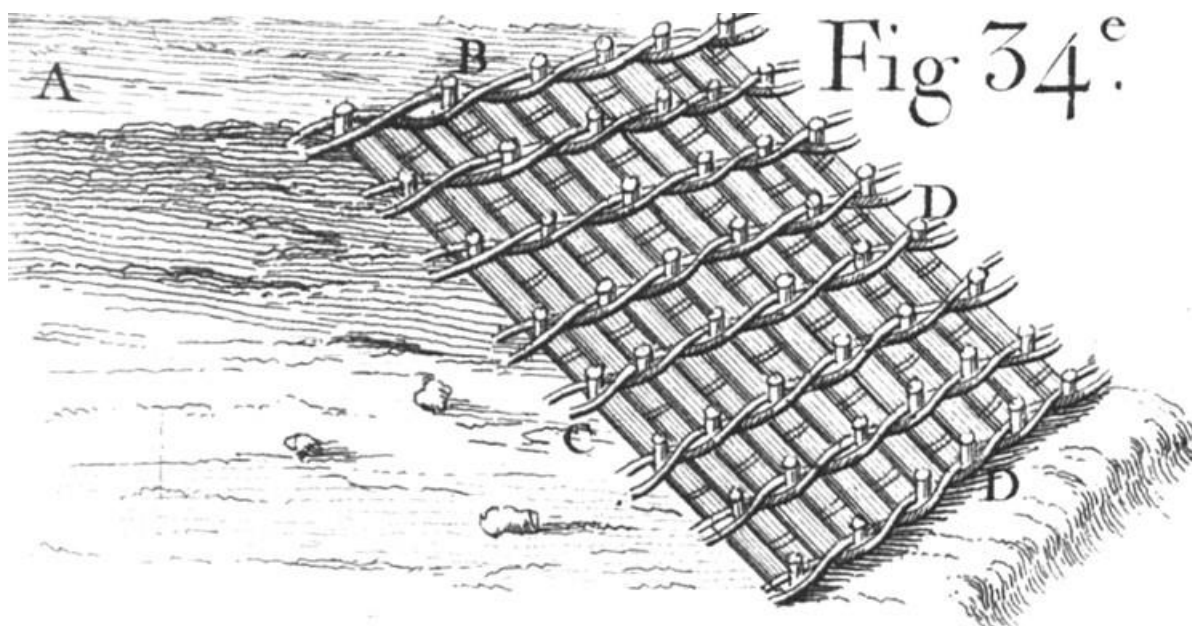


Figure 2-34: Matelas en fascines illustré par Bernard Forest de Belidor en 1730

Tableau 12 : Tableau récapitulatif du dimensionnement des matelas de fascines (Zeh, 2010)

Fil de fer	Branches		Pieux				Fagot	
Diamètre	Diamètre	Longueur	Diamètre	Longueur	Espacement	Enfoncement	Diamètre	Longueur
3 mm	2-5 cm	50-900 cm	4-8 cm	150 cm	80-100 cm	minimum 50 cm	20-40 cm	Égale à celle des branches

* Les dimensions dans les cases colorées correspondent aux dimensions recommandées et communes aux fascines en pied de berge. Les cases blanches sont les dimensions spécifiques aux fascines drainantes.

> **Avantages et inconvénients** : Le matelas assure une protection immédiate de la surface du sol et à plus long terme avec le développement des racines des végétaux. Cependant, cette technique demande une quantité très importante de matériel végétal.

2.4. Fascine morte

> **Technique** : Une modalité alternative des fascines consiste en l'utilisation de bois vivant n'ayant pas de capacité de bouturage en tant qu'élément constitutif (boutures et pieux). La fascine est ainsi qualifiée de morte, même si du bois fraîchement coupé est utilisé (Figure 2-35). Ces fascines peuvent être associées à la plantation de ligneux en leur sein et vont protéger le sol le temps que les racines des plants se développent et assurent à leur tour la stabilisation. La fascine morte peut être positionnée en berge de rivière mais également sur les talus. Sur ces derniers, cette modalité assure la stabilité du talus en jouant un rôle de peigne et permet une sédimentation de la zone concernée tout en limitant le ruissellement (Rouviere, 2003).



Figure 2-35: Fascine de pente morte sur la Drevenne ©Marie Didier

La mise en œuvre et le dimensionnement des éléments constitutifs suit les mêmes règles que les fascines vivantes. Il faut se référer pour ça à la technique considérée. Les fascines mortes ne permettent pas la reprise des végétaux et leur résistance va diminuer en même temps que la dégradation du bois. On peut coupler les fascines mortes avec des semis de graines de ligneux ou même des plantations de ligneux qui vont se développer et bénéficier de la protection mécanique de la fascine morte le temps d'être suffisamment résistant.

3. Mise en œuvre

3.1. Éléments constitutifs de la fascine

3.1.1. Essences

Le Tableau 13 présente les essences utilisées pour la construction des pieux et des fagots. Les essences choisies pour un ouvrage dépendent des conditions stationnelles considérées mais également du contexte, de la nature et des objectifs de l'ouvrage. Les informations fournies dans ce guide concernent la France hexagonale (applicable aux territoires d'Europe Occidentale et les Petites Antilles).

Chaque secteur biogéographique présente des cortèges floristiques particuliers, et des espèces de ligneux de bois tendre et bois dur qui peuvent être spécifiques. Toute implantation de végétation, y compris celles de végétaux fonctionnant comme éléments constitutifs d'ouvrages de génie végétal, doit être précédée d'une analyse des conditions de croissance qu'offrira la station (Lachat, 1994). L'utilisation d'essences locales est à favoriser, notamment car cela permet une plus faible empreinte carbone ainsi que la garantie que les essences utilisées soient adaptées à la station (Lachat, 1994). L'utilisation d'essences indigènes assure également la non introduction d'espèces pouvant nuire à la biodiversité locale (espèces exotiques envahissantes). Dans ces objectifs, le label Végétal Local est un outil de poids pouvant garantir l'origine, mais également de disposer de végétaux adaptés au territoire ainsi qu'une production de proximité. Toutefois, avec le changement climatique, on peut s'interroger

sur la nécessité d'utiliser des essences plus adaptées aux nouvelles conditions de climat, sachant que la sécheresse estivale les premières années est un facteur majeur d'échec des ouvrages de génie végétal, et que ces sécheresses devraient s'intensifier dans le futur.

Il est recommandé de varier les essences dans les aménagements afin d'éviter la création de station monospécifique (Adam et al., 2008; Lachat, 1994). En plus de satisfaire des critères de diversité biologique, la variation des espèces offre une diversité paysagère et une mixité dans le réseau racinaire susceptible d'augmenter la résistance de l'ouvrage face à l'érosion (Miller & Jastrow, 1990). De plus la diversité des espèces et des types fonctionnels associés va augmenter la résilience des communautés végétales implantées, en cas de perturbation (sécheresse, inondation, herbivorie...) disposer d'espèces avec des réponses différentes aux perturbations offre une garantie supérieure du maintien de la couverture végétale. La diversité des formes racinaires observables entre les espèces va également contribuer à renforcer la tenue des sols (Stokes et al. 2009). Dans un souci de diversification, l'emploi de 3 à 4 espèces différentes de saules buissonnants et arbustifs est conseillé (Adam et al., 2008).



Figure 3-1: Saules en croissance dans des fascines sur le Vorz, fascines après une saison de végétation © André Evette

Le genre *Salix* est très couramment utilisé dans la fabrication de pieux, tressage, lits de plançons, matelas de branche ou fagots (Figure 3-1). Les saules offrent une bonne garantie de rejeter à partir de segments d'organes aériens, que ce soit des branches entières ou partielles, ou même des ramilles (Lachat, 1994). La majorité des saules présentent un excellent taux de reprise (Adam et al., 2008), une croissance rapide, une bonne tolérance aux inondations et à la perturbation (Kramer et al., 2008), un système racinaire développé (Gray & Sotir, 1996; Rytter & Hansson, 1996) ainsi qu'un rapport élevé entre la biomasse souterraine et l'aérienne (Adam et al., 2008; Kuzovkina & Quigley, 2005). Les saules apprécient particulièrement les sols humides et sont pour beaucoup d'entre eux extrêmement bien adaptés aux berges de cours d'eau.

Certaines espèces de saules ont un développement buissonnant, d'autres sont arborescentes ou arbustives dans certaines conditions. Les espèces de saule à développement arborescent, telles que le saule blanc (*Salix alba L.*) et le saule fragile (*Salix x fragilis L.*), ne sont généralement pas recommandés dans les fascines et autres ouvrages de pied de berge (Adam et al., 2008; Lachat, 1994). Le port arborescent n'est pas souhaitable en pied de berge puisque les arbres de gros diamètres peuvent augmenter les phénomènes de turbulences et d'érosion associés. Ces espèces créent des points durs

et peuvent tendre à favoriser l'érosion au lieu de lutter contre. De plus, les arbres de haut jet vont avoir plus tendance à basculer dans le cours d'eau lors de forts vents. Le saule fragile et le saule blanc sont de plus des bois cassants. En tant que pieu, ses chances de se briser sont élevées du fait de la forte pression potentielle lors de sa mise en place. Toutefois, il s'agit d'une essence reprenant rapidement. Cette essence est retrouvée dans quelques retours d'expériences en tant que pieux vivants (Biotec, 2011). Le peuplier noir est aussi un arbre de haut jet rarement utilisés en génie végétal. Les peupliers noirs et saules blancs sont pourtant des espèces structurantes majeures de nos milieux alluviaux et leur restauration doit être envisagée dans les secteurs qui s'y prêtent.

Trois espèces de saules apparaissent comme dominantes dans l'application du génie végétal et particulièrement des fascines. Dans les Alpes, on retrouve bien souvent *S. daphnoides*, *S. eleagnos* et *S. purpurea* du fait d'un taux de reprise très élevé (> 90%) autorisant leur utilisation dans de nombreux types d'ouvrages (Bonin et al., 2013). Bien qu'il disparaisse à partir d'une certaine altitude et sur des substrats très grossiers, on recommandera plutôt *S. triandra* que *S. daphnoides* pour un ouvrage de pied de berge, ce dernier pouvant former de petits arbres. Même si le genre *Salix* constitue le groupe d'espèces pionnières le plus utilisé dans la confection des ouvrages, d'autres genres peuvent également être utilisés au sein des fascines comme le *Tamarix gallica* pour les fascines vivantes (Lavaine et al., 2015) et d'autres encore particulièrement pour la confection de pieux morts.

Tableau 13 : Essences utilisées pour fabriquer les pieux et les fagots en Europe Occidentale

Nom latin	Nom français	Utilisation	Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volume racines/volume tiges	Hauteur (m)	Sources
<i>Alnus glutinosa (L.) Gaertn.</i>	Aulne glutineux	Pieu	< 5		20	(g)
<i>Castanea sativa Mill.</i>	Chataigner	Pieu				(c)
<i>Fagus sylvatica L.</i>	Hêtre	Pieu				(f)
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun	Pieu	Très faible	1,5	30	(d, h)
<i>Robinia pseudoacacia L.</i>	Robinier faux-acacia	Pieu				(c)
<i>Salix alba L.</i>	Saule blanc	Pieu/fagot	74	0,5	5 à 30	(a, c, e)
<i>Salix appendiculata Vill.</i>	Saule appendiculé	Pieu/fagot	Généralement faible, jusqu'à 70% pour (b)	1,7	1 à 6	(b, c, e, h)
<i>Salix atrocinerea</i>	Saule roux	Fagot	Cf. <i>Salix cinerea</i>		3 à 6	(c)
<i>Salix aurita</i>	Saule à oreillettes	Fagot	40-70		1 à 3	(c, h)
<i>Salix caprea L.</i>	Saule marsault	Pieu	10-40		3 à 15	(a, c, e, h)
<i>Salix cinerea</i>	Saule cendré	Fagot	75		3 à 6	(a, c)
<i>Salix daphnoides Vill.</i>	Saule faux daphné	Pieu/fagot	> 90		3 à 15	(a, c, e, h)
<i>Salix eleagnos Scop.</i>	Saule drapé	Pieu/fagot	70-100	1,8	1 à 15	(a, c, e, h)
<i>Salix x fragilis L.</i>	Saule fragile	Fagot	95		5 à 25	(b, c)
<i>Salix myrsinifolia Salisb.</i>	Saule noircissant	Pieu/fagot	70-90	1,8	1,5 à 5	(a, c, e, h)
<i>Salix pentandra L.</i>	Saule laurier	Pieu/fagot	70-90		3 à 13	(a, c, e, h)
<i>Salix purpurea L.</i>	Saule pourpre	Pieu/fagot	> 90	1,5	1 à 6	(a, c, e, h)
<i>Salix triandra L.</i>	Saule à trois étamines	Pieu	70-90	0,4	2 à 7	(c, h)
<i>Salix viminalis L.</i>	Saule des vanniers	Pieu/fagot	90		2 à 10	(a, c)

(a) Zuffi (1989), (b) Schiechtl (1992), (c) Lachat (1994), (d) Donat (1995), (e) Adam et al. (2008), (f) Coufourier et al. (2008), (g) Zouaoui (2011), (h) Bonin et al. (2013)

Le Tableau 13 est un résumé des essences répertoriées dans les ouvrages étudiés. Quelques commentaires viennent compléter ce tableau.

- (1) D'après le retour d'expérience de Piégay and Pautou (2000), suite à l'analyse de sites avec mise en œuvre de génie végétal, l'aulne glutineux et l'aulne blanc sont très peu utilisés alors qu'ils sont fortement recommandés dans la littérature. Leurs systèmes racinaires présentent un fort intérêt pour la protection du talus, mais ils ne peuvent être mis en place que sous la forme de plants car ils ne reprennent pas sous la forme de bouture. Ils pourraient avantageusement être installés sous forme de plants dans des fascines mortes, la fascine morte protège la berge le temps que le plant se développe et que l'enracinement extraordinaire de l'aulne vienne stabiliser la berge (Figure 3-2).
- (2) Les branches souvent courbes de *Salix cinerea* rendent parfois impossible leur utilisation en tant que pieux malgré leur diamètre. *Salix triandra L.* peut également présenter des branches de base très courbes, notamment sur les vieux sujets (Lachat, 1994).



Figure 3-2: Système racinaire de l'Aulne glutineux en pied de berge © Hervé Piégay

De façon synthétique, les principes essentiels suivants doivent guider le choix des végétaux de l'ouvrage (Adam et al., 2008; Lachat, 1994; Miller & Jastrow, 1990; Stokes et al., 2009) :

- Choisir les espèces en fonction de leur distribution géographique et altitudinale naturelle
- Choisir des espèces végétales indigènes, si possible de provenance locale ou régionale, le label végétal local constituant un outil important à ce titre
- Choisir les espèces en fonction de leurs exigences face au milieu (la granulométrie et l'hydromorphie du sol sont des critères fondamentaux)
- Choisir les espèces en fonction de leur traits biotechniques (caractéristiques d'intérêt pour le génie végétal), leur morphologie aérienne et souterraine ainsi que de leur résistance aux contraintes auxquelles elles sont soumises
- Varier les essences autant que possible

Avec les changements climatiques et les sécheresses estivales de plus en plus intenses, la question se pose d'utiliser des espèces mieux adaptées à ces évolutions qui vont se renforcer. Sans qu'il y ait de consensus sur le sujet, il est important aujourd'hui de s'interroger sur les espèces que l'on va utiliser pour qu'elles survivent à ces nouvelles contraintes.

L'utilisation de matériaux morts ou malades non susceptibles d'une reprise saine est absolument proscrite (Biotec, 2011). La performance des fascines vivantes s'est également avérée être étroitement liée à la période de mise en place ainsi qu'au choix des espèces (Campbell et al., 2008).

3.1.2. Période de pose

La période de pose des fascines dépend de la nature de la fascine. En effet, si la fascine est vivante, l'ouvrage est posé durant la période de dormance de la végétation : soit d'octobre à avril (Donat, 1995; Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1996; Tourbier & Westmacott, 2005; Zeh, 2000) en Europe. La période de dormance de la végétation correspond à la période où le cycle de vie de l'organisme est temporairement arrêté et où les réserves sont stockées de manière complexe dans la plante. Confectionner les fagots vivants durant cette période permet de limiter la perturbation des végétaux prélevés et de favoriser leur reprise. Dans la mesure du possible et en fonction des contraintes environnementales et de chantier, les saules vivants sont préférentiellement installés à l'automne car ils ont souvent une croissance supérieure à ceux installés au printemps (Tilley and Hoag 2008).

Les fascines en branches mortes peuvent être posées toute l'année (Zeh, 2000), sauf autres contraintes liées aux sites de travaux telle que l'accès en rivière ou la fraie des poissons.

3.1.3. Matériel végétal

3.1.3.1. Prélèvement et récolte

Le prélèvement de pieux, boutures, branches et ramilles de saules se fera impérativement à la main durant la période de repos de la végétation et de manière à ce que leur mise en place puisse s'effectuer rapidement après le prélèvement (AMEC, 2012; Biotec, 2011). Les extrémités des branches vivantes doivent être coupées d'équerre et avec une coupe nette, sans écorçage, entre 20 et 25 cm du sol afin d'assurer la bonne régénération rapide et saine du site d'origine (Gray & Sotir, 1996). Les branches dont l'écorce est vieille et fortement sillonnée, les pousses malades ou infestées d'insectes, les branches mortes ou cassées, les pousses basales ou les drageons ne peuvent être utilisées en tant que bouture, car la vitalité des boutures sera bien plus incertaine (AMEC, 2012; Hoag, 1994).

Les branches fraîches doivent être droites, longues et bien ramifiées. Les coupes de branches vivantes sélectionnées doivent comprendre une gamme bien mélangée d'espèces, de diamètres et d'âges dans chaque fascine (Campbell et al., 2008).

- Outils recommandés : Tronçonneuses, élagueurs, élagueurs à main (abatteuses...). L'objectif est d'obtenir des coupes nettes (AMEC, 2012).
- Zones recommandées : Les matériaux vivants doivent être récoltés à une altitude, un type de sol et un régime d'humidité similaires à ceux du site du projet. Certains gestionnaires de cours d'eau mettent en place des plans de gestion des saulaies naturelles pour assurer une rotation et minimiser ainsi l'impact des prélèvements. Des sites de récolte multiples peuvent être utilisés pour améliorer la diversité génétique (AMEC, 2012). Il peut être utile de noter et

conserver le site sur lequel le matériel végétal a été prélevé, la vigueur et le taux de survie (Eubanks et Meadows, 2002).

Les branches vivantes doivent être soigneusement récoltées, manipulées et transportées pour éviter les dommages dus à la dessiccation et à l'exposition au soleil ou chaleur avant la plantation. Pour ça, elles doivent être maintenues humides et protégées du soleil chaud, des vents desséchants et des gelées sèches avec une bâche ou une toile de jute humide (AMEC, 2012). Pendant toute la durée de la récolte, elles peuvent être arrosées au besoin.

3.1.3.2. Transport et stockage

Lorsqu'un transport du matériel végétal est nécessaire, les extrémités basales doivent être identifiées et orientées dans le même sens. Le haut de chaque branche peut être trempé dans un mélange à parts égales de peinture au latex et d'eau ou de paraffine pour le sceller. Cette pratique tend à diminuer la dessiccation et indique également quelle extrémité correspond au sommet (Hoag, 1992). Les matériaux coupés vivants doivent être recouverts d'une bâche ou une toile de jute humide pendant toute la durée de la récolte et du transport afin de les garder au frais (AMEC, 2012; Gray & Sotir, 1996).

Dans la mesure du possible, il est préférable et plus rentable de récolter et de mettre en œuvre le projet en même temps que la récolte, à l'automne pendant la saison de dormance, lorsque les branches peuvent être utilisées sans nécessiter de stockage spécifique au froid. Sans stockage réfrigéré, le matériel végétal coupé doit arriver sur le chantier dans les 8 heures qui suivent la coupe (Gray & Sotir, 1996). Dans des conditions normales, toutes les plantes vivantes doivent être utilisées dans les 2 jours si ces dernières sont conservés sur site continuellement à l'ombre et protégé du vent et conservées à l'humidité afin de ralentir leur métabolisme et prolonger leur viabilité (AMEC, 2012; Eubanks & Meadows, 2002; Gray & Sotir, 1996; Lewis, 2000). Les végétaux peuvent même être conservées de manière temporaire dans l'eau pendant quelques jours en attendant leur mise en place, étape que l'on appelle mise en jauge.

Si l'installation doit être retardée, un stockage spécial réfrigéré est nécessaire. (Gray & Sotir, 1996) recommande de stocker les branches à une température comprise entre 1 et 7°C pour 90% d'humidité. Sur la base d'expériences récentes, ces conditions ne sont pas suffisantes pour limiter les risques de moisissure des boutures. On préférera donc stocker les branches dans une chambre froide, à - 2°C à condition qu'elles soient maintenues humides dans des sacs plastiques ou en étant recouvertes de toile de jute humide et arrosées régulièrement pour éviter les brûlures de congélation (AMEC, 2012). En utilisant cette technique, les branches peuvent être conservées pendant plusieurs mois avant d'être plantées.

3.1.3.3. Trempage

Avant de planter, il est conseillé de faire tremper les extrémités basales des branches pendant 5 jours pour une installation au printemps et 3 jours pour une installation à l'automne (AMEC, 2012). Cette étape de trempage permet de sortir les boutures de leur dormance, de les laisser bien hydratées et de faire gonfler les bourgeons racinaires (Figure 3-3). Cette opération est à réaliser toujours dans un endroit frais et ombragé.



Figure 3-3: Trempage des fagots avant installation à Beaver Creek © Terra Erosion Control

Le trempage peut s'effectuer en suivant les principes d'application ci-après (AMEC, 2012):

- Dans un grand contenant étanche ou dans une cours d'eau ou étang approuvé pour cet usage, les branches devant être protégées des dommages causés par les rongeurs si besoin.
- L'eau de trempage ne doit pas devenir stagnante, l'eau doit être en mouvement ou être changée tous les jours
- Une vigilance particulière doit être apportée dans la prévention de l'entrée de maladie et à la dessiccation en choisissant avec soin le site utilisé pour le trempage.

3.2. Conception de la fascine

3.2.1. Pieux

L'ancrage des fascines dans le sol se fait à l'aide de pieux. On distingue les pieux vivants, qui présentent une capacité de reprise, des pieux morts. Le Tableau 14 résume le dimensionnement des pieux présenté par divers guides. Dans la littérature, les pieux ont une longueur variant entre 60 et 200 cm et un diamètre variant entre 2 et 12 cm. Toutefois, ces dimensions sont à adapter en fonction des conditions locales et du contexte. En cours d'eau, la longueur des pieux doit être adaptée à la profondeur d'affouillement potentielle. Ainsi sur l'Arve, à Cluses par exemple, des pieux de 3 mètres ont été utilisées. Ce qui a également des répercutions sur les diamètres qui seront alors plus proches de 15 à 20 cm.

Tableau 14 : Synthèse bibliographique du dimensionnement des pieux

Type	Forme	Source	Longueur (cm)		Diamètre (cm)		Espacement longitudinale (cm)		Espacement latéral (cm)		Enfoncement	
			min	max	min	max	min	max	min	max		
Pieu vivant	Rond	Lachat (1994)	150		7	12	60	100				
		Gray and Sotir (1996)									Dépassement: 5 à 7* cm au-dessus du sol	
		SchiechtI and Stern (1996)	60		5		80					
		Lewis (2000)	60*	91*	2*	7*						
		Tourbier and Westmacott (2005)	70		10		100				75% de leur longueur	
		Zeh (2007)	80	100	4	8	100					
		Zeh (2000)	60	80	4	8	100					
		Adam et al. (2008)	200		8	12	60		40	50		
		Biotec (2011)	200		8	12	60		40	50		
		Lequertier et al. (2015)	100	150			30	40			50 cm	
		Eubanks and Meadows (2002)					60*	91*				
		Campbell et al. (2008)	60	75							50 à 60 cm dans le sol, 5 à 8 cm au-dessus du niveau de la surface finale du sol	
		Florineth and Molon (2005)	100	150								
		Pieu mort	Rond	Donat (1995)	100	200			300	400		
Lewis (2000)	60 *			91*	2*	7*	60*					
Adam et al. (2008)	200				8	12	60		40	50		
Coufourier et al. (2008)	150					En quinconce	100	150	30	50	50 cm	
						En vis à vis	80					
Biotec (2011)	200				8	12	60		40	50		
Campbell et al. (2008)	75			100			50	100			Enfoncés au ras au niveau du sommet du fagot ou dépasser d'environ 2 à 5 cm au-dessus	
Rectangulaire	Rectangulaire			Gray and Sotir (1996)	70	90	5x10*				60*	90*
		Tourbier and Westmacott (2005)			5x5		100					
		Eubanks and Meadows (2002)	70*	120*	5x10*		60*	91*				

* Valeurs en unités impériales britanniques provenant d'ouvrages anglo-saxons converties et arrondies à unité inférieure en cm, arrondie dizaine inférieure pour la longueur.

3.2.1.1. Pieux vivants

> **Définition et fonction** : un pieu vivant est une pièce de bois cylindrique, correspondant à une grosse branche ou un petit tronc, destinée à être plantée dans le sol. Un pieu vivant va bouturer et créer un système aérien et racinaire permettant un meilleur maintien dans le sol et de la fascine.

> **Essences utilisées** : Pour les pieux vivants on fait appel à des espèces ayant un fort taux de reprise au bouturage. Le genre *Salix* convient bien (Tableau 13).

Si les espèces ligneuses utilisables sous forme de pieux vivants sont souvent des arbres de haut jet (*Salix alba*, *Salix fragilis*, *Populus nigra*), il y a lieu de s'assurer que ces arbres ne risquent pas de déstabiliser le pied de berge. *S. daphnoides*, *S. pentandra* et certains sujets de *S. eleagnos* sont également susceptibles de pouvoir fournir des pieux. On préfère généralement éviter les gros arbres en pied de berge, car ils vont créer des points durs générateurs de turbulence et peuvent éventuellement basculer et emmener le pied de berge.

> **Découpe** : Les pieux sont coupés à plat sur le dessus et en pointe sur la partie basale afin d'assurer une installation appropriée et facile. Il est recommandé de couper la section supérieure des pieux endommagés pendant l'installation (Lewis, 2000). Cette dernière étape peut être faite après le rebattage des pieux.

3.2.1.2. Pieux morts

> **Définition** : Un pieu mort est une pièce de bois saine, venant d'être prélevée et non traitée provenant d'une espèce n'ayant aucune capacité de rejet par reproduction végétative.

> **Essences utilisées** : le pieu mort est fait de bois neuf, sain, résistant et à dégradation lente. Le Tableau 13 présente les essences utilisées dans diverses études et guides. On peut citer le robinier faux acacia, le châtaignier, l'aulne, le mélèze ou encore le chêne.

> **Longueur** : Les pieux morts doivent avoir une longueur comprise entre 60 et 200 cm selon la littérature. La longueur est à ajuster au contexte et à la nature du sol (Tableau 15) (Eubanks & Meadows, 2002).

Tableau 15: Longueur des pieux morts en fonction de la nature du sol selon (Eubanks & Meadows, 2002)

CLASSE TEXTURAL DU SOL	LONGUEUR DU PIEU MORT EN CM
ARGILE	77*
LIMON	92*
SABLE	122*
GLAISE	77*

*Valeurs en unités impériales britanniques provenant d'ouvrages anglo-saxons converties et arrondies à l'entier supérieur

> **Découpe** : Il existe 2 méthodes de découpe des pieux morts.

- i) Identique aux pieux vivants : sur la base d'une pièce de bois cylindrique, correspondant à une grosse branche ou un petit tronc, l'extrémité sur le dessus est coupée à plat tandis que l'extrémité basse est taillée en pointe.

ou

- ii) Découpé avec une base rectangulaire (Figure 3-4) (Gray & Sotir, 1996; Tourbier & Westmacott, 2005). Un rectangle de bois est découpé, puis fendue en deux pour obtenir deux triangles en tant que futurs pieux.

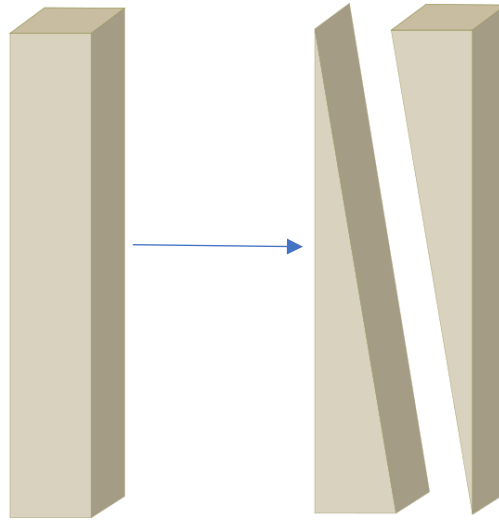


Figure 3-4 : Méthode de découpe des pieux morts

Il est important de noter que la seconde méthode n'est pas adaptée pour toutes les formes de fascine. Cette méthode peut être utilisée pour les pieux courts, par exemple pour des fascines de pente ou encore pour des agrafes en bois (Figure 3-5) mais ne doit pas être utilisée pour les fascines de pied de berge. La 1^{ère} méthode de coupe décrite reste la plus utilisée/répandue et la plus sûre. On privilégiera donc cette dernière pour la fabrication des pieux dans les ouvrages.



Figure 3-5: Exemple d'agrafe en bois utilisé pour le maintien de géotextile ©André Evette



Figure 3-6: Exemple d'attaches en bois via 2 rangées de pieux liées © Pierre-André Frossard

Sous la forme de pieux, on peut également retrouver une modalité d'attache en bois constituée de 2 rangées de pieux liées ensemble (Figure 3-6).

> **Dimensions** : Les dimensions peuvent varier et sont décrites dans le Tableau 14, qui résume les données sur les pieux.

3.2.1.3. *Choix entre pieux vivants et pieux morts*

Les guides recommandent parfois un mélange de pieux en bois morts et de pieux en bois vivants (Lewis, 2000; Tourbier & Westmacott, 2005), mais ce choix va dépendre du type de fascine et du contexte de l'ouvrage. La Figure 3-7 représente un exemple d'assemblage pieux morts/pieux vivants fréquemment décrit pour les fascines drainantes. Les pieux vivants sont plantés du côté du cours d'eau par rapport à la fascine, contre le fagot avec un léger angle permettant d'augmenter le maintien du fagot par les pieux. Au fur et à mesure des cycles de végétations, le pieu vivant développe un système racinaire qui lui permet de stabiliser le sol (Figure 3-7) (Lewis, 2000).

Sur les fascines de pied de berge, il est possible de placer les pieux directement dans la fascine afin d'économiser les fixations (Donat, 1995). Cependant, dans la pratique, un unique type de pieu est souvent utilisé. De par ses qualités de multiplication végétative, l'utilisation de pieu vivant est souvent privilégiée puisque ce dernier participe, avec le développement des végétaux et à la stabilisation des sols.

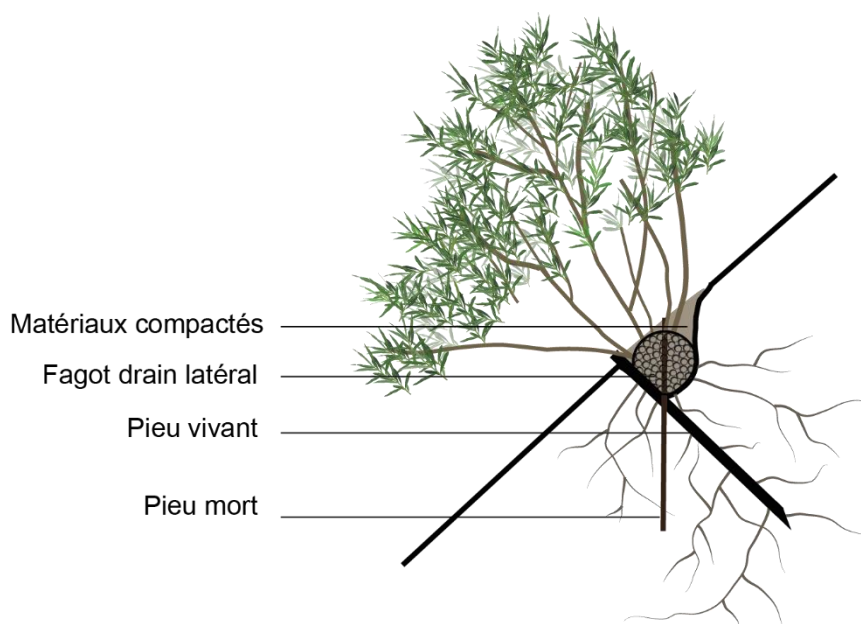


Figure 3-7: Exemple d'utilisation combinée de pieu mort et vivant

3.2.1.4. *Installation et méthodes de fixation*

La méthode la plus utilisée est le battage mécanique (Figure 3-8). Le pieu est enfoncé grâce au dos du godet de la pelle mécanique ou à une cloche de battage. Si le terrain n'est pas accessible aux engins de chantier, les pieux sont enfoncés de manière manuelle. Dans ce cas, un trou est creusé à l'aide

d'une barre à mine ou à la perforatrice, d'un diamètre légèrement plus petit que le diamètre du pieu. Puis, le pieu est battu à l'aide d'une masse.

L'enfoncement recommandé est d'au minimum 50 cm jusqu'à 1.5 m en fonction de la taille du pieu et du terrain (Gray & Sotir, 1996; Lequertier et al., 2015). Il dépasse au maximum d'une dizaine de centimètres au-dessus de la fascine (on recherchera préférentiellement à le rabattre au plus court pour éviter les phénomènes de turbulences).



*Figure 3-8: Battage mécanique des pieux sur la Bourbre © Marie Didier
Restauration de la continuité écologique de la Bourbre-maîtrise d'ouvrage : les Autoroutes APRR et AREA*

Les pieux sont enfoncés sur une ou deux rangées espacées de la taille du fagot (partie 3.2.3). Concernant la mise en place, il est possible de les placer alignés ou en quinconce selon le type de fascine. Si le choix est de les mettre en vis-à-vis, l'espacement moyen varie entre 60 et 100 cm. Si le choix est de les mettre en quinconce, il faut respecter un espacement longitudinal de 60 cm et latéral entre deux rangées de pieux variant entre 40 et 50 cm (Tableau 14). Dans la littérature, il apparaît que le placement des pieux en vis-à-vis est la disposition la plus courante. Si le projet prévoit l'utilisation de pieux vivants et de pieux morts.

3.2.2. Branches



Les branches d'arbres/arbustes servent à constituer le fagot amené fait ou mis en place directement sur la berge pour constituer la fascine (Figure 3-9). Les branches peuvent être mortes ou vivantes suivant le type de fascine installé. Si le caractère vivant de la fascine veut être maintenu, elles sont (éventuellement avec les pieux) le support de la reprise de la végétation permettant la stabilisation des berges ou du talus.

Figure 3-9: Branches de saules pour la confection de fagots © Pierre-André Frossard

> **Essence** : les essences utilisées sont très majoritairement des saules capables de reproduction végétative et ayant une bonne flexibilité pour l'assemblage en fagot. Les essences sont décrites dans le Tableau 13.

> **Dimensionnement et découpe** : Le Tableau 16 synthétise le dimensionnement, que l'on peut retrouver dans la littérature, des branches. Les diamètres des branches doivent être variés (Figure 3-10). Si le fagot est composé de branches de diamètre hétérogène, il exerce un meilleur piégeage des sédiments. En effet, la variation des diamètres permet de bloquer une granulométrie différente, donc un meilleur maintien des berges (Bentrup & Hoag, 1998; Campbell et al., 2008).



Figure 3-10: Diversité des diamètres des branches de saules avant fabrication des fagots © Sébastien De Danieli

Cependant, les branches vivantes doivent avoir un diamètre minimum de 2 cm à l'extrémité apicale (supérieure) pour assurer un bon approvisionnement en énergie stockée dans la tige (AMEC, 2012), nécessaire à la bonne reprise de la végétation. La longueur minimale doit être de 50 cm, mais on préférera des longueurs supérieures pour une bonne structure des fascines et afin de maximiser la quantité d'énergie stockée nécessaire à la reprise.

Les branches sont prélevées à l'aide d'un outil aiguisé, sans les casser, ni les scier (Lewis, 2000). Les principes essentiels à la récolte et au prélèvement sont détaillés partie 3.1.3.1. À la suite de la découpe, les branches sont assemblées pour créer des fagots (partie 3.2.3), ou alors mises de côté pour une mise en œuvre des fascines sur site.

Concernant le transport et le stockage, les règles à suivre sont détaillées en partie 3.1.3.2 Un mauvais stockage des matériaux vivants entre le prélèvement et leur utilisation peut entraîner leur mort ou leur affaiblissement et est une cause d'échec du génie végétal. L'utilisation immédiate des branches pour constituer les fagots est recommandée. Il est toutefois possible de réaliser un stockage durant la période de végétation (voir partie 3.1.3.2).

Tableau 16 : Synthèse bibliographique du dimensionnement des branches pour les fascines

Source	Méthode d'assemblage	Longueur (cm)		Diamètre (cm)	
		min	max	min	max
Donat (1995)	Fascine de talus : Minimum 5 tiges par fagot Fascine drainante et de pied de berge : Fagot plus épais			1	
Zeh (2007)	Fagot: 20 à 80 % de branches mortes				
Adam et al. (2008)	Couches successives: 25 branches/ mètre linéaire+ matériaux gravelo-terreux	>=200		2	4
Lachat (1994)	Fagot	>=200		2	5
Gray and Sotir (1996)		150	910		
Lewis (2000)				1 *	12 *
Biotec (2011)	25 pièces/m en intégrant dans la fascine des matériaux terreux gravelo-terreux récupérés sur site puis compaction	>=200		2	4
Bonin et al. (2013)				> 2	3
AMEC (2012)		80		> 2	
Lequertier et al. (2015)	Le nombre de pièces du fagot dépend ainsi de leurs diamètres et de l'importance de leurs ramifications.	50	200	2	5
Eubanks and Meadows (2002)		152*	304*	1*	3*

* Valeurs en unités impériales britanniques provenant d'ouvrages anglo-saxons converties et arrondies à l'unité inférieure en cm.

3.2.3. Fagots

Les fagots sont constitués d'un amas de branches vivantes empilées et/ou reliées entre elles (Figure 3-11). Ils sont l'élément essentiel de la fascine et le support de la reprise de la végétation permettant la stabilisation des berges ou du talus.

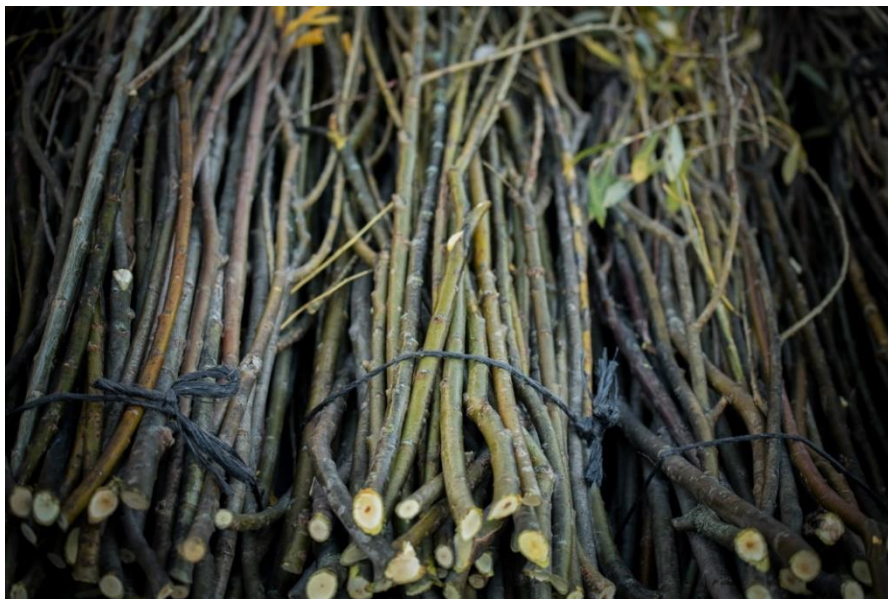


Figure 3-11: Branches de saules formant des fagots © Sébastien De Danieli

> **Dimensions** : Le Tableau 17 synthétise les ordres de grandeurs pour le dimensionnement des fagots utilisés au sein des fascines. Selon les dimensions, il est conseillé de considérer entre 5 et 25 pièces par mètre linéaire (Adam et al., 2008). Le nombre de branches devra être adapté selon le diamètre du fagot voulu et du diamètre des branches utilisées. Il est à noter que les fagots d'une longueur supérieure à 3m sont plus difficiles à utiliser, leur manipulation étant délicate afin d'éviter tout endommagement des branches.

> **Constitution** : plusieurs types de fagots existent. La plupart des ouvrages mettent en avant des fagots fait d'un ensemble de branches liées en faisceau. Cependant, le fagot peut aussi être formé directement sur place avec des couches successives de terre et de branches (Adam et al., 2008; Zeh, 2007). Cette dernière technique garantit la bonne connexion entre les branches et la berge évitant ainsi le risque de dessèchement des fagots, parmi les causes principales de mauvaise reprise des fascines.

Les fagots liés en faisceau sont réalisés sur un support métallique, appelé chevalet du bûcheron, au diamètre et longueur voulus (voir partie 2.1.1). Le cerclage peut être composé de fil de fer, toutefois on préférera une option dégradable dans le temps telle que de la corde et qui présente l'avantage de ne pas endommager l'écorce. Lorsque les branches sont placées dans les fagots, les cimes des branches (bouts fins) sont réparties dans la même direction (Gray & Sotir, 1996) et sur toute la longueur de la fascine afin de lui donner une taille uniforme (Eubanks et Meadows, 2002). Un fagot peut aussi être constitué en alternant le sens de la cime, permettant une reprise uniforme de la fascine (Zeh, 2007).

> **Installation** : Le pied des branches peut avantageusement être enfouie dans le sol de l'autre côté du pieu situé du côté du talus (Figure 3-12) (Adam et al., 2008).

Lorsque des chevauchements entre fagots sont nécessaires, notamment dans les fascines de pente ou drainantes, les fascines successives jointes doivent se chevaucher et l'extrémité de croissance doit être placée entre 50 et 75 cm au-dessus de l'extrémité basale du fagot suivant (Campbell et al., 2008). L'idée est d'avoir un linéaire de fagots emboîtés tel que sur la Figure 3-13. Des pieux morts supplémentaires peuvent être ajoutés dans la zone de chevauchement.



Figure 3-12 : Pieds des branches vivantes prêtes à être enfouies dans le sol à l'arrière de la fascine dans le talus © Pierre-André Frossard

Tableau 17 : Synthèse bibliographique du dimensionnement des fagots pour les fascines

Fagots vivants pour des fascines vivantes de "pied de berge"							
Source	Longueur (cm)		Disposition des branches	Diamètre (cm)		attaché tous les (cm)	
	min	max		min	max	min	max
Lachat (1994)	200	400	Fagot	20	40		
Gray and Sotir (1996)	150*	910*	Fagot	15*	20*		
Lewis (2000)	120 *	240 *	Fagot	20 *	25 *		
Faber (2004)	>100		Fagot	20	40	100	
Tourbier and Westmacott (2005)	150	300	fagot	15	20		
Lequertier et al. (2015)	50	200	Couche	20	40	100	
Zeh (2007)			Fagot	20	40	100	
Adam et al. (2008)			Couche				
Bonin et al. (2013)	250	300	Fagot	30	35		
Eubanks and Meadows (2002)			Fagot	15*	20*		
Campbell et al. (2008)			Fagot	15	30	20	30
Florineth and Molon (2005)	Variable selon conditions		Fagot	30	50	100	
Fagots vivants pour des fascines vivantes de talus							
Source	Longueur (cm)		Forme	Diamètre (cm)		attaché tous les (cm)	
	min	max		min	max	min	max
Zeh (2007)			Fagot	20	40	80	100
Campbell et al. (2008)			Fagot	15	30	20	30
Schiechl and Stern (1996)			Fagot	30		70	
Fagots vivants pour des fascines vivantes drainantes							
Gray and Sotir (1996)			Fagot	30 *	35 *		
Campbell et al. (2008)				50			
Schiechl and Stern (1996)			Fagot	20	40	50	

* Valeurs en unités impériales britanniques provenant d'ouvrages anglo-saxons converties et arrondies à la dizaine inférieure pour les longueurs et à l'unité inférieure pour les diamètres en cm.

> **Compactage** : Le compactage est une étape essentielle à la reprise suite à l'installation. Elle permet un bon contact entre les branches et le sol. Après la pose des pieux, l'ensemble de l'ouvrage peut être compacté avec une planche posée perpendiculairement aux branches que l'on presse à la pelle hydraulique (Adam et al., 2008) et / ou par rebattage des pieux, ce qui tend les fils de fer et compacte le tout (Biotec, 2011).

Il est nécessaire de s'assurer que les branches soient en contact avec la terre. La fabrication des fagots doit également être étroitement surveillée puisque les fascines ne doivent pas être attachées trop serrées pour permettre de laisser l'espace nécessaire la terre et le bon contact avec le sol.



Figure 3-13: Zone de chevauchement entre deux fagots ©André Evette

3.3. Coût des fascines

Le coût d'une fascine est difficile à estimer et varie avec la taille de l'ouvrage (longueurs, diamètres), l'accessibilité du site, la disponibilité du matériel et la technicité de la fascine choisie (double ou simple rangée de pieux, présence de géotextile, apports en matériaux terreux...). En effet, s'il est possible de prélever le matériel végétal directement sur site, le coût est considérablement diminué. La littérature propose différents coûts qui sont détaillés ci-dessous.

Au début des années 2000, le coût total d'une fascine était d'environ 50 à 100 € / mètre linéaire (Adam et al., 2008; Bonin et al., 2013). Ce coût total peut également être exprimé en heures de travail afin d'éliminer la fluctuation de la valeur de l'argent. Une fascine correspond alors à entre 2 à plus de 6 heures de travail par mètre linéaire pour une équipe (Schiechl & Stern, 1997).

3.4. Entretien

À l'inverse des ouvrages de génie civil considérés comme inertes, les ouvrages de génie végétal présentent une capacité auto-réparatrice du fait du caractère vivant de ces derniers.

Plusieurs travaux rappellent l'importance de l'entretien des ouvrages surtout les premières années (Anstead et al., 2012; Leblois et al., 2022; Peeters et al., 2018), avec une meilleure chance de succès si l'on remédie aux premiers désordres dès la première année (Pezeshki et al., 2007). On estime que le contrôle de l'ouvrage doit être réalisé durant les trois premières saisons (AMEC, 2012). Suivant l'évolution de l'ouvrage, il est possible par exemple d'ajouter des boutures supplémentaires en cas de mauvaise reprise de la végétation. Un ouvrage pour lequel la végétation meurt retrouve des niveaux de protection similaires à un ouvrage fraîchement réalisé (Anstead & Boar, 2010). L'entretien peut également concerner les autres éléments constitutifs de la fascine. La tenue des pieux doit également être contrôlée et ajustée si besoin est.

Les espèces utilisées pour la stabilisation des berges sont connues pour développer des branches flexibles qui se plient mais ne se cassent pas en cas de crue. Cette qualité tend à décroître avec l'âge et la croissance des diamètres des tiges (Oplatka, 1998). On estime que des branches d'un diamètre supérieur à 3 ou 5 cm perdent leur flexibilité. Il peut être utile de procéder à une coupe sélective sur les ouvrages, permettant de retirer les branches d'un diamètre supérieur. Cette coupe permet de conserver seulement les branches juvéniles et leurs qualités flexibles afin de maximiser la résistance

mécanique de l'ouvrage. Oplatka (1998) considère que les jeunes saules, qu'ils soient arbustifs ou arborescents, avec des branches flexibles jusqu'à l'âge de cinq ans, sont appropriés pour une utilisation au sein d'ouvrage de génie végétal.

À noter qu'une action d'entretien peut faire office d'approvisionnement pour un nouvel aménagement.

3.5. En milieu tropical

La mise en place de fascines en zone tropicale doit tenir compte de nombreuses contraintes spécifiques. Les pluies tropicales se caractérisent par des événements de forte intensité. Typiquement, plus de 40% des pluies ont une intensité supérieure à 25 mm par heure contre moins de 5% dans les zones non tropicales, et les intensités supérieures à 150 mm par heure sont très communes. Ce facteur explique l'importance de l'érosion en zone tropicale (Diaz, 2001).



Figure 3-14: Installation d'une fascine vivante de *Piper dilatatum*, et d'une fascine morte ensemencée de graines d'une espèce indigène d'arbre de ripisylve (*Inga ingoides*) en pied de berge de la rivière Lézarde Petit Bourg, Guadeloupe, Novembre 2022. © Pierre Raymond.

Sur des fortes pentes, des perturbations même mineures peuvent conduire à des glissements dont la gestion est coûteuse. Une grande partie des tropiques est régulièrement soumise aux cyclones et aux tempêtes, qui s'accompagnent souvent de très fortes précipitations. Aujourd'hui alors que les activités anthropiques dégradent de plus en plus les milieux naturels et impactent leur résilience, ces phénomènes naturels extrêmes accroissent les glissements de terrain et l'érosion en déstabilisant les sols saturés d'eau et en emportant les berges de cours d'eau. Vu l'importance des zones d'érosion à la fois sur les pentes, talus routiers, berges de cours d'eau, il existe un fort potentiel pour l'utilisation de fascines en zone tropicale (Figure 3-14).

Peu d'informations sont accessibles concernant la compatibilité des espèces tropicales avec cette technique de génie végétal. De récents résultats expérimentaux ont néanmoins permis d'identifier six espèces Néotropicales pouvant être intégrées dans des fascines (Mira et al., 2022) et les premières fascines caribéennes ont été installées en Guadeloupe (Tableau 18). Par ailleurs, compte tenu de la remarquable diversité floristique tropicale et du faible nombre de ligneux capables de bouturer (Mira et al., 2021), la fascine morte ensemencée de graines d'espèces indigène représente une déclinaison originale et pertinente de la fascine vivante en milieu tropical. La fascine morte peut en effet constituer une matrice protectrice, propice au développement des plantules, favorisant ainsi leur installation.

Tableau 18: Essences utilisées pour fabriquer les pieux et les fagots en milieu tropical

Nom latin	Nom vernaculaire	Zone géographique	Utilisation	Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport biomasse racine/biomasse aérienne	Hauteur	Référence
<i>Cedrela odorata</i> L.	Acajou amer	Caraïbe	Pieu	30	0.23	20	(a)
<i>Chimarrhis cymosa</i> Jacq.	Résolu	Caraïbe	Pieu/Fagot	85	0.23	15	(a)
<i>Citharexylum spinosum</i> L.	Bois carré	Caraïbe	Pieu	70	0.31	8	(a)
<i>Ficus citrifolia</i> Mill.	Figuier maudit	Caraïbe	Pieu	50	0.08	15	(a)
<i>Homalium racemosum</i> Jacq.	Acomat-hêtre	Caraïbe	Pieu/Fagot	35	0.25	15	(a)
<i>Piper dilatatum</i> Rich.	Queue de rat	Caraïbe	Fagot	77	0.19	2	(a)
<i>Piper dussii</i> C. DC.	Queue de rat	Caraïbe	Fagot	52	0.27	2	(a)

(a) Mira et al. (2022)

4. En pratique

4.1. Défaillance

De nombreux guides offrent des préconisations techniques pour la mise en œuvre des techniques de génie végétal (Adam et al., 2008; BAW, 2010; Bonin et al., 2013; Degoutte, 2006; Gray & Sotir, 1996;

Lachat, 1994; Peeters et al., 2018; Schiechl & Stern, 1997; Zeh, 2007). Toutefois, peu d'entre eux rapportent les éléments de vigilance à avoir afin d'éviter la défaillance des ouvrages.

Leblois et al. (2022) ont récemment analysé les processus et causes de défaillance du génie végétal pour la stabilisation des berges de rivière. 3 facteurs principaux de défaillance ont été identifiés : (i) une mauvaise reprise de la végétation (exposition, coupes non gérées, animaux) ; (ii) un défaut de conception (remplissage inadapté, mauvais dimensionnement) ; (iii) une mauvaise prise en compte des caractéristiques de la rivière (énergie, matériaux en suspensions, courbure du méandre). Généralement plusieurs facteurs se cumulent pour aboutir à la rupture de l'ouvrage.

La mauvaise reprise de la végétation constitue un facteur d'échec récurrent, qui concerne 60% des ouvrages défaillants (Leblois et al., 2022; Sotir & Fischenich, 2001). Cela peut résulter de plusieurs facteurs, comme par exemple un mauvais éclaircissement de la berge qui ne garantit pas un bon développement végétal dans le cas des fascines. Toutefois, les facteurs ne se limitent pas cet exemple et restent nombreux. Les facteurs à l'origine de la mauvaise reprise de la végétation peuvent en réalité être divisés en 5 groupes (Leblois et al., 2022), avec les pourcentages d'occurrence respectifs suivants :

- 1) Les paramètres abiotiques (71%) : *l'enneigement* – 27 % (crue, ouvrage trop bas), *l'assèchement* – 21 % (exposition ou sécheresse, ouvrage trop haut, substrat drainant), *l'ombrage* – 19% et la *qualité du milieu* – 4 % (qualité de l'eau, pollution, etc.)

Le calage altitudinal des fascines est crucial, trop bas elles seront submergées, trop hautes elles sécheront, et dans les deux cas elles mourront. On doit généralement les placer par rapport à l'eau à un niveau identique à celui des saules les plus bas naturellement présents sur la berge à proximité. (Adam et al., 2008; Zeh, 2000) conseille plutôt de faire correspondre le milieu du fagot avec la hauteur d'eau moyenne.

- 2) Ceux issus de la conception et la réalisation (38%): *absence de contact avec le substrat* – 27 % (à l'arrière ou dans l'ouvrage, absence d'ancrage), *espèces non appropriées* – 4 % (choix, non connaissance des espèces), *qualité et mises en œuvre des végétaux* – 5 % (polarité de la tige, stockage non approprié, qualité de la bouture), *période de réalisation* – 2 %

Le remplissage inadapté par des matériaux caillouteux facilement érodable et peu cohésif constitue un autre facteur d'échec souvent mis en évidence dans le cas des fascines. En effet, l'évacuation de ces matériaux par les crues provoque une déconnexion entre la fascine et la berge, entraînant un risque de dessèchement des fagots, comme l'ont montré précédemment (Evette et al., 2007).

Sur la base d'un travail sur modèle réduit, Recking et al. (2019) ont recensé processus observables pouvant aboutir à la rupture des fascines : (i) érosion en pied menant à une érosion de berge à l'arrière de l'ouvrage, également observé par Karle et al. (2005) et Anstead and Boar (2010) ; (ii) érosion de surface au droit du talus sus-jacent ; (iii) contournement de la fascine par l'amont ; (iv) contournement de la fascine par l'aval ; (v) érosion à un point de discontinuité de la fascine. Lorsque plusieurs processus se recourent, l'érosion s'emballe rapidement pour aboutir à la destruction de l'ouvrage.

- 3) Les paramètres biotiques (17%) : *concurrence* – 12 % (espèces exotiques envahissantes, ensemencement, espèces arborées ou arbustives de l'ouvrage), *faune* – 4 % , *maladie* – 1%
- 4) Ceux liés aux usages du site (8%): *activités humaines* -4% (piétinement, pâturage), *gestion inadaptée de la végétation* – 4%
- 5) Non expliqué (16%)

La défaillance d'un ouvrage ne constitue pas une fin en soi. Une fascine dont les branches vivantes ne survivent pas ralentira le ravinement d'une berge et retient les sédiments. Ces sédiments reconstruisent la berge et forment un lit de semence naturel. Parfois, une fascine "sacrifiée" est installée dans l'eau, sachant qu'elle ne poussera pas, mais qu'elle réduira l'érosion et favorisera la stabilité de la berge (Eubanks & Meadows, 2002). Toutefois, une fascine morte perd les qualités du vivant (auto-réparation, stabilisation du sol via le développement des racines, etc.).

4.2. Devenir

Une bonne conception et réalisation doivent permettre d'assurer la bonne tenue et la réussite de l'ouvrage. Un projet réussi est un ouvrage qui devient invisible dans le paysage après quelques années. Il doit être pleinement intégré à son environnement (Figure 4-1).



*Construction de la fascine de pied de berge surmontée des lits de plants et plançons – Mai 2012
© Pierre-André Frossard*



Printemps 2012 © Pierre-André Frossard



Été 2012 © Pierre-André Frossard



Été 2015 © André Evette

Figure 4-1: Évolution d'un ouvrage réussi ©André Evette et Pierre-André Frossard.

Il est à noter que la fascine considérée a été endommagée par le transport solide. Son caractère vivant lui assure une capacité de régénération.

5. Conclusion

Si le guide a pour but de constituer un support technique pratique pour les concepteurs, maîtres d'œuvre, techniciens, maître d'ouvrage ou grand public, il n'a pas prétention de devenir un catalogue de recettes miracles en matière de protection de berge. Ce guide doit être utilisé de manière intelligente et réfléchi. Les techniques décrites sont régulièrement combinées à d'autres techniques afin de répondre précisément à chaque particularité et spécificité du tronçon de cours d'eau considéré. La conception d'un ouvrage de stabilisation à l'aide de techniques végétales nécessite des compétences multiples et pluridisciplinaires aussi bien en botanique, en écologie mais également en pédologie, géotechnique, sciences de l'ingénieur et hydraulique. Une connaissance complémentaire des processus érosifs et morphodynamiques est indispensable à la réussite des ouvrages. La conception d'un ouvrage de génie végétal demande une étude précise et rigoureuse s'appuyant sur une bonne analyse du terrain et débouchant sur des plans et spécifications techniques associées.

Même si les fascines sont des ouvrages de génie végétal relativement peu coûteux et faciles à mettre en place, elles ne doivent être utilisées que pour protéger des enjeux importants. Il ne faut pas oublier que les phénomènes d'érosion sont naturels pour une rivière et qu'ils garantissent le bon fonctionnement de celle-ci par la création d'habitats pionniers et la recharge du transport solide. Les interventions même celles réalisées en génie végétal ne doivent pas se généraliser à la moindre marque d'érosion. Lorsque c'est possible, il est donc préférable de laisser les cours d'eau divaguer.

6. Bibliographie

- Adam, P., Debiais, N., Gerber, F., & Lachat, B. (2008). *Le génie végétal. Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques* (La Documentation française : MEDDE)
- Allinne, C. (2007). Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 13(1).
- AMEC. (2012). *Design guidelines for erosion and flood control projects for streambank and riparian stability restoration* (AMEC Environment & Infrastructure N° CW2098). The City of Calgary, Water Resources.
- Anstead, L., & Boar, R. R. (2010). Willow Spiling : Review of Streambank Stabilisation Projects in the UK. *Freshwater Reviews*, 3(1), 33-47. <https://doi.org/10.1608/FRJ-3.1.2>
- Anstead, L., Boar, R. R., & Tovey, N. K. (2012). The effectiveness of a soil bioengineering solution for river bank stabilisation during flood and drought conditions : Two case studies from East Anglia. *Area*, 44(4), 479-488. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2012.01132.x>
- Baird, D. C., Fotherby, L., Klumpp, C. C., & Scullock, S. M. (2015). *Bank stabilization design guidelines* (SRH-2013-25). U.S. Department of the Interior.
- BAW. (2010). *Principles for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland Waterways (GBB)* (BAW Codes of Practice and Guidelines).
- Bechmann, G. (1905). *Hydraulique agricole et urbaine* (Ch. Béranger).
- Belidor, B. F. de. (1755). *Dictionnaire portatif de l'ingénieur, où l'on explique les principaux termes des sciences les plus nécessaires...* (C.-A. Jombert).
- Belidor, B. F. de. (1782). *Architecture hydraulique* (Cellot).
- Bentrup, G., & Hoag, J. C. (1998). *The practical streambank bioengineering guide: user's guide for natural streambank stabilization techniques in the arid and semi-arid great basin and intermountain west*. USDA-Natural Resources Conservation Service, Plant Materials Center, Aberdeen. ID.
- Bernard, C. (1927). *Cours de restauration des montagnes*. Ecole normale des eaux et forêts.
- Bigham, K. A. (2020). *Streambank Stabilization Design, Research, and Monitoring : The Current State and Future Needs*. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 351-387. <https://doi.org/10.13031/trans.13647>
- Billard, C., & Bernard, V. (2016). Les barrages à poissons au Mésolithique. Une économie de prédation ou de production ? In *Archéologie des chasseurs-cueilleurs maritimes. De la fonction des habitats à l'organisation de l'espace littoral par Catherine Dupont, Gregor Marchand* (Société préhistorique française).
- Biotec. (2011). *Aménagement d'un glissement de terrain et protection de berge contre l'érosion sur le Pamphiot, commune d'Anthy-sur-Léman. Dossier de consultation des entreprises et cahier des clauses techniques particulières* (10.127-DCE-104; p. 32).
- Bonin, L., Evette, A., Frossard, P.-A., Prunier, P., Roman, D., & Valé, N. (2013). *Génie végétal en rivière de montagne—Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : Végétalisation de berges et ouvrages bois*. <http://www.genialp.org/ouvrage/files/10/ouvrage.html>
- Bouillet. (1693). *Traité des moyens de rendre les rivières navigables* (Étienne Michallet).
- Bourdet, B. R. (1771). *Traité des digues le long des fleuves et rivières*.
- Campbell, S. D. G., Shaw, R., Sewell, R. J., & Wong, J. C. F. (2008). *Guidelines for soil bioengineering applications on natural terrain landslide scars*.
- Caspers, S. (2021). *Caspers Communications et M.C. Houkes, RCE Maritime Programme /*

- Houkes Advies, *Herkennen van archeologische vondsten uit (voor- malige) waterbodems en hoe daar mee om te gaan*, Deuxième édition révisée.
- César. (s. d.). *La Guerre des Gaules, Livre VII, § 58* « combler le marais de claies et de fascines » (*cratibus atque aggere*).
- Chronique de site. (2015). *Place Saint-Germain*. <https://www.inrap.fr/place-saint-germain-les-archeologues-reconstituent-l-histoire-d-un-quartier-5386>
- Coufourier, N., Lecomte, V., Le Goff, A., Pivain, Y., Lheriteau, M., & Ouvry, J.-F. (2008). *Fascine. Freiner les ruissellements. Provoquer la sédimentation. Fiche n°12* (p. 4) [Fiche technique]. Chambres d'agriculture de la Seine Maritime, de l'Eure et Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols.
- Defontaine, A. (1833). «*Des Travaux du fleuve du Rhin*», *Annales des ponts et chaussées. Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur, Carilian-Goeury*.
- Degoutte, G. (2006). *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières: Hydraulique et morphologie fluviale appliquées*. Lavoisier, Paris.
- Demagnet, A. (1847). *Cours de construction professé à l'école militaire de Bruxelles (1843-1847)* (Société typographique belge).
- Demontzey, P. (1875). *Reboisement des montagnes. Compte-rendu des travaux de 1869 à 1874* (Imprimerie Nationale).
- Depelchin, F. (1887). *Les forêts de la France*. A. Mame et fils.
- Deshoulières, F. (2002). Les ponts de fascines romains de Breuil-le-Sec (Oise). *Bulletin Monumental*, 96(1), 104-104.
- Diaz, J. S. (2001). *Control de Erosion en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Donat, M. (1995). Bioengineering techniques for streambank restoration. *A review of Central European practices* (Watershed Restoration Project Report No. 2; p. 92). Ministry of Environment, Lands and Parks and Ministry of Forests of Vancouver, BC, Canada.
- Donneau de Vizé (dir.). (1679). *Mercure Galant*. au Palais, Paris, p. 170.
- Douane, M. (2011). *Projet d'aménagement hydro-écologique: État des lieux et conception appliqué à l'Yzeron*. [Rapport de fin d'études]. Compagnie Nationale du Rhône.
- Eubanks, C., & Meadows, D. (2002). *A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization* (606). U.S. Department of Agriculture Forest Service, Technology and Development Program.
- Evette, A., De Danieli, S., Labonne, S., Sardat, N., & Crozaz, Y. (2007). *Synthèse et bilan critique des réalisations de génie écologique pour la maîtrise de l'érosion en rivière*. CEMAGREF.
- Evette, A., Labonne, S., Rey, F., Liébault, F., Jancke, O., & Girel, J. (2009). History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43(6), 972-984. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9275-y>
- Evette, A., Piton, G., Janssen, P., Dommanget, F., Popoff, N., Jaymond, D., Guilloteau, C., Leblois, S., De Danieli, S., Recking, A., Jung, D., Vivier, A., Martin, F.-M., Jaunatre, R., Mira, E., & Didier, M. (2022). Le génie végétal sur les berges de cours d'eau : Des techniques aux multiples bénéfiques. *Office français de la biodiversité. Collection Comprendre pour agir*.
- Eytelwein, J. A. (1800). *Praktische Anweisung zur Konstruktion der Faschinenwerke und den dazu gehörigen Anlagen an Flüssen und Strömen*.
- Faber, R. (2004). New techniques for urban river rehabilitation. Specifications for new materials and techniques improve instream morphology. Soil-bioengineering. *Work Packet*, 8.
- Finney, K. (1993). History of soil bioengineering. *In Eleventh annual California salmonid restoration federation conference, Eureka, CA*.
- Florineth, F., & Molon, M. (2005). *Dispensa di ingegneria naturalistica*. Università di Bodenkultur, Vienna, Austria. Istituto di

- ingegneria Naturalistica e Costruzione del Paesaggio.
- Frossard, P.-A., & Evette, A. (2009). Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : Une tradition millénaire en constante évolution. *Sciences Eaux & Territoires, (Spécial Ingénieries-EAT-29)*, 99-109
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization : A practical guide for erosion control*. John Wiley and Sons, Inc.
- Hoag, J. C. (1992). *Planting Techniques from the Aberdeen, ID, Plant Materials Center for vegetating shorelines and riparian areas*. Proceedings--Symposium on Ecology and Management of Riparian Shrub Communities. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RM-65. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, CO.
- Hoag, J. C. (1994). *How to plant willows and cottonwood dormant pole cuttings for riparian rehabilitation*. Interagency Riparian/Wetland Plant Development Project, USDA, Natural Resources Conservation Service, Plant Materials Center.
- Hoag, J. C. (2005). *Streambank Soil Bioengineering Considerations For Semi-Arid Climates*. Riparian/Wetland Project Information Series, (18), 42-48
- Hudson N. (1981). *Soil Conservation* (2nd ed.). Cornell University Press. Scientific Publishers
- Jaymond, D., Evette, A., Bray, F., Leblois, S., Jung, D., Vivier, A., & Dorget, C. (2021). BD GeniVeg : Une base de données française sur les ouvrages de protection de berges en génie végétal. *Sciences Eaux & Territoires*. <https://doi.org/10.14758/set-revue.2021.HS.07>
- Karle, K. F., Emmett, W. W., & Moore, N. (2005). Analysis of 11 Bioengineered Stream Bank Erosion Control Structures in Alaska. *Transportation Research Record*, 1941(1). <https://doi.org/10.1177/0361198105194100115>
- Kramer, K., Vreugdenhil, S. J., & van der Werf, D. C. (2008). Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species : A field and simulation study on the Rhine floodplain. *Forest Ecology and Management*, 255(11). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.044>
- Kümmer, U. N. (1849). *Essai sur les travaux de fascinages et la construction des digues ; ou, Description du réendiguement des polders du bas Escaut Belge : Précédé d'une notice historique sur ces polders* Librairie polytechnique d'Aug. Decq, 1.
- Kupper, J.-R. (1988). « L'Irrigation à Mari » dans *Bulletin on Sumerian Agriculture, Irrigation and Cultivation in Mesopotamia, part I* (Cambridge).
- Kuzovkina, Y. A., & Quigley, M. F. (2005). Willows Beyond Wetlands : Uses of Salix L. Species for Environmental Projects. *Water, Air, and Soil Pollution*, 162(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-005-6272-5>
- Labonne, S., Rey, F., Girel, J., & Evette, A. (2007). Historique des techniques de génie biologique appliquées aux cours d'eau. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 52. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00602456>
- Lachat, B. (1994). *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales*. Ministère de l'Environnement. DEREN Rhône Alpes, 143.
- Lachat, B. (1999). Quelques souvenirs historiques et perspectives d'avenir du génie biologique en Suisse romande et en francophonie. *Génie biologique*, 4.
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Pagan-Ortiz, J. E., Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Schall, J. D., Girard, L. G., & Ayres Associates. (2009). *Bridge scour and stream instability countermeasures : Experience, selection, and design guidance : Volume 2* (FHWA-NHI-09-112), *third edition*. National Highway Institute (US).
- Lavaine, C., Evette, A., & Piégay, H. (2015). European Tamaricaceae in Bioengineering on Dry Soils. *Environmental Management*, 56(1). <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0499-8>

- Leblois, S., Evette, A., Favier, G., & Recking, A. (2016). Amélioration des méthodes de dimensionnement des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau par une approche empirique. *Sciences Eaux & Territoires*, 27. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2016.HS.05>
- Leblois, S., Evette, A., Jaymond, D., Piton, G., & Recking, A. (2022). Processus et causes de défaillance du génie végétal pour la stabilisation des berges de rivière : Retour d'expérience sur un large jeu de données issues de la BD GeniVeg. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 28(2), 2. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.16954>
- Lequertier, E., Berlioz, J.-P., Gonthier, C., & Muller, T. (2015). *Travaux de génie végétal*. E. de Bionnay, Vol. 1-N.C.1-R0.
- Lewis, L. (2000). *Soil bioengineering : An alternative for roadside management. A practical guide*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Technology & Development Program.
- Louis XIV. (1714). *Ordonnance de la marine, du mois d'aoust 1681*.
- Lupicini, A. (1587). *Discorso sopra i ripari del Po, et d'altri fiumi, in Giorgio Marecottti*.
- Mai, B., Liu, N., Liu, J., Liu, D., Li, J., Wang, J., Chen, A., Cao, J., & Li, Y. (2022). Analysis and appraisal of fascine in Shahe ancient bridge ruins, Xi'an, Shaanxi, China. *Heritage Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00659-9>
- Mathieu, A. (1864). *Le reboisement et le regazonnement des Alpes* (Réédition 1875). Imprimerie nationale.
- McCullah, J., Gray, D. H., & Program, N. C. H. R. (2005). *Environmentally Sensitive Channel- and Bank-protection Measures (58)*. Transportation Research Board.
- Mejier, C. (1695). *L'arte di restituire à Roma la tralasciata nauigatione del suo Teuere* (Varese).
- Miller, R. M., & Jastrow, J. D. (1990). Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(5). [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90001-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90001-G)
- Mira, E., Evette, A., Labbouz, L., Robert, M., Rousteau, A., & Tournebize, R. (2021). Investigation of the Asexual Reproductive Characteristics of Native Species for Soil Bioengineering in the West Indies. *Journal of Tropical Forest Science*, 33(3). <https://www.jstor.org/stable/27039921>
- Mira, E., Rousteau, A., Tournebize, R., Robert, M., & Evette, A. (2022). Evaluating the suitability of neotropical trees and shrubs for soil and water bioengineering : Survival and growth of cuttings from ten Caribbean species. *Ecological Engineering*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106808>
- Monthly Reports of the Department of Agriculture for the Year 1871*. (1872). Government Printing Office, Washington.
- Needham, J. (1971). *Science and Civilisation in China : Volume 4, Physics and Physical Technology*. Cambridge University Press.
- Oplatka, M. (1998). *Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern*. Thèse de doctorat, ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-001920916>
- Ouvry, J.-F., Richet, J.-B., Bricard, O., Lhérieu, M., Bouzid, M., & Saunier, M. (2012). *Fascines & Haies pour réduire les effets du ruissellement érosif. Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation*. Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols. *Brochure Areas*.
- Paquet, P., & Guillot-Pingue, A. (2017). *Les Voies romaines par la Wallonie : La voie Bavay-Velzeke* (SPW).
- Peeters, A., Houbrechts, G., Hallot, E., Campenhout, J. V., Verniers, G., & Petit, F. (2018). Efficacité et résistance de techniques de protection de berges en génie végétal. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 24(2), 2. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11927>
- Pezeshki, S. R., Li, S., Shields, F. D., & Martin, L. T. (2007). Factors governing survival of black

- willow (*Salix nigra*) cuttings in a streambank restoration project. *Ecological Engineering*, 29(1). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.07.014>
- Piégay, H., & Pautou, G. (2000). *Stabilisation et déstabilisation des lits fluviaux par le végétal : Enjeux et contradictions apparentes*. Programme National de Recherche « Recréer la nature », Ministère de l'environnement - Muséum National d'Histoire Naturelle.
- Pinto, A., Fernandes, L. F. S., & Maia, R. (2016). Monitoring Methodology of Interventions for Riverbanks Stabilization : Assessment of Technical Solutions Performance. *Water Resources Management*, 30(14). <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1486-4>
- Recking, A., Piton, G., Montabonnet, L., Posi, S., & Evette, A. (2019). Design of fascines for riverbank protection in alpine rivers : Insight from flume experiments. *Ecological Engineering*, 138, 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.019>
- Rey, F. (2002). *Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du sud*. Thèse de doctorat. Doctorat Géographie physique, Université Joseph Fourier, Grenoble I. <https://hal.inrae.fr/tel-02580848>
- Rey, F. (2012). *Génie biologique contre l'érosion torrentielle*. Editions Quae.
- Rey, F., Berger, F., Quétel, C., & Le Hir, C. (2003). Le rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres. *Sciences Eaux & Territoires*, (Spécial Ingénieries-EAT-17), 165-178
- Richet, J.-B., Ouvry, J.-F., & Saunier, M. (2017). The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects : Experimental evidence of efficiency, and conditions of use. *Ecological Engineering*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.008>
- Roman, D. (2009). *Les ouvrages en bois dans les cours d'eau, état de l'art, applications et dimensionnements*. Guide Technique, ONF.
- Ronna, A. (1890). *L'agriculture et les cours d'eau* (Librairie agricole de la maison rustique).
- Rouviere, S. (2003). Visite de travaux de protection et d'entretien des berges du Vidourle. *Forêt Méditerranéenne*, 24(3). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03564599>
- Rutherford, I. D., Jerie, K., & Marsh, N. (2000). *A rehabilitation manual for Australian streams*. Canberra: Land and Water Resources Research and Development Corporation and Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology., Vol. 1.
- Rytter, R.-M. & Hansson. (1996). Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. *Biomass and Bioenergy*, 11(2/3). [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(96\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0961-9534(96)00023-2)
- Scheck, R. (1885). *Anleitung zur Ausführung und Veranschlagung der Faschinenbauten : Für den Gebrauch auf der Baustelle und zum Selbststudium*. Politechnische Buchhandlung A. Seydel.
- Schemerl, J. von. (1809). *Erfahrungen im Wasserbaue*. Geistinger.
- Schiechtl, H. M. (1992). *Weiden in der Praxis*. Patzer.
- Schiechtl, H. M., & Stern, R. (1996). *Ground bioengineering techniques. For slope protection and erosion control*. Blackwell.
- Schiechtl, H. M., & Stern, R. (1997). *Water bioengineering techniques for watercourse bank and shoreline protection*. Oxford : Blackwell Science.
- Sotir, R. B., & Fischenich, C. (2001). *Live and inert fascine streambank erosion control*. Technical Notes. ERDC TN-EMRRP-SR-31, US Army Corps of Engineers Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A. G., Fourcaud, T., & Sidle, R. C. (2009). Desirable plant root

- traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 324(1). <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0159-y>
- Thiéry, E. (1891). *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*, Baudry.
- Tourbier, J. T., & Westmacott, R. N. (2005). *Manual of urban rivers rehabilitation techniques*. A contribution to work package 8, Chapter 5. Dresden University of Technology.
- Turriano, J. (XVIe-XVIIe s.). *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas* (Manuscrit). Biblioteca nacional de España.
- United Nations. (1953). *River training and Bank Protection*.
- Van Breen, L. G. (1920). *Hollands' Rijnshout* (Oosterbaan&Le Cointre).
- Venti, F., Bazzurro, F., Palmeri, F., Uffreduzzi, T., Venanzoni, R., & Gibelli, G. (2003). *Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni*. D. Venti, F. Bazzurro, F. Palmeri, T. Uffreduzzi, R. Venanzoni and G. Gibelli (Provincia di Terni ed.).
- Viollet, P.-L. (2010). Water engineering and management in the early Bronze Age civilizations. *Water Engineering and Management through Time*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10560-7>
- Woltman, R. (1791). *Beiträge zur Hydraulischen Architectur*.
- Zeh, H. (2000). *Méthodes de construction du génie biologique*. Office fédéral des eaux et de la géologie.
- Zeh, H. (2007). *Ingenieur biologie: Handbuch Bautypen. Génie biologique: Manuel de construction. Ingegneria naturalistica: Quaderno delle opere tipo. Soil bioengineering: Construction type manual. Ingegneria biologica: Manual tecnico*. Société suisse du génie biologique et Fédération Européenne pour le génie biologique.
- Zeh, H. (2010). *Génie biologique et aménagement de cours d'eau: Méthodes de construction. Guide pratique*. Office fédéral de l'environnement (OFEV).
- Zhang, L. (2009). Changing with the Yellow River: An Environmental History of Hebei. *Harvard Journal of Asiatic Studies*, 69(1). <https://www.jstor.org/stable/40213690>
- Zhang, L. (2016). *The River, the Plain, and the State: An Environmental Drama in Northern Song China*. Cambridge University Press.
- Zouaoui, H. I. (2011). *La quantification de l'évaporation dans le genre Salix: Une contribution à la renaturation et à la revitalisation des cours d'eau*. Maîtrise Universitaire en Sciences de l'Environnement. Université de Genève. Université de Genève.
- Zuffi, D. (1989). *Génie biologique—Cours sur la stabilisation végétale des talus*. Inspection cantonale des forêts.