



HAL
open science

Le Bouturage pour le génie végétal en berges de cours d'eau

Marie Didier, André Evette, Mathias Pires, Juliette Rousset, Patrice Prunier, Pierre-André Frossard, Luce Martin, Anne Vivier

► **To cite this version:**

Marie Didier, André Evette, Mathias Pires, Juliette Rousset, Patrice Prunier, et al.. Le Bouturage pour le génie végétal en berges de cours d'eau. pp.1-149, 2024, 10.57745/AUWFDZ . hal-04688423

HAL Id: hal-04688423

<https://hal.science/hal-04688423v1>

Submitted on 5 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE BOUTURAGE POUR LE GÉNIE VÉGÉTAL EN BERGES DE COURS D'EAU

GUIDE TECHNIQUE

Marie DIDIER, André EVETTE,
Mathias PIRES, Juliette ROUSSET,
Patrice PRUNIER, Pierre-André FROSSARD,
Luce MARTIN, Anne VIVIER



Sommaire

Remerciements	3
Préambule	4
I. Les berges de cours d'eau	5
1. Les milieux riverains	5
Une situation à la frontière entre terre et eau	5
Des fonctions écologiques clés et bénéfiques multiples	6
Une vulnérabilité croissante.....	8
2. Les espèces riveraines et leurs adaptations	10
Les essences riveraines.....	10
Des espèces particulières et adaptées	11
II. Le génie végétal	12
1. Introduction au génie végétal.....	12
Les fondements du génie végétal.....	12
Les cadres réglementaires et expérience en France	13
Les apports du génie végétal.....	14
Les différentes techniques de génie végétal.....	16
2. Les traits biotechniques recherchés pour le génie végétal	19
III. Introduction au bouturage.....	19
1. Le bouturage comme technique d'aménagement et de protection des berges.....	19
Fondements et applications	19
Atouts et bénéfices du bouturage pour les projets de génie végétal	20
Le bouturage en tant que pierre angulaire du génie végétal.....	21
Focus sur le processus en jeu... ..	22
2. Les espèces utilisées en Europe pour le bouturage et leurs caractéristiques	23
Les principaux genres d'espèces ligneuses utilisées en bouturage et leur utilisation	23
La famille des Salicacées.....	29
La famille des Tamaricacées.....	32
3. Description des espèces ligneuses	34
IV. Mise en œuvre du bouturage	38
1. Aménagements et précautions préalables.....	38
2. Prélèvement du matériel végétal	39
3. Transport et stockage	43
4. Préparation du matériel végétal.....	46
5. Mise en terre des boutures	48

6. Entretien et suivi de l'ouvrage.....	52
7. Coûts.....	54
Conclusion	55
Références.....	56
Annexe 1	73
Annexe 2	146

Comment citer ?

Didier, M., Evette, A., Pires, M., Rousset, J., Prunier, P., Frossard, P-A., Martin, L. & Vivier, A. (2024). **Le bouturage pour le génie végétal en berges de cours d'eau**. Guide technique par l'Office Français de la Biodiversité avec l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

Remerciements

Ce guide a pu prendre forme grâce à l'engagement, à la volonté, et au soutien précieux de divers co-auteurs, chacun contribuant de manière significative à son élaboration. Leurs regards critiques et leurs suggestions ont indubitablement enrichi le contenu. Ainsi, nous exprimons nos chaleureux remerciements, en premier lieu, à *Luce Martin*, *Mathias Pires* (INRAE), *Juliette Rousset* (INRAE) et *Solange Leblois* (INRAE).

Nous souhaitons également adresser nos remerciements particuliers aux relecteurs de cet ouvrage, *Pierre-André Frossard* (HEPIA) et *Patrice Prunier* (HEPIA), pour leur collaboration amicale et efficace. Leur contribution a été cruciale pour le développement tant de la forme que du contenu, grâce à leurs remarques avisées et à la mise à disposition de nombreuses photos illustratives.

Un merci tout particulier à *Anne Vivier* (OFB) pour sa relecture attentive et son regard expert qui ont grandement enrichi cet ouvrage.

Marie Didier et André Evette
INRAE Grenoble
Le 06 Mars 2024

Préambule

Le bouturage est un mode de multiplication végétative spontané ou provoqué, qui a été opportunément intégré dans les techniques de génie végétal, particulièrement dans le contexte du contrôle de l'érosion en milieu riverain. Cette pratique, ancestrale, se positionne comme une pierre angulaire au sein d'une approche de restauration respectueuse de l'environnement. La polyvalence inhérente au concept de bouturage sous-tend son utilisation au sein d'une diversité de techniques clés en génie végétal, notamment les lits de plants et de plançons, les fascines vivantes, les couches de branches à rejets, et bien d'autres encore. À proprement parler, le bouturage constitue également une technique à part entière.

À première vue simple et réputé pour sa polyvalence, le bouturage requiert un véritable savoir-faire afin d'assurer une reprise optimale de la végétation, condition *sine qua non* de la réussite des ouvrages de génie végétal (Figure 0-1). Le choix des espèces, la qualité du matériel végétal et la rigueur de la mise en place sont autant de facteurs déterminants pour atteindre cet objectif. Cependant, de nos jours, une mauvaise reprise de la végétation demeure l'une des principales causes d'échec des ouvrages (Leblois et al., 2022).



Fort de ces constats, le présent guide a pour vocation de promouvoir une utilisation éclairée du bouturage dans le cadre du génie végétal, contribuant ainsi à la création de solutions techniques durables. L'objectif principal est de rendre accessibles à tous les bonnes pratiques d'utilisation, de mettre en lumière les espèces à privilégier selon le contexte, et d'explorer en détail les diverses applications possibles. Dans cette perspective, ce guide se propose d'aborder en premier lieu le contexte d'intervention et d'application, en détaillant les caractéristiques et les choix d'espèces à privilégier. Ensuite, il mettra en évidence les réflexes et points de vigilance à apporter lors de la mise en œuvre. L'objectif final est de mettre à la portée de chacun des préconisations techniques précises, tout en fournissant aux gestionnaires les informations nécessaires pour la bonne mise en place des boutures, depuis le choix des espèces jusqu'à l'entretien post-travaux.

Figure 0-1: Reprise réussie d'une bouture en berge de cours d'eau
© Sébastien De Danieli

Ce document se présente comme un support technique pratique destiné aux concepteurs, maîtres d'œuvre, techniciens, maîtres d'ouvrage, ou grand public. Il ne prétend pas offrir une solution universelle à toutes les situations en matière de protection des berges, ni se substituer à un catalogue de recettes à appliquer sans discernement. Le bouturage est souvent combiné à d'autres techniques pour répondre de manière précise à chaque particularité et spécificité du site considéré. La conception d'un ouvrage de stabilisation à l'aide de techniques végétales requiert des compétences multiples et pluridisciplinaires, englobant non seulement la botanique et l'écologie, mais aussi les sciences de l'ingénieur, la pédologie et l'hydraulique, en intégrant une connaissance complémentaire des

processus érosifs et morphodynamiques. La conception d'un ouvrage de génie végétal exige un diagnostic précis et rigoureux, reposant sur une analyse approfondie du terrain et aboutissant à des plans ainsi qu'à des spécifications techniques associées.

I. Les berges de cours d'eau

1. *Les milieux riverains*

Une situation à la frontière entre terre et eau

Les zones riveraines sont des zones de transition tridimensionnelles d'interaction entre les écosystèmes terrestres et aquatiques, qui s'étendent de la limite des masses d'eau à la limite des systèmes de hautes terres (Figure I-1) (Naiman et al., 2005; Arizpe et al., 2008). Régulièrement influencés par l'eau, ces milieux sont considérés comme des écotones qui interagissent sur les plans physique, morphologique, chimique et biologique (National Research Council, 2002; Dufour et al., 2019). Ils englobent de forts gradients de facteurs environnementaux, de processus écologiques et de communautés végétales qui structurent des habitats et micro-habitats diversifiés pour les espèces riveraines. Ils ne sont pas faciles à délimiter, mais sont constitués de mosaïques de formes de relief, de communautés et d'environnements au sein d'un paysage plus vaste (Gregory et al., 1991). Structurellement complexes, les milieux riverains se caractérisent par des compositions végétales et animales particulièrement riches (Naiman & Décamps, 1997; Naiman et al., 2005). Les communautés végétales, qui constituent la ripisylve, se présentent sous la forme de strates herbacée, arbustive et/ou arborée dont la dynamique (établissement, colonisation et extinction) est régie par la variation des paramètres physiques, chimiques et biologiques induite par le régime de perturbation (Naiman & Décamps, 1997).



Figure I-1: Zone alluviale active et sa végétation © Pierre-André Frossard

Les zones riveraines sont des systèmes ouverts, dynamiquement liés longitudinalement, latéralement et verticalement par des processus hydrologiques et géomorphologiques et par la dynamique de la végétation (Gregory et al., 1991). Ces facteurs agissent comme des moteurs primaires des écosystèmes qui créent, structurent, maintiennent et détruisent l'ensemble hétérogène et complexe des différents habitats d'espèces riverains. L'hydrologie est la variable maîtresse formant les zones riveraines, notamment à travers les crues. La structuration hydrologique et géomorphologique des

zones riveraines dépend du moment, de la durée, de la fréquence et de l'ampleur du débit et des impulsions de débit (Gregory et al., 1991; Malanson, 1993; Naiman et al., 2005). Les crues, influençant le mouvement des chenaux, créent et structurent la distribution de la végétation, la topographie et les formes géomorphologiques du terrain par l'alternance et le jeu successif de l'érosion et de l'atterrissement (Gregory et al., 1991; Hughes, 1997). Les facteurs hydrologiques, à travers la mobilité spatiale du lit mineur, s'imposent comme des facteurs essentiels de régénération des biocénoses et constituent le principal moteur de la biodiversité (Adam et al., 2008; Nilsson et al., 2010). En retour, la végétation est également susceptible d'affecter les schémas hydrauliques et géomorphologiques par sa capacité à fixer les sédiments et nutriments et à retenir l'eau qui traverse la zone riveraine (Hughes, 1997; A. Gurnell & Petts, 2006). Ce sont donc des rétroactions abiotiques-biotiques complexes qui forment ces milieux particuliers.

Corenblit et al. (2007) décrivent ce processus en tant que « succession biogéomorphologique fluviale ». Telle que décrite par ses auteurs, cette succession fait référence aux changements dans la composition et la structure des écosystèmes riverains au fil du temps en réponse à des interactions complexes entre les processus biotiques et les processus géomorphologiques le long d'un cours d'eau. Cette approche reconnaît l'importance de la végétation et des processus écologiques dans la dynamique morphologique des rivières. Entre les crues, les périodes de stabilité permettent à la végétation de se développer en initiant la succession écologique. Les premières espèces végétales à s'installer sont généralement des herbacées pionnières des alluvions, caractérisées par leurs excellentes capacités de régénération et de colonisation des milieux jeunes ou récents. Si les sédiments restent en place sans perturbation pendant un certain temps, les premières espèces ligneuses à bois tendre, telles que les saules, apparaissent. Les boisements pionniers sont susceptibles de changer les conditions d'écoulement et de favoriser l'accrétion de sédiments et de facto la forme des bancs. Si cette période de stabilité s'étend sur plusieurs années, voire des décennies, la végétation continue d'évoluer à travers des stades successifs et typiques de la succession végétale. Les espèces pionnières de bois tendre cèdent progressivement leur place à des espèces pionnières de bois dur, jusqu'à atteindre le stade mature, stade forestier, qui est souvent représenté par des frênaies, hêtraies ou chênaies à basse altitude selon les conditions climatiques, édaphiques locales et selon la taille et la position du cours d'eau (par ex. *Equiseto-Fraxinetum*, *Pruno-Fraxinetum*, *Ulmo-Fraxinetum*, etc.) (Piégay et al., 2003; Corenblit et al., 2007; Adam et al., 2008; Labroche et al., 2021; Boyer et al., 2023). Ces processus sont régulés par l'alternance et l'intensité des crues, conférant aux berges une variabilité spatiale en trois dimensions laquelle s'ajoute une dimension temporelle, souvent considérée comme une quatrième (Riis et al., 2020). Ces successions complètes ne se réalisent pas partout, les crues créant des perturbations fréquentes, d'intensité variable faisant disparaître certains de ces milieux par ensevelissement ou érosion des sols.

Des fonctions écologiques clés et bénéfiques multiples

Bien plus que de simples bandes de végétation, les zones riveraines et notamment la ripisylve assurent de nombreuses fonctions, résultant des interactions complexes entre les environnements biotiques et abiotiques (de Groot et al., 2002). Ces écosystèmes dynamiques fournissent de multiples services écosystémiques, servant de zone tampon à l'interface terre-eau, et sont des sites importants pour le stockage de l'eau, la recharge des nappes phréatiques ou la dépollution (Arizpe et al., 2008). Les berges jouent un rôle essentiel en offrant une myriade de bénéfices écologiques, économiques et sociaux (Naiman et al., 2005) :

1. **Biodiversité** : Caractérisés par une biodiversité faunistique et floristique remarquable, les milieux riverains servent de refuge, de lieu de reproduction et de corridor de migration pour de nombreuses espèces, y compris des oiseaux, des poissons, des amphibiens et une grande variété d'insectes (Figure I-2) (Naiman & Décamps, 1997; Labroche et al., 2021; Boyer et al., 2023). Cette diversité peut représenter jusqu'à 90 % des espèces végétales d'un bassin versant,



Figure I-2: Les milieux riverains et la biodiversité © Sébastien De Danieli

tandis que les espèces animales d'eau douce constituent 9,5 % de l'ensemble des espèces animales, avec un tiers de toutes les espèces de vertébrés, malgré le fait que ces milieux ne couvrent que 0,8 % de la surface de la Terre (Dudgeon et al., 2006; Balian et al., 2008). Ce sont des milieux qui constituent de réels corridors écologiques pour la biodiversité périphérique. À l'état de stabilité, ils sont également riches en microhabitats naturels et constituent une ressource trophique de premier ordre. Cette diversité biologique est essentielle pour la santé de nos écosystèmes et la préservation de la biodiversité globale.

2. **Amélioration de la qualité de l'eau** : Ces écosystèmes agissent comme des filtres naturels (Riis et al., 2020). De plus, les arbres et la végétation riveraine fournissent de l'ombre et contribuent à réguler la température de l'eau (Décamps, 2002; Dufour & Piégay, 2006). Les eaux plus fraîches et plus riches en oxygène limitent alors considérablement le développement de la végétation eutrophile, offrent des conditions propices à la vie de la faune piscicole et à de nombreux invertébrés. Ce rôle est d'autant plus important avec l'augmentation des températures liées au changement climatique.

Les végétations riveraines représentent également des zones tampons capables de limiter l'impact des polluants, qu'ils soient d'origine agricole (eaux vertes, engrais effluents, etc.) ou anthropique (eaux usées). En retenant les sédiments et en piégeant les nutriments et pesticides, les ripisylves sont susceptibles d'influencer positivement la qualité de l'eau. En jouant un rôle de filtre, la végétation participe à la rétention des particules transportées par les eaux de ruissellement provenant des terres riveraines (Décamps, 2002). Les polluants contenus dans les sédiments peuvent être fixés par la végétation puis dégradés par les micro-organismes.

Les boisements riverains et les zones humides associées présentent des capacités épuratoires remarquables, lesquelles varient en fonction des saisons (Clément et al., 2003; Ruffinoni et al., 2003). La capacité d'assimilation de l'azote par les végétaux dans les ripisylves, supérieure à

celle des bandes herbacées, découle tant du prélèvement effectué par les végétaux que de l'action dénitrifiante des micro-organismes (Clément et al., 2003; Saillard et al., 2018; Labroche et al., 2021).

3. **Protection et prévention des inondations** : Le système racinaire des arbres et arbustes, ancré profondément dans le sol, fixe et stabilise le sol en le protégeant contre l'érosion. C'est les essences possédant un enracinement profond qui sont les plus à même de participer à la stabilisation des berges (tels que les saules, les aulnes ou encore le Peuplier noir). La ripisylve et les zones alluviales associées sont également susceptibles en parallèle de minimiser les effets des perturbations hydrologiques en stockant provisoirement l'eau (effet de zone tampon), en ralentissant la vitesse de l'eau, et également en contribuant à réduire les risques d'inondations (Riis et al., 2020).

4. **Valeur écologique** : Les ripisylves et la végétation alluviale jouent un rôle déterminant dans la morphologie des rivières en influençant les propriétés des écoulements et la dynamique sédimentaire du lit (Piégay, 1997; Corenblit et al., 2007). Elles contribuent également à accroître l'hétérogénéité spatiale et la diversité des habitats pour la faune aquatique en fournissant du bois mort qui s'accumule dans le lit (Piégay & Maridet, 1994; Décamps et al., 2004), et, dans certains cas, en favorisant la diversité des champignons décomposeurs (Laitung et al., 2002).

Par ailleurs, les arbres riverains apportent une source d'énergie essentielle aux cours d'eau en fournissant de la litière. Dans les petits cours d'eau, l'apport de litière représente la principale source d'énergie disponible pour les organismes (Lévêque, 2016). Par exemple, un tronçon d'un kilomètre de ripisylve peut fournir plus de 3 kilogrammes de litière par an à la Garonne, soit jusqu'à plus de 6 tonnes de litière par hectare et par an (Chauvet & Jean-Louis, 1988). Ces débris végétaux contribuent à la densification des populations de macro-invertébrés benthiques à l'automne, notamment les broyeurs détritvires (Décamps et al., 2004). La production animale associée aux forêts riveraines est également significative, car les arthropodes terrestres riverains peuvent contribuer à plus de 50 % de l'alimentation de certaines espèces de poissons (Naiman et al., 2005).

5. **Valeur esthétique et culturelle, loisirs et bien-être humain** : Les berges de cours d'eau forment des milieux privilégiés pour les activités de loisir et de détente en offrant des espaces pour la pêche, la randonnée, le canoë-kayak et d'autres activités de plein air (Riis et al., 2020). On sait que les arbres jouent un rôle positif significatif sur la santé physique et mentale. Les cours d'eau favorisent également le bien-être mental en fournissant des environnements naturels apaisants pour la détente et la méditation (Labroche et al., 2021; Bergou et al., 2022). En outre, les berges des cours d'eau agissent comme de véritables havres de fraîcheur, offrant un soulagement bienvenu face aux températures élevées lors des événements extrêmes et contribuant ainsi à atténuer les effets des vagues de chaleur en milieu urbain notamment. Enfin, elles ont une valeur esthétique inestimable et jouent un rôle important dans la culture et l'identité des communautés riveraines. Elles sont souvent le théâtre d'activités culturelles et artistiques, et leur beauté naturelle inspire depuis longtemps les artistes et les écrivains.

Une vulnérabilité croissante

La zone riveraine est marquée par une variabilité spatiale et temporelle considérable, résultant principalement des conditions bioclimatiques, géomorphologiques et des utilisations des sols, toutes évoluant au fil du temps sous l'influence de perturbations naturelles et humaines (Riis et al., 2020). Parmi les zones humides intérieures, les cours d'eau et les écosystèmes riverains sont parmi les plus menacés et impactés par les activités humaines (UICN, 2016). Actuellement au niveau mondial, seuls

37 % des rivières de plus de 1000 km présentent une bonne connectivité longitudinale, latérale, verticale et temporelle (Grill et al., 2019). Les pressions anthropiques et l'urbanisation croissante ont considérablement altéré le fonctionnement et la structure de ces écosystèmes aquatiques (Décamps et al., 1988; Malavoi & Adam, 2007; Nilsson et al., 2005). L'exploitation humaine des avantages naturels offerts par les écosystèmes riverains est souvent réalisée sans une compréhension adéquate de la manière dont ces systèmes maintiennent leur vitalité (Gleick, 1993; Naiman et al., 1995; Naiman & Turner, 2000). Ces pressions anthropiques engendrent des changements généralisés et souvent néfastes pour ces écosystèmes, mettant en péril leurs fonctionnalités et fonctions, et par conséquent, les services cruciaux qu'ils assurent, tels que la protection contre les inondations, l'érosion, l'approvisionnement en eau potable, etc. La menace principale pour leur biodiversité demeure la dégradation des habitats (Pimm et al., 2014; Díaz et al., 2019; Chase et al., 2020) :

1. L'expansion urbaine et agricole, le drainage de la plaine alluviale, l'endiguement, la chenalisation, ainsi que l'exploitation intensive des rivières, tant du point de vue sédimentaire qu'électrique, constituent les principales causes de la destruction des écosystèmes riverains (UICN, 2016). Ces altérations impactent de manière directe la structure des berges, compromettant ainsi irrémédiablement leurs fonctions vitales.
2. Les composantes vivantes des écosystèmes riverains sont également confrontées à diverses pressions, menaçant leur intégrité. Parmi ces menaces majeures, l'introduction et la propagation d'espèces exotiques envahissantes représentent une préoccupation cruciale (Richardson et al., 2007). Ces espèces, souvent introduites involontairement par les activités humaines, ont la capacité de proliférer rapidement, supplantant les espèces indigènes et perturbant l'équilibre naturel de la biodiversité des berges. Parallèlement, des menaces biotiques telles que des maladies fongiques ou bactériennes, à l'instar de la chalarose du Frêne ou du *Phytophthora* affectant certaines essences riveraines, peuvent se propager le long des berges (Druart et al., 2013). Ces maladies ont la capacité d'infecter et d'affaiblir la végétation riveraine, générant ainsi des conséquences dévastatrices. Cette propagation de pathogènes contribue à la modification de la composition et de la structure de la végétation riveraine, altérant les interactions écologiques et réduisant les habitats disponibles pour les espèces locales.
3. Enfin, les changements globaux et la variabilité hydrologique émergent comme des menaces nouvelles pour les écosystèmes, constituant des facteurs de risque majeurs pour les berges des cours d'eau. Parmi les effets manifestes, on observe une augmentation significative de la température de l'eau, accompagnée d'une diminution des débits d'étiage (Blöschl et al., 2019), une modification des régimes de crue (Chauveau et al., 2013) et une augmentation alarmante du nombre de cours d'eau marqué par des périodes d'assèchement (Datry et al., 2018). L'augmentation de la température de l'air conduit également à plus d'évapotranspiration et à une baisse des précipitations estivales. Ces changements brusques et cette variabilité hydrologique accentuent la fragilité de ces milieux, menaçant sérieusement l'équilibre délicat qui assure la stabilité des berges des cours d'eau. Ces perturbations notables soulignent l'urgence d'actions concertées pour atténuer les effets dévastateurs de ces altérations hydrologiques sur ces écosystèmes cruciaux.

La vulnérabilité croissante des milieux riverains face à ces pressions souligne la nécessité urgente d'une gestion plus durable et éclairée. Des stratégies intégrées, telles que la préservation des corridors de migration, la régénération des milieux dégradés et la sensibilisation accrue, sont essentielles pour atténuer les impacts négatifs actuels et prévenir une détérioration future. La préservation de la connectivité écologique et la mise en place de pratiques de conservation respectueuses de

l'environnement deviennent impératives pour assurer la résilience et la pérennité de ces écosystèmes fragiles.

2. Les espèces riveraines et leurs adaptations

Les essences riveraines

En France, les essences indigènes des ripisylves, tant arbustives et arborées, se révèlent aisément reconnaissables, reflétant des schémas de boisements similaires :

- Les saules (*Salicaceae – Salix*) (Figure 1-3), peupliers (*Salicaceae – Populus*) et aulnes (*Betulaceae – Alnus*), espèces à bois tendre, façonnent les strates arborées et arbustives des ripisylves à des stades pionniers. Ils colonisent les alluvions déposées à la fin des crues, amorçant ainsi la genèse de la ripisylve.
- Avec le temps, d'autres espèces post-pionnières telles que *Viburnum opulus*, *Prunus padus*, *Evonymus europaeus*, *Sambucus nigra*, *Hippophae rhamnoides* entre autres, s'installent.
- Les frênes (*Oleaceae – Fraxinus*), chênes (*Fagaceae – Quercus*), et ormes (*Ulmaceae – Ulmus*) prennent le relais à des stades plus matures, en tant qu'espèces à bois dur. Ces espèces supportent moins bien les fortes et fréquentes perturbations des milieux pionniers et s'installent au sein des milieux plus stables.



Figure 1-3: Bouture de *Salix appendiculata*, espèce riveraine adaptée © Sébastien De danieli

Selon la zone biogéographique, les conditions stationnelles du site et la dynamique du cours d'eau, c'est une grande diversité d'espèces qui émerge de ces formations (Boyer et al., 2023). En montagne, on observe la présence d'espèces adaptées aux torrents, notamment l'aulne blanc (*Alnus incana*), le saule drapé (*Salix eleagnos*), et le saule fétide (*Salix foetida*) à l'étage subalpin. Sur le littoral, prospèrent des espèces qui tolèrent la salinité, comme les tamaris (*Tamarix africana* ou *Tamarix gallica*). Dans le sud, dominent des espèces thermophiles, parmi lesquelles figurent le frêne oxyphylle (*Fraxinus angustifolia*) et le peuplier blanc (*Populus alba*), entre autres.

Ces descriptions ne prennent pas en compte les invasions biologiques de plus en plus fréquentes qui s'immiscent au cœur des ripisylves. Aujourd'hui, on peut ainsi retrouver en bordure de cours d'eau des renouées asiatiques (*Reynoutria* sp.), le robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia*), l'érable negundo (*Acer negundo*) ou encore l'ailante (*Ailanthus altissima*).

Des espèces particulières et adaptées

Bien plus que de simples cordons boisés le long des cours d'eau, les ripisylves constituent des formations naturelles boisées majoritairement sur des substrats alluviaux, où l'eau occupe un rôle central : présence générale d'une nappe phréatique proche, submersions fréquentes et prolongées, processus d'érosion et d'ensevelissement plus ou moins réguliers, ainsi qu'une connexion étroite avec le lit mineur (Boyer et al., 2023). Les espèces autochtones qui la composent ont co-évolué avec les cours d'eau et se sont adaptées à un régime de perturbations imposé par les crues. Parmi ces perturbations, le transport sédimentaire lors des crues, avec les processus d'érosion et de dépôt successifs, joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre dynamique des écosystèmes riverains en créant des conditions favorables à l'implantation et à la dynamique d'une végétation diversifiée. Ces phénomènes contribuent à l'apport de sédiments, de nutriments, de matière organique et facilitent également la dispersion des propagules (von Schiller et al., 2017).

Les espèces pérennes ont évolué pour s'adapter à un habitat instable et régulièrement perturbé, développant ainsi des caractéristiques essentielles à leur établissement, leur survie et leur reproduction. Ces espèces sont parfaitement adaptées à leur environnement, leur cycle biologique dépend des processus physiques, chimiques et biologiques présents le long des cours d'eau (Stanford et al., 2005; Gurnell et al., 2016). Elles présentent des stratégies variées pour tolérer des conditions telles que l'inondation, l'ensevelissement et d'autres perturbations, assurant ainsi leur survie et favorisant leur croissance rapide au sein de la population (Naiman et al., 2005; Catford & Jansson, 2014). Ces stratégies englobent des adaptations morphologiques, physiologiques et reproductives diversifiées (Blom & Voeselek, 1996; Naiman & Décamps, 1997), et leur plasticité morphologique leur confère la capacité de s'ajuster spécifiquement aux caractéristiques de leur habitat (García & Jáuregui, 2020). Cette diversité d'adaptations repose sur des traits biologiques adaptés (Junk et al., 1989; Décamps, 1996; Naiman & Décamps, 1997). Ces traits varient en fonction des caractéristiques génétiques, de l'âge des plantes et des différentes contraintes de stress et de perturbation notamment liées aux crues hydrologiques spécifiques, démontrant ainsi l'adaptabilité remarquable de ces espèces face à la dynamique des environnements fluviaux.

Espèces pionnières par excellence sur les berges de cours d'eau, les salicacées ont ainsi développé des adaptations favorisant leur survie dans des environnements fortement perturbés, comprenant des taux de croissance rapides et la capacité de régénération aussi bien sexuelle qu'asexuelle (Moggridge & Gurnell, 2009). En réponse à l'abrasion physique, certaines espèces peuvent bouturer rapidement par différenciation des méristèmes caulinaires en méristèmes racinaires (Randall, 2015). D'autres espèces, en dehors des saules, démontrent également une résistance à l'immersion prolongée notamment grâce à une croissance accrue des tiges, permettant aux feuilles d'atteindre rapidement la surface pour capter l'oxygène et la lumière nécessaires à leur survie (Laan et al., 1990; Bailey-Serres & Voeselek, 2008; García & Jáuregui, 2020). Certaines résistent aux sécheresses ponctuelles grâce à des structures spéciales, telles que des tiges creuses ou des stomates situés à la surface des feuilles ou ailleurs (Catford & Jansson, 2014). D'autres ont développé la capacité de résister à l'ensevelissement (Naiman & Décamps, 1997; Gurnell et al., 2012; Vesipa et al., 2017). En anticipant la dynamique sédimentaire, la plupart des espèces riveraines présentent des racines profondes et étendues, ancrant solidement les plantes, résistant ainsi à l'érosion et stabilisant les berges.

Naiman & Décamps, (1997) définissent 4 stratégies que peuvent présenter les espèces riveraines : 1) **Envahisseur**, qui produisent un grand nombre de propagules disséminées par le vent et l'eau qui colonisent les substrats alluviaux ; 2) **Endurant**, qui repoussent après rupture ou enfouissement de la tige ou des racines par les inondations ou après avoir été partiellement mangées ; 3) **Résistant**, qui résistent aux inondations pendant des semaines durant la saison de croissance, aux incendies modérés ou aux épidémies ; 4) **Évitant**, qui s'adapte à des types de perturbations spécifiques, les individus qui germent dans un habitat défavorable ne survivent pas.

II. Le génie végétal

1. Introduction au génie végétal

Les fondements du génie végétal

Idéalement, les systèmes complexes représentés par les zones riveraines devraient être laissés libres d'exercer leur capacité d'érosion et de divagation, tant verticalement qu'horizontalement. Ceci est essentiel pour garantir le bon fonctionnement des hydrosystèmes, préserver leur biodiversité, et maintenir leur efficacité en termes de transport solide (Piégay et al., 2005; Evette et al., 2022). Toute intervention visant à stabiliser les berges doit être réservée aux situations strictement nécessaires pour protéger les biens et les personnes (cas contraire Figure II-1), en dépit de l'éventuel caractère naturel et écologique de la méthode. Par ailleurs, les travaux effectués dans le lit mineur d'un cours d'eau doivent être justifiés et faire l'objet de déclarations et d'autorisations spécifiques conformément au code de l'environnement, et ce en amont de toute intervention.

Dans le cas où l'intervention est jugée nécessaire, le génie végétal se présente comme une technique respectueuse de l'environnement. S'inscrivant pleinement dans une approche de restauration, le génie végétal utilise des parties vivantes de plantes pour stabiliser le sol et prévenir l'érosion de surface (Tuttle et al., 1992). Il peut être utilisé comme alternative au génie civil pour la stabilisation des berges, la protection contre les inondations et le contrôle de l'érosion (Bonin et al., 2013; Rey, 2018). Alors que les techniques « dures » utilisent des matériaux inertes (béton, métal, roche, grillage), l'efficacité des techniques « douces » repose sur les propriétés mécaniques, physiologiques et biologiques des plantes vivantes et sur l'observation et l'imitation de modèles naturels (Rey, 2018). Il existe différentes définitions du génie végétal dans les différents guides et publications disponibles sur le sujet. La plupart s'accordent sur le fait que ce concept exploite les aptitudes et fonctions biologiques, physiologiques et physiques des espèces végétales pour maintenir, améliorer ou recréer des fonctions écologiques naturelles (Lachat, 1991, 1999; Frossard & Evette, 2009; Rey, 2018). On peut ainsi définir le génie végétal comme l'utilisation de plantes vivantes, de parties de celles-ci et de semences afin de résoudre les problèmes de l'ingénieur dans les domaines mécaniques de la protection contre l'érosion, de la stabilisation et de la régénération des sols (Lachat, 1994).



Figure II-1: Érosion naturelle d'une berge, où les enjeux sont limités, débutant dès l'absence de végétation ligneuse sur la berge © Sébastien De Danieli

Les domaines d'application du génie végétal sont vastes et variés, visant la protection des biens et des individus contre l'érosion du sol, et les réhabilitations écologique et paysagère des sites. Il permet ainsi de réaliser des objectifs de revégétalisation, de restauration, de conservation écologique, et intervient dans la lutte contre les espèces envahissantes, voire de protection contre les risques naturels et sonores (Adam et al., 2008; Frossard & Evette, 2009; Bonin et al., 2013; Lavaine, 2013; Evette et al., 2022). Plutôt qu'un but en soi, le génie végétal offre des outils et des solutions techniques pour contrôler l'érosion, que ce soit pour les berges de cours d'eau, les canaux, les rives de plans d'eau (étangs, lacs, etc.), ou même les talus (stabilisation de chemins, ravins, versants, etc.) (Adam et al., 2008).

L'un des principaux objectifs du génie végétal est d'initier une dynamique dépassant les seuils de blocage abiotique ou biotique des successions écologiques (érosion, compétition avec les espèces exotiques envahissantes, etc.) et de réenclencher ce processus de succession écologique (Polster, 2016). Sur la base de la reproduction des modèles naturels, il permet théoriquement de retrouver la trajectoire originelle d'une série dynamique pour recréer un écosystème fonctionnel (Zeh, 2007; Adam et al., 2008; UICN, 2016). L'ingénierie écologique intervient à l'aide des deux premières catégories de la succession, en installant des espèces pionnières, soit des herbacées, mais majoritairement des ligneux à bois tendre. Une succession écologique se met ensuite en place naturellement. À long terme, il est souvent difficile de déceler les ouvrages de génie végétal sur des berges de cours d'eau restaurées. Dans la plupart des cas, les espèces à bois dur ont largement supplanté la végétation initialement implantée. Parfois, en fonction des situations, l'évolution n'aboutit pas nécessairement à des formations à bois dur, mais elle se développe suffisamment pour s'intégrer harmonieusement dans le paysage. Des travaux menés sur des berges de cours d'eau montrent qu'à terme les ouvrages ont des compositions végétales très proches des berges naturelles (Tisserant et al., 2020, 2021). Un ouvrage réussi est un ouvrage qui devient invisible.

L'approche fondamentale du génie végétal consiste à créer des structures vivantes qui répondent à des critères techniques et mécaniques rigoureux en utilisant des matériaux de construction vivants. Les végétaux sont agencés, combinés et fixés de manière spécifique pour former des structures intégrées à la berge ou au talus, inspirées des modèles naturels (Adam et al., 2008). Ces ouvrages, une fois réalisés, se présentent comme des structures organisées, cohérentes et efficaces contre l'érosion, dès leur achèvement. Sur les cours d'eau, cette approche repose sur une étude approfondie des structures végétales et hydrogéomorphologiques naturelles, en amont et en aval des sites d'intérêt, et qui assurent naturellement la stabilisation des berges. En utilisant notamment des outils phytosociologiques, elle se concentre sur des espèces pionnières, comme les salicacées, qui jouent un rôle crucial dans la stabilisation initiale des berges au cours des premières phases successionales. Cette démarche, basée sur une compréhension approfondie des écosystèmes naturels, constitue le socle d'une approche précise et efficace du génie végétal, visant à reproduire les modèles naturels aux bénéfices conjoints de la société et des écosystèmes.

Les cadres réglementaires et expériences en France

Les cadres réglementaires récents tels que la Stratégie européenne sur les infrastructures vertes ou encore l'adoption récente de la loi sur la restauration de la nature par le parlement européen offrent des cadres et législations en faveur de la biodiversité. L'objectif de cette dernière est d'engager des actions de restauration couvrant au moins 20 % des zones terrestres et marines de l'Union Européenne d'ici à 2030 puis d'ici à 2050 et d'étendre ces mesures à tous les écosystèmes dégradés. Cela implique l'utilisation de techniques « douces », telles que le génie végétal, plutôt que des techniques « dures » pour le contrôle des risques naturels. En France, la nomenclature et les procédures facilitées données au génie végétal par le code de l'environnement (rubrique 3.3.5.0 annexée à l'article R. 214-1 du code

de l'environnement) favorisent ces approches par rapport au génie civil. L'Office français de la biodiversité (OFB) est fortement engagé pour la promotion du génie végétal et plus largement du génie écologique et des solutions fondées sur la nature, notamment à travers le [Centre de Ressources Génie écologique](#) ou le [projet Life Artisan](#). Le génie végétal est ainsi encouragé dans de nombreux pays et même à l'échelle européenne, par exemple à travers des projets de recherche appliquée promouvant ces techniques (projet [Géni'Alp](#) ou [Protéger](#) en France, projet [EcoMed](#) à l'échelle européenne), ou à travers des structures regroupant les acteurs du domaine ([AGéBio](#), [l'UPGE](#) ou [l'A-IGEco](#) en France ou [l'EFIB](#) à l'échelle européenne). L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature ([UICN](#)) soutient l'usage de Solutions fondées sur la Nature (SfN), dans lesquelles s'inscrivent les techniques de génie végétal pour la protection contre les risques (Cohen-Shacham et al., 2016; UICN, 2016; Fernandes & Guiomar, 2018; Preti et al., 2022). Ces solutions se définissent par « des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et des avantages pour la biodiversité » (UICN, 2016). Respectueux de l'environnement et plus facilement applicable, le génie végétal trouve toute sa place dans le monde contemporain, en France comme dans le reste du monde.

En France, les techniques de génie végétal et leur efficacité pour le contrôle de l'érosion sont utilisées depuis des siècles et ont fait l'objet de réalisations à grande échelle par les services de « Restauration des Terrains en Montagne » (RTM), depuis 1860. Si ces techniques ont pu être oubliées après-guerre, elles sont désormais maîtrisées par de nombreux bureaux d'études, entreprises et d'autres acteurs du domaine. Forts de leurs expériences et des acquis de la recherche, des guides sur le génie végétal ont été publiés pour promouvoir des bonnes pratiques. Certains se veulent descriptifs sur les techniques existantes (Zeh, 2000, 2007, 2010), d'autres plus précis sur les méthodes de construction (Schiechl & Stern, 1996, 1997; Zeh, 2007) et d'autres fournissent des éléments stratégiques, diagnostics et opérationnels (Lachat, 1994; Gray & Sotir, 1996; Norris et al., 2008; Adam et al., 2008; Bonin et al., 2013, Didier et al., 2023).

Les apports du génie végétal

Le génie végétal est souvent présenté comme une alternative plus respectueuse de l'environnement comparé aux méthodes traditionnelles du génie civil. En exploitant des matériaux vivants et la capacité inhérente des plantes à s'adapter à leur environnement, il présente des avantages significatifs par rapport aux ouvrages de génie civil conventionnels, souvent considérés comme inertes.

D'un point de vue technique, son principal atout réside dans une durabilité accrue et une efficacité croissante avec le temps, en contraste avec les structures du génie civil telles que les enrochements, les maçonneries et le béton, qui perdent progressivement de leur efficacité (Pinto et al., 2016; Bigham, 2020). Malgré une possible fragilité initiale durant les 2 à 4 premières années, une fois que la végétation, en particulier les plantes ligneuses, s'est solidement établie, les ouvrages de génie végétal offrent une protection durable contre l'érosion (Figure II-2) (Frossard & Evette, 2009; Leblois et al., 2016; Peeters et al., 2018). Ces ouvrages peuvent même rivaliser, voire surpasser, certaines techniques de génie civil conventionnelles en termes de résistance aux forces d'arrachement, sous réserve d'un entretien adéquat pendant les premières années après leur création (Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1997; Leblois et al., 2022). Non seulement plus économes sur le plan financier et carbone (von der Thannen et al., 2020), les ouvrages sont également souples, présentant des capacités d'adaptation

et de régénération. La diversité des techniques existantes permet d'adapter les aménagements en fonction du contexte, des contraintes et des objectifs d'aménagement (Bonin et al., 2013).



Figure II-2: Ouvrage de génie végétal à La Motte de Galaure (26) avant sa construction et à son achèvement en 1992 puis en 2000 ©CFPF

Les ouvrages de génie végétal offrent des avantages environnementaux et sociaux substantiels. Ils protègent les biens et les personnes en limitant l'érosion des berges (Frossard & Evette, 2009) tout en contribuant à atténuer les impacts des changements globaux par le stockage du carbone et la création d'îlots de fraîcheur (Symmank et al., 2020). Grâce au développement de la végétation, ces ouvrages influent positivement sur la qualité de l'eau en filtrant la pollution, en augmentant l'ombrage et en réduisant la température de l'eau, tout en accroissant la concentration en oxygène (Symmank et al., 2020). Le génie végétal exerce une action bénéfique certaine sur l'environnement et la biodiversité (voir Evette et al., 2022) en diversifiant les habitats propices à de nombreuses espèces animales (Janssen et al., 2019). Le bois mort issu des ripisylves crée des habitats dans les cours d'eau, favorisant la vie aquatique (Verdonschot & Verdonschot, 2024). Ces techniques visent à restaurer une biodiversité similaire à celle des berges naturelles, rétablissant la continuité écologique (Martin et al., 2021; Boncourt et al., in rev), soutenant les espèces en danger et contrôlant les espèces exotiques envahissantes (Dommanget et al., 2019; Popoff et al., 2021). Enfin, contrairement au génie civil, le génie végétal s'intègre harmonieusement au paysage des berges de cours d'eau, contribuant ainsi à la santé humaine (Laille et al., 2013).

Bien que les inconvénients associés au génie végétal demeurent relativement limités et surmontables, certaines contraintes spécifiques doivent être prises en considération. La première réside dans la nécessité d'un entretien durant les premières années de l'ouvrage, ce dernier requérant une attention particulière quant au développement de la végétation, ajoutant une dimension temporelle au processus global. Par ailleurs, les techniques basées sur le végétal demeurent exigeantes, de leur conception à leur mise en place, impliquant un effort particulier de savoir-faire et de rigueur de la part des concepteurs jusqu'aux entreprises en charge de la mise en place. Enfin, la période restreinte

pendant laquelle la création d'un ouvrage peut être entreprise (hors période de végétation en général) peut entraîner des contraintes de calendrier que l'on rencontre moins dans des projets de génie civil traditionnel. Ces défis, bien que présents, sont souvent surmontables grâce à une planification minutieuse et à une gestion appropriée de chaque phase du projet.

Les différentes techniques de génie végétal

Le génie végétal se compose d'une palette de techniques, présentant des avantages et limites spécifiques. Leur choix dépendra des objectifs de restauration, des conditions locales. On peut notamment citer parmi les plus utilisées, les **fascines de ligneux** ou **d'hélophytes**, assemblages de branches ou mottes fixées dans le sol ou dans un boudin de géotextile pour stabiliser les berges et favoriser la colonisation végétale ; les **tressages**, qui consistent à entrelacer, autour de pieux, des branches flexibles pour former des structures solides ; les **peignes**, amas de branches et ramilles enchevêtrées en mélange avec des matériaux gravelo-terreux ; les **lits de plants et de plançons**, qui s'apparentent à différents niveaux parallèles de plants racinés et de longues boutures placés côte à côte au sein de saignées longitudinales créées dans un talus ; les **couches de branches à rejets**, qui consistent en l'application et la fixation au sol de branches formant une couverture susceptible de reprise et de croissance immédiate ; les **caissons végétalisés**, structure en rondins de bois, remplie de terre et comprenant des végétaux vivants (Figure II-3); ainsi que les **treillages bois**, quadrillage superficiel en rondins fait pour retenir le sol sur les fortes pentes, puis végétalisé. On distingue également **l'ensemencement** ; les **plantations de ligneux** ou **d'hélophytes** ainsi que les **boutures**. Il existe en fait une multitude de techniques (voir par exemple Schiechl & Stern (1997) ou Zeh (2007)) que l'on peut combiner judicieusement pour restaurer les écosystèmes riverains de manière efficace et durable.

Lorsque nécessaire, ces techniques peuvent être associées à des techniques de génie civil pour former des techniques mixtes. Cette approche vise à combiner les avantages des matériaux inertes, avec la capacité des végétaux à renforcer la protection contre l'érosion sur le long terme et à restaurer la biodiversité et les services écosystémiques associés. Les ouvrages mixtes visent à exploiter au mieux les caractéristiques de chaque approche pour aboutir à des solutions plus robustes et mieux intégrées à leur environnement.

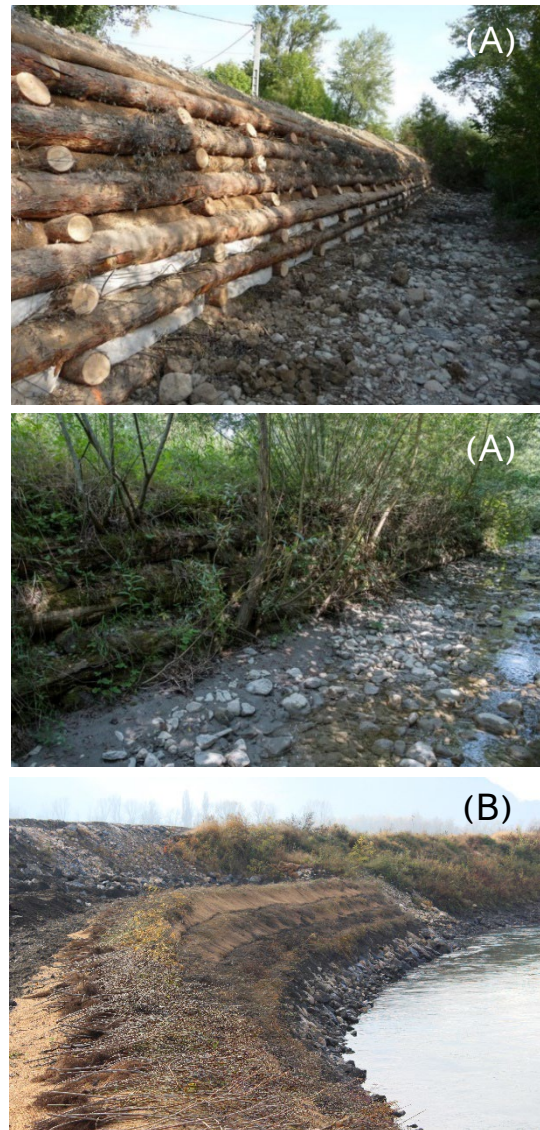


Figure II-3: (A) Ouvrage de génie végétal de type caisson en rondins végétalisés, sur le Lavanchon (38), à son achèvement en 2009 puis en 2019 ©André Evette, Sébastien de Danieli ; (B) Lits de plants et plançons sur l'Isère © Solange Leblois

Tableau 1: Tableau synthétique des traits biotechniques recherchés et leurs fonctions associées pour les espèces utilisées en génie végétal en berges de rivière, modifié d'après Clark & Hellin, (1996) et Evette, (2017)

	Fonctions	Traits	Références
Exploitable des caractéristiques pour le génie végétal	<i>Facilité d'utilisation</i>	Capacités de multiplication végétative	Gray & Sotir, 1996; Venti et al., 2003; Norris et al., 2008
		Facilité de culture et de germination	Clark & Hellin, 1996
		Disponibilité du matériel végétal (graines, plants ou matériel végétatif) en quantité suffisante	Clark & Hellin, 1996
	<i>Protéger la surface du sol</i>	Croissance rapide des parties souterraines et aériennes	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996; Venti et al., 2003; Norris et al., 2008
		Souplesse et densité des parties aériennes, à forte capacité de recouvrement constituant un effet « tapis »	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996
		Développement du système souterrain avec des racines/rhizomes denses, résistants, couvrants formant un matelas fibreux	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996; Schiechl & Stern, 1996; Norris et al., 2008
		Capacité à produire des racines flottantes sous l'eau pour protéger le pied de berge	Schiechl & Stern, 1996
	<i>Renforcer la cohésion du sol</i>	Rapport des biomasses aériennes sur souterraines en faveur des racines/rhizomes	Gray & Sotir, 1996
		Développement du système racinaire (dense et profond) avec des racines résistantes et dispersées/réparties	Schiechl & Stern, 1996; Norris et al., 2008
	<i>Ralentir la vitesse de l'eau</i>	Résistance des tiges, nombreuses et souples	Clark & Hellin, 1996
		Capacité à produire des racines flottantes sous l'eau pour protéger le pied de berge	Schiechl & Stern, 1996
	<i>Assécher le sol</i>	Capacités élevées d'évapotranspiration (grandes surfaces foliaires)	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996
	<i>Éviter la turbulence</i>	Souplesse des espèces herbacées et arbustives de faible diamètre	Evette, 2017
<i>Améliorer les conditions microclimatiques et la qualité du sol pour préparer la succession</i>	Capacité à produire de l'ombrage, à améliorer les conditions d'humidité, à produire une forte biomasse, une litière importante ou à fixer l'azote	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996; Schiechl & Stern, 1996	

Tableau 1 (suite): Tableau synthétique des traits biotechniques recherchés et leurs fonctions associées pour les espèces utilisées en génie végétal en berges de rivière, modifié d'après Clark & Hellin, (1996) et Evette, (2017)

Tolérance et résistance	<i>Récupérer ses fonctions après les crues</i>	Résistance des tiges, nombreuses et souples (ralentissement du courant, effet tapis)	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996
	<i>Résilience aux crues</i>	Capacité à se régénérer après perturbations (résilience)	Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996
		Tolérance aux crues périodiques, à la fréquence et la durée de la submersion	Schiechtl & Stern, 1996
		Tolérance à l'ensevelissement par les sédiments, à la perte de sol	Schiechtl & Stern, 1996
	<i>Coloniser des substrats bruts, pauvres en nutriments</i>	Stratégie pionnière adaptée aux milieux alluviaux	Clark & Hellin, 1996; Schiechtl & Stern, 1996; Norris et al., 2008
	<i>Résister à la sécheresse (haut de talus en milieu sec)</i>	Faible rapport des biomasses aériennes sur souterraines	Wilson, 1988
Efficacité photosynthétique et de l'utilisation de l'eau (faible Surface foliaire spécifique : SFS ou SLA en anglais)		Crawley, 1997	
Adaptabilité	<i>Nécessiter peu d'entretien après plantation</i>	Rusticité et adaptabilité du matériel végétal utilisé	Venti et al., 2003
	<i>S'adapté aux conditions stationnelles</i>	Indigénat, amplitude écologique large du matériel végétal utilisé	Venti et al., 2003; Adam et al., 2008
Perception	<i>Être socialement acceptée</i>	Aptitude à fournir des services écosystémiques (fruitiers, paysagers, mellifères ...)	Evette, 2017

2. Les traits biotechniques recherchés pour le génie végétal

Sur les berges de rivière, le choix des espèces pour le génie végétal revêt une importance capitale, devant non seulement garantir une protection efficace du sol, mais aussi s'adapter aux contraintes spécifiques des cours d'eau, telles que l'humidité, l'immersion, et les perturbations liées aux crues (érosion, au dépôt, etc.). Un certain nombre de caractéristiques biologiques sont requises pour que les espèces contribuent efficacement à la tenue des ouvrages et répondent à des fonctions précises, on peut dès lors parler de traits biotechniques (Clark & Hellin, 1996; Gray & Sotir, 1996; Schiechl & Stern, 1996; Venti et al., 2003; Norris et al., 2008; Evette, 2017).

Les traits biotechniques recherchés pour le génie végétal ont été synthétisés dans le Tableau 1, offrant ainsi une ressource complète aux praticiens du domaine. Cette référence facilite la sélection avisée des espèces en fonction des objectifs spécifiques et des conditions environnementales présentes le long des berges de rivières. Concrètement, pour répondre aux exigences du génie végétal, les espèces doivent, en plus de s'adapter aux contraintes hydrauliques et mécaniques pour leur survie, être pionnières, à croissance rapide, et dotées de capacités de multiplication végétative significatives. Ces caractéristiques garantissent la facilité d'utilisation, ainsi que la protection rapide de la surface du sol et le renforcement de la cohésion du sol. Il est également préférable que le rapport entre les biomasses aériennes et souterraines favorise les racines, assurant ainsi le renforcement de la cohésion du sol en association avec un système racinaire développé, comprenant des racines denses, profondes et résistantes. Les tiges aériennes doivent être souples et nombreuses, offrant à la fois un effet de ralentissement de la vitesse de l'eau et une résistance aux crues.

III. Introduction au bouturage

1. Le bouturage comme technique d'aménagement et de protection des berges

Fondements et applications

Du Latin *bouter* signifiant « pousse », le terme bouturage fait référence au processus de multiplication végétative qui vise à la création d'une nouvelle plante à partir d'un fragment végétal existant (Hartmann & Kester, 2011). Le bouturage est ainsi un mode de reproduction asexuée permettant de générer un nouvel individu (Venti et al., 2003; Heller et al., 2006). Il s'opère par exemple spontanément le long des cours d'eau, couloirs d'avalanche ou éboulis via les transferts hydrique, nival ou gravitaire de fragments végétaux naturellement ensevelis à leur dépôt. De nombreuses espèces disposant de cette aptitude ont ainsi bénéficié de cet avantage évolutif dans les environnements perturbés précités.

Au-delà de cette aptitude, le bouturage est également une technique agricole ancienne consistant à prélever une partie végétative d'un individu possédant des bourgeons latéraux, terminaux ou même dépourvue de bourgeons : segment que l'on appelle bouture (Hartmann & Kester, 2011). En utilisant des parties de végétaux existants, comme des segments de tiges, de racines ou de bourgeons, le bouturage permet de produire rapidement des individus génétiquement identiques aux plantes parentales. La mise en œuvre de cette technique est le plus ancien mode de propagation et de revégétalisation. Rapide et économique, c'est également aujourd'hui la technique de génie végétal la

plus simple à mettre en place (Schiechl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechl & Stern, 1996, 1997; Venti et al., 2003; Adam et al., 2008).

Le bouturage trouve principalement son application dans la stabilisation des berges de rivières, de lacs, mais aussi sur les talus et pentes faibles, ainsi que les interstices des murs et gabions (Venti et al., 2003). Par son processus de régénération, le bouturage se révèle naturellement bien adapté au comblement des niches écologiques disponibles et à la lutte contre l'érosion, particulièrement au niveau des berges pour faire face aux forces d'arrachement de l'eau, aussi appelées contrainte tractrice (Adam et al., 2008). Basée sur les propriétés du vivant, c'est le réseau racinaire et la biomasse aérienne qui, se développant avec le temps, augmentent la capacité de résistance de la berge. En se déployant, le réseau racinaire de la bouture va créer un support mécanique en profondeur pour le sol et consolide/stabilise la berge/le talus (Gray & Sotir, 1996; Florineth & Molon, 2005). La bouture a également une action de drainage, en laissant s'infiltrer et en évapotranspirant l'eau de ruissellement, qui pourrait amener à des mouvements de terrain (Gray & Sotir, 1996; Adam et al., 2008). La biomasse aérienne, quant à elle, protège les sols en ralentissant le courant (effet peigne) et en se couchant sur eux lors des crues, formant ainsi une couche protectrice contre les eaux (effet tapis) (Donat, 1995; Adam et al., 2008). De plus, elle contribue à la renaturation du paysage, à la réduction de la prolifération des espèces exotiques envahissantes, et à la création d'habitats pour la faune, favorisant la connectivité des écosystèmes (Adam et al., 2008; Bonin et al., 2013). Bien que fragile à l'installation, la tenue de la bouture se renforce avec le temps et peut présenter une résistance à l'arrachement allant jusqu'à 165 N/m² après 3 ou 4 ans (Tableau 2). Même si cette résistance est moindre que celle offerte par des ouvrages comme les fascines de ligneux (Didier et al., 2023), elle est souvent suffisante pour stabiliser le haut de berge. À noter qu'à l'installation, l'efficacité du bouturage sera nettement améliorée s'il est associé à un géotextile biodégradable tissé, type treillis de coco, ainsi qu'à un ensemencement réalisé avec un mélange grainier de qualité. Dans ces mêmes conditions, il pourra également être associé à une protection de pied de berge, de type fascine ou tressage.

Tableau 2: Contrainte tractrice supportée par les boutures, extrait de Bonin et al., 2013

Contrainte tractrice (N/m²)		
<i>À la réalisation</i>	<i>1 à 2 ans après</i>	<i>3 à 4 ans après</i>
10 ²	60 ² -150 ¹	60 ² -165 ¹

¹ Faber, 2004

² Venti et al., 2003

Atouts et bénéfices du bouturage pour les projets de génie végétal

En tant que technique traditionnelle du génie végétal, le bouturage, à l'instar des autres techniques, offre une myriade d'avantages et d'intérêts pour les projets visant la restauration et la conservation des écosystèmes. Outre les avantages associés au génie végétal en général, l'un des principaux avantages réside dans sa capacité à reproduire fidèlement les caractéristiques génétiques et adaptatives des plantes parentales, garantissant ainsi la préservation des traits biologiques (caractéristiques biologiques des espèces) adaptés au milieu. La sélection des espèces dépendra ainsi de leurs propriétés à constituer certaines structures végétales (aérienne ou racinaire), de fixation du sol, de tolérance aux conditions environnementales, de capacité à atténuer l'érosion des sols ou encore de fournir des habitats propices à la faune locale.

Le bouturage présente également l'avantage d'une mise en place rapide et économique (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Venti et al., 2003). Elle demande peu de moyens techniques ou financiers, le matériel végétal étant facile à se procurer (Lachat, 1994; Venti et al., 2003; Zeh, 2007, 2010). Son efficacité ne cesse de croître avec les végétaux. Avec les lits de plants et plançons, c'est la technique qui offre la croissance la plus importante de toutes les techniques stabilisantes et l'effet le plus pénétrant, la bouture étant directement enterrée dans le sol et poussant dans un substrat peu remanié (Schiechtl, 1980).

Le bouturage en tant que pierre angulaire du génie végétal

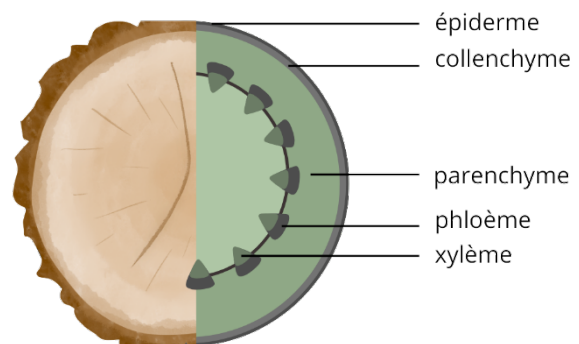
La polyvalence du concept de bouturage est à la base d'une diversité de techniques fondamentales en génie végétal, parmi lesquelles figurent les lits de plants et plançons, les fascines vivantes, les couches de branches à rejet et bien d'autres encore. Ces méthodes capitalisent sur l'idée du bouturage comme aptitude, impliquant l'utilisation de parties végétales végétatives existantes pour engendrer de nouvelles générations de végétaux. Cette méthode concerne également des éléments annexes aux ouvrages de génie végétal ou des éléments constitutifs tels que les branches anti-affouillement ou les pieux vivants (Adam et al., 2008). Ces applications variées du bouturage reflètent sa centralité dans la création de solutions durables pour la gestion et la restauration des écosystèmes fluviaux et côtiers, confirmant ainsi son statut en tant que pierre angulaire essentielle du génie végétal.

Sensu stricto, le terme bouturage fait également référence à une technique de génie végétal à part entière. Les boutures sont ainsi généralement implantées en milieu ou haut de berge au-dessus d'une structure de pied de berge, souvent une fascine, un tressage voire un enrochement (Lachat, 1994). La technique de bouturage est ainsi souvent utilisée en association avec d'autres techniques (génie civil ou génie végétal de préférence) sur le reste de la berge afin de prolonger la durée de vie des ouvrages et d'améliorer la stabilisation (Venti et al., 2003; Adam et al., 2008).

Focus sur le processus en jeu...

Les boutures sont obtenues par le prélèvement de fragments de plantes-mères, qui correspond à une fraction généralement de tige (plus rarement de racine ou de feuille). L'objectif principal de la bouture suite à sa coupe est de développer dans une première phase des racines adventives. Deux principes stimulants peuvent contribuer à la formation de racines adventives sur la bouture: la blessure au niveau du site de coupe et l'isolement physique par rapport aux ressources et au réseau de signalisation de la plante mère. La privation du système racinaire interrompt l'apport d'eau, de nutriments et d'hormones végétales telles que les cytokinines provenant des racines. Cet arrêt conduit simultanément à l'accumulation au-dessus du site de coupe de substances habituellement transportées vers le bas de la plante, telles que les auxines. Les auxines représentent des hormones végétales clés dans le processus de bouturage, puisqu'elles constituent des régulateurs de croissance, favorisant la division cellulaire, la croissance des tiges et des racines (Druege et al., 2019).

En réponse à la coupe, un nouveau programme de développement est initié, conduisant finalement à la régénération d'un nouveau système racinaire. La réaction à la coupe débute au niveau de la blessure. Les cellules extérieures blessées meurent et une plaque nécrotique se forme. La plaie est ainsi scellée par une matière ligneuse, appelée subérine, et le xylème peut se boucher avec de la gomme (Hartmann & Kester, 2011). Cette plaque protège les surfaces coupées de la dessiccation et des agents pathogènes. Les cellules vivantes situées derrière cette plaque commencent à se diviser après quelques jours pour former une masse de tissu indifférencié appelée cal. Le cal contient des cellules méristématiques présentes naturellement au niveau des bourgeons et parfois le long de la tige, comme c'est le cas pour les saules. Placées dans un milieu approprié et sous l'effet des auxines, les cellules méristématiques situées à proximité du cambium vasculaire et du phloème commencent à se diviser et à former des racines adventives *de novo*. La formation de racines initiales s'effectue à partir de certaines cellules proches des faisceaux vasculaires ou du tissu vasculaire pour assurer la continuité vasculaire. Si l'espèce ne possède pas de cellules méristématiques le long de la tige, ce sont les cellules du phloème ou du parenchyme, également présentes le long de la tige, qui peuvent se différencier afin de créer un nouveau point de croissance méristématique. La formation des racines adventives représente la condition indispensable à la réussite de la propagation par bouturage.



Structure simplifiée d'une coupe transversale de tige

Ultérieurement, les initiales racinaires¹ ainsi formées, se développent en primordia racinaires² organisés qui vont croître et émerger vers l'extérieur à travers d'autres tissus de la tige (Hartmann & Kester, 2011). Chez certains genres, réputés comme faciles à bouturer comme les saules (du genre *Salix*), l'hortensia (*Hydrangea*) ou encore les peupliers (*Populus*) entre autres, les initiales racinaires sont présentes naturellement à l'état latent. Les initiales racinaires préformées ou latentes restent généralement dormantes jusqu'à ce que les tiges soient coupées et placées dans des conditions environnementales favorables au développement et à l'émergence des primordia en tant que racines adventives. De plus, les boutures de saule contiennent des taux élevés de phytohormones, telles que les auxines qui régulent la croissance, ce qui favorise la rhizogenèse, le processus de formation des racines. La durée nécessaire au développement des racines initiales après la plantation des boutures est très variable.

Une fois que les racines adventives commencent à se former, elles s'allongent et se développent, permettant à la bouture de s'établir dans le sol ou le substrat. Les racines absorbent l'eau et les nutriments nécessaires à la croissance de la nouvelle plante. Les bourgeons dormants présents sur la bouture peuvent se développer et donner naissance à de nouvelles pousses une fois que les racines sont bien établies, favorisant la croissance et la ramification de la plante. Les boutures s'adaptent ensuite rapidement à leur environnement, en établissant des connexions avec le sol et en développant des racines plus robustes.

¹ Formations cellulaires différenciées à l'origine des racines, elles correspondent aux méristèmes racinaires

² Ébauches d'organes racinaires

2. Les espèces utilisées en Europe pour le bouturage et leurs caractéristiques

La sélection judicieuse des espèces végétales revêt une importance cruciale pour le succès des projets de restauration écologique et de stabilisation des sols. Un choix inapproprié des essences peut être à l'origine d'échecs notoires dans les ouvrages (Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; Leblois et al., 2016). Dans le cadre du génie végétal, qui s'inscrit dans une approche inspirée des modèles naturels (voir partie II), la préférence va aux espèces indigènes, naturellement adaptées aux conditions stationnelles existantes et aptes à répondre aux objectifs de restauration. Pour les projets d'ingénierie écologique, notamment de bouturage, l'accent est mis sur des espèces naturellement présentes, en privilégiant spécifiquement celles qui sont structurantes et qui présentent les traits biotechniques recherchés (Tableau 1).

Les principaux genres d'espèces ligneuses utilisées en bouturage et leur utilisation

L'ensemble des critères et contraintes locales permettent d'établir une liste d'espèces utilisables dans le cadre du génie végétal, dont l'utilisation dépend étroitement de leurs exigences écologiques et de leurs répartitions géographiques. Parmi ces espèces, on observe une nette prédominance du genre *Salix* (Figure III-1). Les saules sont couramment employés dans les techniques de génie végétal déployées pour stabiliser les berges de cours d'eau, lacs, étangs et canaux en raison de leurs caractéristiques écologiques particulièrement adaptées aux milieux alluviaux (Kuzovkina-Eishen, 2003; Kuzovkina & Quigley, 2005; Norris et al., 2008; Kuzovkina & Volk, 2009; Frossard & Evette, 2009). En l'Europe de l'Ouest, ce ne sont pas moins de 23 espèces de saules qui peuvent être utilisées pour le génie végétal, bien que certaines espèces soient plus fréquentes et plus répandues que d'autres (Evette et al., 2012). Ces espèces offrent une diversité remarquable, couvrant une large gamme de conditions écologiques. Répondant aux traits biotechniques recherchés et aux contraintes écologiques spécifiques, elles ont prouvé leur efficacité dans le domaine du génie végétal et sont aujourd'hui largement utilisées. La variété des espèces disponibles permet d'adapter le choix des végétaux à des contextes divers, garantissant ainsi des solutions robustes et durables dans les projets de restauration et de stabilisation des écosystèmes aquatiques et terrestres.



Figure III-1: Saules développés issus d'un ouvrage de génie végétal © André Evette

Le recours à des espèces naturellement inféodées à des environnements humides, comme les saules, peut poser problème dans des régions où les contraintes de xéricité sont plus fortes pendant la saison de croissance (Evette et al., 2012). En effet, les saules, en tant que phréatophytes³ obligatoires,

³ Plante dont le développement est dépendant de la présence d'une nappe phréatique ou la frange capillaire au-dessus de la zone phréatique via un système racinaire profond

présentent généralement une moindre résistance à la sécheresse par rapport à d'autres espèces telles que les tamaris, considérées comme des espèces phréatophytes facultatives qui peuvent puiser l'eau dans d'autres compartiments (Amlin & Rood, 2002; Niinemets & Valladares, 2006). Aussi paradoxal que cela puisse paraître, les berges de cours d'eau peuvent connaître une période de sécheresse, notamment pendant la période estivale et en fonction de la granulométrie, plus ou moins grossière, qui les compose. Les espèces peuvent ainsi être plus exposées à la dessiccation du fait des précipitations plus faibles en été. La sécheresse est même considérée comme l'une des principales contraintes lors de la réalisation d'ouvrages en génie végétal, car les jeunes plants y sont plus vulnérables que les individus matures (Pezeshki et al., 2007). Par conséquent, l'utilisation d'espèces adaptées à des substrats ou sols humides, tels que les saules et les espèces associées, peut conduire à un échec de réalisation dans les régions soumises à une forte sécheresse pendant la période de croissance, par exemple dans le bassin méditerranéen ; contrainte augmentant avec le changement climatique (Evette et al., 2012). Le changement climatique mène également à l'augmentation significative du nombre de cours d'eau qui changent de régime hydrologique devenant intermittents, y compris dans le nord de la France (Sauquet et al., 2021; Tramblay et al., 2021). Dans ce contexte, il est crucial d'ajuster la technique employée et de sélectionner judicieusement les espèces à utiliser. Ces espèces doivent non seulement partager les caractéristiques biotechniques essentielles aux opérations de génie végétal, mais aussi démontrer une adaptabilité accrue à des conditions de sécheresse. Dans certains cas on pourra par exemple privilégier des espèces de la famille des Tamaricacées, telles que *Tamarix gallica* ou *Myricaria germanica* ou d'autres espèces présentant une résistance élevée à la sécheresse, afin de renforcer la résilience des écosystèmes en réduisant leur dépendance à l'eau (Figure III-2). Cette approche proactive contribuerait à assurer la durabilité des forêts riveraines et à maintenir tout ou partie de leurs fonctions écologiques.



Figure III-2: *Myricaria germanica* et *Tamarix gallica* de la famille des Tamaricacées © André Evette

Les caractéristiques détaillées des espèces essentielles pour le bouturage en Europe sont consignées de manière synthétique dans le Tableau 3. Dans la suite de cette section, nous nous pencherons plus particulièrement sur les familles modèles pour le bouturage, à savoir les *Salicacées* et les *Tamaricacées*. Pour une référence plus approfondie, chaque espèce est accompagnée d'une fiche technique détaillée en partie III.3. Ces fiches, organisées par espèce, fournissent des informations exhaustives sur la distribution géographique, l'écologie spécifique, les méthodes de détermination et des détails pertinents sur leur utilisation dans le contexte du génie végétal. Cette ressource complète permet d'orienter efficacement le choix des espèces en fonction des exigences spécifiques du projet, contribuant ainsi à la réussite des initiatives de restauration écologique et de stabilisation des sols.

Tableau 3: Propriétés et utilisation des espèces les plus courantes en génie végétal, adapté de Bonin et al., (2013). Les cases grisées correspondent à l'absence d'informations dans la littérature.

Espèce	Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ⁴	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
					Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
					Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
<i>Myricaria germanica</i> (L.) Desv	50-80	4	Faible	Tolérante	a	x	a	x	a	a	a	a	Niinemets & Valladares, 2006; Bonin et al., 2013; Lavaine, 2013; Lavaine et al., 2015
<i>Populus nigra</i> L.	70-100	0,4	Rapide	Modérément tolérante	c	c	b	b	b	b	b	b	Schiechtl, 1973; Venti et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Arizpe et al., 2008; Lavaine, 2013; Tison & De Foucault, 2014
<i>Salix alba</i> L.	> 70	0,5	Elevée	Tolérante	c	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009
<i>Salix appendiculata</i> Vill.	Faible	1,7	Rapide	Tolérante	d	e	d	✓	d	✓	d	✓	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013
<i>Salix atrocinerea</i> Brot.	Cf. <i>Salix cinerea</i>		Faible	Très intolérante	x	x	x	x	x	✓	x	✓	Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009
<i>Salix aurita</i> L.	40-70		Moyenne	Très intolérante	x	x	x	x	d	✓	d	✓	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

⁴ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

<i>Salix caesia</i> Vill.	> 50, jusqu'à 96 pour Rousset et al., in prep.		Lente		x	x	x	x	✓	f	✓	f	Schiechtl, 1973; Bonin et al., 2013; Rousset et al., in prep
<i>Salix cinerea</i> L.	> 70, sauf exception		Faible	Très intolérante	x	x	x	x	x	✓	x	✓	Schiechtl, 1973; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Sauli et al., 2006; Evette et al., 2009
<i>Salix daphnoides</i> Vill.	> 90		Rapide Particulièrement en juvénile	Modérément Tolérante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Graf et al., 2003; Venti et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013
<i>Salix eleagnos</i> Scop.	70-90	1,8	Faible sauf en juvénile	Modérément Tolérante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; C. Graf et al., 2003; Venti et al., 2003; Sauli et al., 2006; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013
<i>Salix foetida</i> Schleich. ex DC	> 50, jusqu'à 96 pour Rousset et al., in prep.		Lente	Intolérante	x	x	a	x	✓	f	a	f	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; Niinemets & Valladares, 2006; Bonin et al., 2013; Rousset et al., in prep
<i>Salix x fragilis</i> L.	> 95		Elevée	Modérément tolérante	x	c	✓	g	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; Graf et al., 2003; Evette et al., 2009
<i>Salix hastata</i> L.	> 60		Elevée	Modérément tolérante	✓	a	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973, 1980; Bonin et al., 2013; Rousset et al., in prep
<i>Salix myrsinifolia</i> Salisb.	70-90	1,8	Elevée	Intolérante	✓	x	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973, 1980; Zuffi, 1989; Venti et al., 2003; Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013
<i>Salix pentandra</i> L.	70-90		Moyenne sauf en juvénile	Très intolérante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

<i>Salix purpurea</i> L.	> 90	1,5	Faible sauf en juvénile	Modérément tolérante	✓	x	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973; Zuffi, 1989; Venti et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013
<i>Salix triandra</i> L.	70-90	0,4	Elevée	Intolérante	h	x	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973, 1980; Sauli et al., 2006; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013
<i>Salix viminalis</i> L.	90-100	2,2	Très élevée	Très intolérante	✓	a	✓	a	✓	✓	✓	✓	Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009
<i>Tamarix gallica</i> L.	80-100	3	Elevée particulièrement en juvénile	Très tolérante	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	Arizpe et al., 2008; Lavaine, 2013; Lavaine et al., 2015

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

b : espèce adaptée, mais utilisation en quantité limitée pour éviter de fermer le milieu et de préférence en haut de berge

c : espèce adaptée, sous la forme de pieux morts et en pied de berge uniquement

d : espèce avec un taux de reprise faible, à utiliser en mélange avec d'autres espèces et en garantissant des conditions optimales de reprise

e : espèce adaptée pour une utilisation sous la forme de pieux morts, sous réserve de trouver des branches de taille suffisante

f : espèce adaptée, sous réserve de disponibilité en pépinière

g : espèce adaptée, relativement fragile à la mise en place

h : espèce aux rameaux fragiles et tortueux peu favorables au tressage qui nécessite l'association avec d'autres espèces

De manière plus marginale au sein des ouvrages de génie végétal, on peut également trouver des boutures de *Ligustrum vulgare* (Troène), *Alnus incana* (Aulne blanc), *Berberis vulgaris* (Épine-vinette), *Alnus alnobetula* (Aulne vert), entre autres. Bien que ces espèces soient capables de multiplication végétative, elles présentent des taux de reprise nettement inférieurs à ceux observés pour les genres *Salix* ou *Populus*. Selon la littérature, ces taux varieraient de 65% pour le Troène à moins de 8% pour l'Aulne vert, rendant leur utilisation sous la forme de bouture relativement aléatoire. Les détails des espèces et leurs caractéristiques sont décrits dans le *Tableau 4*.

Certaines espèces présentent des contraintes significatives à leur utilisation, en particulier en raison des invasions biologiques qui les menacent à l'échelle nationale. Un exemple concret concerne le frêne commun (*Fraxinus excelsior*) et le frêne oxyphylle (*Fraxinus angustifolia*), actuellement sous la menace de la chalarose. Cette maladie foliaire, causée par le champignon *Hymenoscyphus fraxinus*, a entraîné une mortalité importante chez les frênes ces dernières décennies, provoquant un dépérissement massif (Husson et al., 2016). Cet exemple souligne la nécessité d'évaluer attentivement les risques associés, qu'ils soient biotiques ou abiotiques, à chaque espèce considérée avant son utilisation. Intégrer une analyse approfondie des risques dans le processus de sélection des espèces devient ainsi impératif pour garantir le succès et la durabilité des projets de génie végétal. Une approche préventive, axée sur la préférence pour des espèces résilientes et moins susceptibles aux menaces, contribue à minimiser les risques potentiels liés à l'utilisation de certaines essences, renforçant ainsi la robustesse globale des interventions en génie végétal.

D'un autre côté, les changements globaux en cours prévoient une augmentation significative des sécheresses estivales dans les décennies à venir, impactant non seulement la région méditerranéenne, mais également la plupart des régions intérieures des latitudes moyennes (Giorgi & Lionello, 2008; IPCC, 2022, 2023). Ces bouleversements à l'échelle mondiale auront un impact majeur sur les caractéristiques hydrologiques des milieux fluviaux, entraînant une augmentation anticipée de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse dans certaines régions, conséquence d'une hausse des précipitations, de l'évapotranspiration et des débits moyens des cours d'eau. Par conséquent, les sécheresses estivales devraient devenir plus fréquentes dans de nombreuses régions, soulignant ainsi la nécessité de repenser les approches en génie végétal pour faire face à des conditions environnementales de plus en plus arides. L'utilisation d'espèces méditerranéennes à des fins de résistance à la sécheresse dans des zones où elles ne sont pas naturellement présentes n'est pas souhaitable, car cela rompt avec le principe d'indigénat privilégié dans le génie végétal. Il semble plus judicieux de capitaliser sur la variabilité intraspécifique des espèces indigènes et sur leur résilience. L'objectif est donc de créer des individus « rustiques », suffisamment robustes et prédisposés à mieux résister à la sécheresse. Dans cette optique, les plants mères, dont proviennent les boutures, se développent dans des conditions édaphiques difficiles, avec un arrosage minimal. Les individus résultants vont présenter des caractéristiques d'adaptation avec des racines pré-adaptées. Cette méthode favorise la sélection naturelle des individus les mieux adaptés aux conditions locales, renforçant ainsi la résilience des végétaux et optimisant leur capacité à prospérer dans des environnements xériques. On raisonne ainsi en termes de population et non seulement d'espèces.

Tableau 4: Synthèse des espèces ligneuses utilisées pour le bouturage de manière plus marginale et leurs caractéristiques

<i>Espèce</i>	Taux de reprise (%)	Rapport entre volume du système racinaire et de la partie aérienne	Hauteur maximale (m)	Références
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	96 ***	1,1	40	a, c, e, f, g, h
<i>Hippophae rhamnoides</i> L.	95 **	1	5	b, e, f, g, h, i
<i>Ligustrum vulgare</i> L.	65	1,2	2	d, e, f, h
<i>Laburnum alpinum</i> (Mill.) Bercht. Et J. Presl	70-100		7	d, e, f, g, h
50				
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	25 *		20	a, b, c, d, g, h
<i>Berberis vulgaris</i> L.	10-12 *	0,6	3	a, e, f, g, h
<i>Alnus alnobetula</i> (Ehrh.) K.Koch	8-10	1,6	4	b, c, e, f, g, h
<i>Prunus padus</i> L.	aléatoire		15	c, f, g, h
<i>Ribes alpinum</i> L.	aléatoire		2	g, h
<i>Rosa pendulina</i> L.	aléatoire		2	g, h
<i>Hedlundia mougeotii</i> (Soy.-Will. & Godr.) Sennikov & Kurtto	très faible		20	g, h
<i>Sambucus racemosa</i> L.	très faible *		4	c, f, g, h
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	très faible	1,5	30	e, f, g, h
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	très faible		20	c, g, h
<i>Nerium oleander</i> L.			5	f, h
<i>Sambucus nigra</i> L.			7	e, h
<i>Corylus avellana</i> L.	*		5	b, h
<i>Cornus sanguinea</i> L.			3	e, h
<i>Betula pendula</i> Roth			25	g, h
<i>Rubus idaeus</i> L.	*		2	c, h
<i>Amelanchier ovalis</i> Medik.			3	b, h
<i>Aria edulis</i> (Willd.) M.Roem.			20	b, h

* préférable en boutures de racines (Venti et al., 2003; Florineth & Molon, 2005).

** Valeur en laboratoire, utilisation difficile conséquence de la faible capacité à produire des racines les premières années et le caractère aléatoire de la survie (Li et al., 2004).

*** : Valeur en laboratoire, reprise plus aléatoire en conditions naturelles

a. Schiechtl, 1973, b. Schiechtl, 1980; c. Zuffi, 1989; d. Graf et al., 2003; e. Venti et al., 2003; f. Florineth & Molon, 2005; g. Bonin et al., 2013; h. MNHN & OFB, 2023; i. Li et al., 2004

La famille des Salicacées

Les Salicacées représentent une famille de plantes angiospermes caractérisée par sa diversité et sa répartition géographique étendue. La famille des Salicacées est représentée par les saules (*Salix* sp.) et les peupliers (*Populus* sp.). Cette famille compte plus de 450 espèces différentes et un nombre indéfini d'hybrides possibles (Newsholme, 1992; Argus, 1997), chacune présentant des caractéristiques distinctes en termes de taille, de forme, de feuillage et d'habitat. La famille a une vaste répartition, étant représentée par des espèces indigènes dans presque toutes les parties du monde, à l'exception de l'Australasie, bien qu'elle soit beaucoup plus présente dans les régions tempérées et

subarctiques de l'hémisphère nord qu'ailleurs (Meikle, 1984; Kuzovkina-Eishen, 2003). Les plus fortes concentrations se trouvent dans les zones humides tels que les marais et les berges de cours d'eau, en raison de leur capacité à tolérer des sols gorgés d'eau (Newsholme, 1992).

Le genre Salix

Le rôle écologique essentiel des espèces des saules découle de leur étroite relation avec les zones humides, un lien profondément ancré dans leur nom, puisque "Salix" trouve son origine dans les mots celtiques "sallis", "sal" signifiant "près de" et "lis" signifiant "eau" (Newsholme, 1992). On les qualifie de phréatophytes obligatoires, c'est-à-dire qu'elles dépendent de la nappe phréatique pour se développer. Les espèces de ce genre sont principalement présentes dans les zones alluviales, riveraines et les environnements humides (Kuzovkina-Eishen, 2003). Dans les Alpes, le genre *Salix* se distingue comme le groupe de plantes ligneuses le plus diversifié, abritant 33 espèces répertoriées (Kuzovkina, 2003; Wagner et al., 2021). Les hybridations entre les espèces sont fréquentes et plus nombreuses que celles de tout autre genre (Newsholme, 1992).

Les saules sont caractérisés par des adaptations physiologiques et une résilience écologique particulières qui les prédisposent à être utilisés dans des projets de conservation et restauration dans de nombreuses zones climatiques. Ils répondent naturellement à l'ensemble des traits biotechniques recherchés pour le génie végétal, ce qui en fait des auxiliaires essentiels dans les projets de restauration, notamment dans le cadre du bouturage :

- **Stratégie pionnière** : Les saules sont des espèces qualifiées de pionnières. Ils figurent parmi les premiers arbustes à s'implanter sur des biotopes récemment constitués, suite à des perturbations naturelles telles que les glaciations, les inondations ou encore l'érosion. Les saules colonisent souvent des sols et substrats oligotrophes, soit à teneur limitée en nutriments (Kuzovkina et al., 2004; Newsholme, 1992). Leurs nombreuses graines produites par des individus prolifiques et leur efficacité exceptionnelle dans la dispersion par le vent, leur permettent de se répandre sur de longues distances (Kuzovkina et al., 2004; Newsholme, 1992).
- **Pouvoir de survie et multiplication végétative** : Les saules disposent naturellement de primordia racinaires préformés sur les tiges qui leur assurent une capacité de multiplication végétative (Carlson, 1950; Gray & Sotir, 1996). En association, ils présentent également des taux de reprises très élevés pour certaines espèces. Les tiges couchées horizontalement ou plantées en boutures auront toutes les chances de reprendre.
- **Croissance rapide en faveur des racines** : Les saules produisent de grandes quantités de racines et de tiges, consécutivement à leur taux de croissance élevé (Raven, 1992; Kuzovkina-Eishen, 2003; Dušek & Květ, 2006). La croissance et la productivité sont supérieures à d'autres espèces même à des stades juvéniles, ils disposent de la plus grande capacité photosynthétique parmi les plantes ligneuses dans certaines conditions climatiques (Christersson et al., 1993; Wilkinson, 1999). Une fois établie, une plantation peut être régulièrement récoltée pendant 25 ans, voire plus, avec un minimum d'entretien (Newsholme, 1992).
Cette cinétique de croissance permet aux saules de s'ancrer rapidement et efficacement dans les sols. Le ratio de biomasse aérienne sur souterraine est en général très en faveur des racines (Wikberg & Ögren, 2007). Cela leur permet de s'ancrer aisément dans un substrat grossier et de prospecter plus efficacement dans des sols pauvres. La biomasse aérienne réduite par rapport au reste de la plante permet de limiter l'évapotranspiration et d'offrir moins de prise aux forces d'arrachement.

- **Tolérance aux contraintes mécaniques**: Les saules disposent d'une certaine flexibilité à résister aux contraintes. De par leur écologie ripicole, la plupart des saules résistent aux contraintes mécaniques exercées par les écoulements, tolérant à l'alternance déposition/ablation (Gray & Sotir, 1996; Kuzovkina & Quigley, 2005). Ils possèdent de nombreuses tiges souples qui, en plus de tolérer les écoulements, sont également susceptibles de les ralentir. Ils sont également capables de rejeter à partir de racines mises à nu ou de tiges ensevelies (Barnes, 1985; Karrenberg et al., 2002). Ces espèces sont généralement peu sensibles à la compaction des sols, ce qui est un avantage certain dans les sols remaniés ou urbains (Kuzovkina et al., 2004).
- **Tolérance à la submersion** : Leur adaptation aux milieux riverains confère aux saules une tolérance remarquable aux sols inondés ou saturés, ainsi qu'au manque d'oxygène dans la zone racinaire (Krasny et al., 1988; Jackson & Attwood, 1996; Aronsson & Perttu, 2001; Kuzovkina et al., 2004). La croissance des saules semble peu affectée par l'anoxie induite par les inondations (Kuzovkina et al., 2004), car ces conditions anaérobiques déclenchent rapidement des adaptations morphologiques favorisant le maintien de leur métabolisme (Kuzovkina-Eishen, 2003). Bien que la submersion n'ait généralement pas d'impact significatif sur la survie individuelle (Kramer et al., 2008), elle peut parfois influencer la production de biomasse (Amlin & Rood, 2001; Schaff et al., 2003). Ainsi, la plupart des saules sont considérés comme hautement tolérants à la submersion (Krasny et al., 1988; Glenz et al., 2006; Niinemets & Valladares, 2006) ainsi qu'à l'anoxie (Krasny et al., 1988; Jackson & Attwood, 1996; Aronsson & Perttu, 2001; Kuzovkina et al., 2004; Niinemets & Valladares, 2006).
- **Développement du système racinaire**: Trait indispensable à considérer dans un objectif de renforcement de la cohésion du sol, de nombreuses espèces de saules présentent un système racinaire ramifié et fibreux, à croissance continue de mai à octobre, conduisant à la production d'une majorité des racines fines dans les 40 à 45 cm supérieurs du sol (Gray & Sotir, 1996). Leur capacité à favoriser le développement racinaire et leur résilience face aux contraintes environnementales en font des choix privilégiés pour des applications en génie végétal.
- **Disponibilité** : Leur grande abondance dans les zones riveraines permet d'assurer une disponibilité du matériel végétal.

En plus de présenter des traits biotechniques adaptés, on constate une variabilité phénotypique notable chez le genre *Salix*, caractérisée par une plasticité extrême de leurs traits fonctionnels et des réponses aux stress tant au niveau inter qu'intraspécifique (He & Dong, 2003; Glynn et al., 2007; Nakai et al., 2009; Su et al., 2009; Stokes et al., 2012). Par exemple, les jeunes pousses présentent fréquemment des feuilles en développement qui diffèrent considérablement en taille et en forme des feuilles matures issues de la même plante. Les feuilles produites après une coupe sélective ont tendance à être plus grandes que celles des spécimens non taillés. Cette diversité phénotypique engendre des formes variables parfois trompeuses, mettant en lumière la remarquable adaptabilité des saules face aux différentes contraintes environnementales.

Le genre Populus

À côté des saules, les peupliers (genre *Populus*) se révèlent également comme des auxiliaires potentiels du génie végétal. Appartenant à la même famille, ils partagent de nombreuses caractéristiques avec les saules, faisant d'eux une option prometteuse dans des projets environnementaux, en raison de leurs traits biotechniques recherchés en génie végétal. Certains peupliers (*Populus nigra*, *Populus alba*, *Populus x canescens* notamment) présentent des caractéristiques exploitables, telles qu'une facilité de reproduction végétative par bouturage, une croissance rapide, un taux de reprise élevé (bien qu'inférieur à celui des saules à l'exception du peuplier noir) (Sauli et al., 2006), un système racinaire

étendu et puissant capable de stabiliser rapidement le sol, ainsi qu'une résistance à l'immersion. Bien que les peupliers partagent des similitudes avec les saules, certaines caractéristiques des saules, en particulier leur plus grande diversité en termes d'espèces, les rendent plus avantageux dans certaines applications environnementales (Verwijst, 2001).

Au sein du genre *Populus*, c'est particulièrement le peuplier noir sauvage (*Populus nigra*) qui émerge comme une espèce d'intérêt pour le génie végétal (Sol, 2008; Frossard & Evette, 2009). Le peuplier noir constitue un formidable outil pour le génie végétal, avec un appareil racinaire particulièrement dense et puissant contribuant à la stabilité des berges. Grâce à ce système racinaire impressionnant, il joue un rôle régulateur essentiel dans les ripisylves, participant à l'épuration des pollutions, notamment azotées en provenance des cultures riveraines. Cependant, il est essentiel de différencier les essences sauvages des essences issues de la culture (cultivars). Les peupliers de culture présentent, à l'inverse, un système racinaire plus superficiel et traçant, ayant peu d'intérêt pour le génie végétal (Sol, 2008). Affichant une affinité plus méditerranéenne, le peuplier blanc (*Populus alba*) a également déjà été mis en œuvre dans des projets de génie végétal en Italie (Frossard & Evette, 2009).

Le peuplier noir (*Populus nigra*), qui affiche un taux de reprise intéressant pour son usage sous forme de bouture, fait l'objet d'une fiche technique détaillée en partie 3.3, pour une référence approfondie. Ces fiches, organisées par espèce, fournissent des informations exhaustives sur la distribution géographique, l'écologie spécifique, les critères morphologiques distinctifs et des détails pertinents sur leur utilisation dans le contexte du génie végétal.

La famille des Tamaricacées

Les espèces de la famille des Tamaricacées prospèrent dans des climats arides et semi-arides mais requièrent temporairement de l'humidité édaphique de surface ou des eaux souterraines (Prada & Arizpe, 2008). On les trouve dans les zones riveraines avec des régimes d'eau allant des cours d'eau permanents aux ruisseaux éphémères, dans les dépressions humides et dans les zones littorales sablonneuses, sous forme d'individus dispersés ou de formations continues en fonction de la disponibilité de l'eau. Leur caractéristique distinctive réside dans leur capacité à résister à des conditions de sécheresse. Ces espèces sont des phréatophytes facultatifs, capables de développer leurs racines jusqu'à la nappe phréatique, sans dépendre exclusivement de cette source d'eau pour leur survie. Elles démontrent une certaine plasticité dans leur mode d'approvisionnement en eau, s'adaptant à des conditions variables de disponibilité d'eau.

Les Tamaricacées semblent disposer de la plupart des traits biotechniques recherchés, similaires à ceux des saules. Particulièrement prometteuses, certaines espèces ont déjà fait leurs preuves dans la stabilisation de talus et de dunes en milieu méditerranéen (Venti et al., 2003; Sauli & Cornolini, 2007). Parmi les candidates potentielles, dans des conditions sèches ou humides, deux espèces xérophiles semblent particulièrement aptes, dans leur biotope d'origine, à lutter contre l'érosion par le génie végétal : *Tamarix gallica* et *Myricaria germanica*. Ces espèces sont réputées plus résistantes à la sécheresse que les saules (Niinemets & Valladares, 2006), en raison de leur implantation sur des stations habituellement ensoleillées et des substrats filtrants constitués de matériaux grossiers (Arizpe et al., 2008) ou sujets à la dessiccation (Rameau et al., 2008). Bien que ces espèces évoluent dans des biotopes différents, *T. gallica* et *M. germanica* présentent des caractéristiques recherchées pour le génie végétal, offrant une efficacité comparable à celle des espèces de saules couramment utilisées, tout en assurant une certaine résistance à la dessiccation (Tallent-Halsell & Walker, 2002; Lavaine, 2013). Ces caractéristiques sont les suivantes :

- **Pouvoir de survie et multiplication végétative** : *T. gallica* et *M. germanica* démontrent un comportement pionnier, ce qui favorise leur adaptation à diverses perturbations naturelles telles que les inondations, la sécheresse et les incendies. Leur capacité de régénération par

bouturage de tiges est bien documentée (Bill et al., 1997; Stromberg, 1998; Kudrnovsky, 2002; Sauli et al., 2006; Lavaine et al., 2012).

- **Croissance rapide** : Ces espèces affichent une cinétique de croissance élevée (Carleton, 1914; Cleverly et al., 1997; Vandersande et al., 2001; Walker et al., 2006), se caractérisant par un développement rapide pour *T. gallica* particulièrement.
- **Tolérance aux contraintes mécaniques** : Les *Tamaricaceae* font preuve d'une résistance remarquable aux contraintes mécaniques. *T. gallica* montre une résistance extrême au cisaillement, dépassant les 400 N/m² (Sandercock & Hooke, 2010), et à l'arrachage par les écoulements, grâce à leurs racines principales profondes. De même, *M. germanica* s'oppose à l'érosion des bancs et des berges grâce à son système racinaire puissant (Kudrnovsky, 2002). Les tiges flexibles et ramifiées de ces espèces minimisent la résistance à l'écoulement de l'eau et la capture de sédiments (Everitt, 1980; Sandercock & Hooke, 2010). Les *Tamaricaceae* peuvent survivre facilement au recouvrement sédimentaire lors des crues en émettant des racines adventives, à partir des tiges ensevelies (Everitt, 1980; Tallent-Halsell & Walker, 2002).
- **Tolérance à la submersion** : *T. gallica* prospère dans les sols saturés en eau (Tallent-Halsell & Walker, 2002; Kumari, 2008) et supportent une submersion totale prolongée (Warren & Turner, 1975; Irvine & West, 1979; Everitt, 1980; Brock, 1994). Cependant, en cas de submersion au cours de la première année, les boutures de Tamarix présentent d'importantes réductions de croissance (Tallent-Halsell & Walker, 2002). *M. germanica* tolère une submersion allant jusqu'à deux mois et profite, comme les saules, des inondations périodiques pour se reproduire par voie sexuée (Chen & Xie, 2009).
- **Système racinaire développé** : Les deux espèces présentent un enracinement solide qui permet de stabiliser efficacement les berges, grâce à un système racinaire étendu, profond et robuste (W. L. Graf, 1978; Sandercock & Hooke, 2010; Lavaine, 2013). Bien que *M. germanica* produise moins de racines de structure et de biomasse que *T. gallica*, cela est notamment inhérent à la taille des boutures, une caractéristique propre à cette espèce aux tiges grêles.

Pour rappel, chaque espèce est accompagnée d'une fiche technique détaillée en partie 3.3, pour une référence approfondie. Ces fiches, organisées par espèce, fournissent des informations exhaustives sur la distribution géographique, l'écologie spécifique, les critères morphologiques distinctifs et des détails pertinents sur leur utilisation dans le contexte du génie végétal.

3. Description des espèces ligneuses

Dans la sélection des espèces ligneuses, nous avons pris en considération les critères suivants :

- Leurs caractéristiques biotechniques, telles que leur croissance, leur capacité de reproduction végétative, leur port, leur résistance aux contraintes, etc.
- Leur distribution géographique et leur occurrence au sein des groupements végétaux en France.
- Leur historique d'utilisation réussie dans des projets de génie végétal.

Les espèces présentées sont les suivantes :

ARBRES / ARBUSTES

<i>Populus nigra</i>	Peuplier noir
<i>Salix alba</i>	Saule blanc
<i>Salix atrocinerea</i>	Saule roux
<i>Salix caprea</i>	Saule marsault
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix fragilis</i>	Saule fragile
<i>Salix pentandra</i>	Saule laurier

ARBRISSEAUX HAUTS (> 2 M)

<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Salix cinerea</i>	Saule cendré
<i>Salix eleagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines
<i>Salix viminalis</i>	Saule des vanniers
<i>Tamaris gallica</i>	Tamaris de France

ARBRISSEAUX BAS (< 2 M)

<i>Myricaria germanica</i>	Myricaire d'Allemagne
<i>Salix aurita</i>	Saule à oreillettes
<i>Salix caesia</i>	Saule bleuâtre
<i>Salix foetida</i>	Saule fétide
<i>Salix hastata</i>	Saule hasté

Les fiches espèces complètes associées sont présentées en **Annexe 1**, page 73.

Comprendre les Fiches Espèces : Mode d'Emploi

La présentation des espèces ligneuses susceptibles d'être utilisées en génie végétal s'articule en 5 parties : nomenclature, distribution géographique, écologie, description et concernant le génie végétal.

Nomenclature

Les fiches sont ordonnées par ordre alphabétique selon le nom latin, correspondant au nom scientifique valide de l'espèce d'après le référentiel taxonomique en cours (Taxref v16.0). Les synonymes n'ont pas été inclus pour plus de simplicité.

Les noms français proviennent de références de flores francophones telles que *Flora Helvetica* (Lauber & Wagner, 1998), *Flora vegetativa* (Eggenberg & Möhl, 2008), *Flora gallica* (Tison & De Foucault, 2014), ainsi que la *Flore Forestière Française* (Rameau et al., 1994), et également d'ouvrages techniques comme *Géni'-Alp* (Bonin et al., 2013).

Distribution géographique

La distribution géographique des espèces a été évaluée tant à l'échelle européenne (pouvant être étendue à l'Asie) qu'au sein du territoire français, avec une approche plus précise.

Pour déterminer la distribution mondiale, diverses sources ont été consultées, notamment la *Flore forestière française* (Rameau et al., 1994) et d'autres ouvrages spécifiques aux genres étudiés (Meikle, 1984; Newsholme, 1992), ainsi que les occurrences répertoriées par le [GBIF](#), le Global Biodiversity Information Facility.

Au niveau national, les répartitions ont été évaluées en utilisant les données du [SINP](#), le système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel, ainsi que la [flore électronique française en ligne](#). À une échelle plus locale, une référence technique, l'ouvrage de Bonin et al. (2013), a été consultée pour des données plus détaillées.

Écologie

Cette sous-section aborde l'écologie des espèces ainsi que les milieux et unités phytosociologiques qu'elles occupent. Elle offre des détails sur leur répartition altitudinale ainsi que sur leurs exigences édaphiques (pH, humidité, teneur en nutriments, granulométrie, etc.). Lorsque cela a été possible, leur optimum phytosociologique a également été mentionné.

L'ensemble de ces informations ont été synthétisées à partir des sources suivantes :

- Des ouvrages botaniques tels que *Flora Gallica* et la *Flore Forestière Française*.
- Des publications techniques, à l'instar de Meikle (1984), Newsholme (1992), Schiechl & Stern (1997), Niinemets & Valladares (2006), Bonin et al. (2013), Lavaine (2013).
- Des valeurs indicatrices d'Ellenberg et Julve (2015)

Les valeurs indicatrices d'Ellenberg

Les valeurs d'Ellenberg sont un système de notation permettant d'évaluer les préférences écologiques des plantes vasculaires vis-à-vis de divers facteurs environnementaux. Ces valeurs, notées de 1 à 9, couvrent un large éventail de paramètres, tels que la lumière, la température, l'humidité du sol, le pH du sol, la nutrition minérale, et d'autres variables. Elles servent à caractériser les milieux en fonction des plantes qui y poussent. Les valeurs d'Ellenberg sont précieuses pour les botanistes, écologistes, et autres scientifiques pour étudier la répartition des espèces végétales, classifier les milieux, modéliser des écosystèmes, et gérer l'environnement. Une adaptation française de ces valeurs a été réalisée par Julve (2015). En génie végétal, ces valeurs aident à identifier les espèces les mieux adaptées aux conditions environnementales d'un site donné. Pour des raisons de concision,

ces données sont fournies en **Annexe 2** pour l'ensemble des espèces.

Au sein cette annexe, on détaille les valeurs spécifiques à chaque espèce à partir des données extraites de Baseflor (Julve, 2015). Cela englobe :

> **Lumière** - Indique la tolérance de l'espèce à l'ombre ou à la lumière directe du soleil. Une espèce notée 1 préfère les environnements très ombragés, tandis qu'une espèce notée 9 préfère une exposition en plein soleil.

> **Température** - Indique la tolérance de l'espèce aux variations de température. Une plante notée 1 préfère les climats froids, tandis qu'une plante notée 9 tolère les climats chauds.

> **Continentalité** - Décrit le degré de continentalité d'une espèce. Une espèce notée 1 se situe dans les régions marines à maritimes, tandis qu'une espèce notée 9 est qualifiée d'hypercontinentale.

> **Humidité atmosphérique** - Indique la tolérance de l'espèce aux variations d'humidité atmosphérique. Une espèce notée 1 préfère les climats atmosphériques secs, tandis qu'une espèce notée 9 tolère les climats atmosphériques humides.

> **Humidité édaphique** - Indique la tolérance de l'espèce à des conditions de sol très sec (1) à très humide (12). Cela peut être lié au niveau de la nappe phréatique.

> **Réaction du sol – pH** - Indique la tolérance de l'espèce à des sols acides (1) ou alcalins (9). Une valeur de 5 à 7 indique une tolérance à des sols neutres.

> **Nutriments du sol** - Indique la tolérance de l'espèce à des sols pauvres en éléments nutritifs (1) ou riches (9).

> **Salinité** - Indique la tolérance de l'espèce à des sols salés (0) ou non salés (9).

> **Texture/structure du sol** – Cette valeur est utilisée pour évaluer la tolérance de l'espèce à des types de sols spécifiques : sableux, argileux, tourbeux, etc. Une espèce notée 1 préfère des sols très spécifiques, tandis qu'une espèce notée 9 est plus tolérante à une variété de types de sol.

> **Matière organique du sol et type d'humus** – Indique la tolérance de l'espèce.

Description

Cette sous-section expose les caractéristiques morphologiques de l'espèce et leur variabilité. Elle couvre les aspects suivants :

- Une description générale (type biologique, hauteur, port, etc.).
- Les rameaux (couleur, pilosité, etc.).
- Les bourgeons (forme, disposition, taille, etc.).
- Les feuilles (forme, disposition, taille, couleur, etc.).
- Les fleurs, inflorescences et fruits (type, couleur, etc.).

La présence potentielle de sous-espèces et les confusions possibles sont identifiées. Les traits distinctifs de ces sous-espèces sont succinctement présentés.

Les confusions potentielles avec d'autres espèces morphologiquement similaires sont également signalées. Des critères diagnostiques discriminants sont fournis pour faciliter l'identification.

Concernant le génie végétal

Ce chapitre repose sur trois points essentiels à considérer pour l'utilisation de l'espèce en génie végétal :

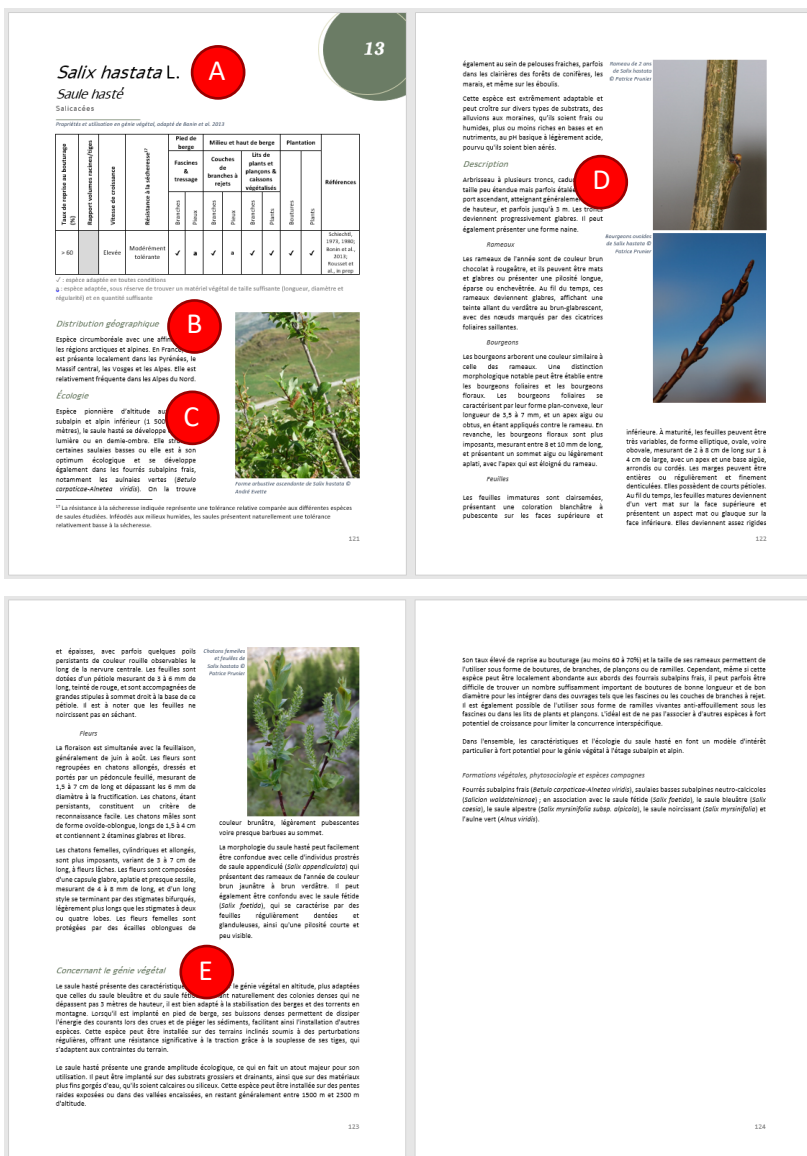
- **Aptitudes biotechniques** (capacités à être utilisées en génie végétal) : Ces aptitudes découlent des caractéristiques morphologiques telles que le port, le type d'enracinement, le rapport entre le volume de l'appareil souterrain et le volume du système aérien, la souplesse des tiges, et la résistance mécanique aux contraintes hydrauliques, entre autres.
- **Caractéristiques physiologiques** : Elles déterminent l'aptitude et les modalités de croissance de l'espèce, incluant le type de croissance et de développement (arboré ou arbustif), la rapidité de colonisation, la capacité à produire des racines adventives, le taux de reprise au bouturage, et la viabilité des semences.
- **Exigences écologiques** : En lien avec les préférences écologiques concernant les

conditions stationnelles discutées partie III, ces exigences déterminent la possibilité d'utilisation en génie végétal, notamment en rapport avec l'implantation de l'espèce. Elles incluent les limites altitudinales, la position sur la berge, et l'optimum édaphique.

- En lien avec les données issues de la partie III sur les préférences écologiques concernant les conditions stationnelles, les exigences déterminent la possibilité éventuelle d'utilisation en génie végétal notamment en rapport avec l'implantation de l'espèce, incluant les

limites altitudinales, la position sur la berge, et l'optimum édaphique.

L'ensemble de ces points et des différents détails abordés permet d'évaluer l'adéquation de l'espèce aux techniques existantes telles que les lits de plants et plançons, les fascines, les caissons en rondins végétalisés, et le bouturage. De plus, le chapitre aborde les formations végétales et la phytosociologie à privilégier en tenant compte des associations naturelles avec d'autres espèces ayant des exigences écologiques et/ou des caractéristiques biotechniques similaires ou complémentaires.



A : Nomenclature

B : Distribution géographique

C : Écologie

D : Description

E : Concernant le génie végétal

Figure III-3: Horizon d'une fiche espèce

IV. Mise en œuvre du bouturage

Les systèmes vivants sont intrinsèquement complexes et ne tolèrent guère d'approximations ou de simplifications. Par conséquent, une attention soutenue doit être accordée aux moindres détails de conception et de mise en œuvre en amont et pendant toutes les phases de réalisation soit durant les aménagements préalables, le prélèvement, le transport et le stockage, la préparation à la plantation, la mise en terre.

1. Aménagements et précautions préalables

Lors de la planification d'un projet de bouturage, il peut s'avérer nécessaire de préparer le site avant d'initier toute installation, qu'elle intervienne ou non en complément d'autres travaux ou techniques. Cette préparation revêt une importance cruciale pour garantir des conditions optimales propices à la reprise des végétaux vivants. Il est fortement recommandé d'effectuer l'ensemble des chantiers en dehors des périodes sensibles pour les espèces animales, afin de minimiser les perturbations écologiques (Eubanks & Meadows, 2002).

Cette préparation peut impliquer diverses actions, telles que le terrassement du terrain pour réduire la pente de la berge ou la décompaction du sol afin d'assurer un bon drainage et une porosité suffisante pour le développement du système racinaire (Pollock et al., 2019b). Ces travaux peuvent nécessiter l'utilisation d'engins de chantiers pour lesquels l'accessibilité devra être assurée pour leur bonne circulation (Biotec, 2011). Parfois, cela implique également le débroussaillage ou l'abattage sélectif d'arbres, ce qui a l'avantage de réduire l'ombre sur les jeunes boutures, préservant ainsi ces dernières de la compétition pour la lumière. Il conviendra dans cette situation de maintenir au mieux la biodiversité locale et notamment les arbres remarquables ou encore les arbres habitats.

Idéalement, le site devrait présenter des sédiments fins et de la matière organique, débarrassé des ronces, buissons et hautes herbes, et exempt de gros cailloux (Lachat, 1994; Gray & Sotir, 1996). En cas de sol excessivement saturé en eau, un drainage peut être nécessaire pour obtenir un taux d'humidité optimal, car un sol trop humide manque d'oxygène nécessaire à la croissance (Fredlund et al., 1978; Ernst, 1990). Pour favoriser la reprise, il est possible d'ajouter de la terre, de l'humus, du paillage ou même de l'engrais afin d'augmenter la fertilité du sol (Zuffi, 1989; Gray & Sotir, 1996; Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008; AMEC, 2012). Toutefois, il est important de rappeler qu'un des avantages à travailler avec des espèces pionnières est la possibilité de se passer d'amendements massifs et d'apports importants de terre végétale, limitant ainsi les coûts.

Avant toute intervention, il est essentiel de prendre en compte la présence éventuelle d'espèces exotiques envahissantes (Venti et al., 2003; Baird et al., 2015) mais également d'espèces végétales et animales protégées. Les risques de dissémination d'espèces invasives doivent être intégrés depuis la phase de conception jusqu'aux étapes de suivi et de réception des travaux (UPGE, 2020). Des précautions particulières doivent être prises pour éviter leur propagation, que ce soit par l'eau, le transport de terre ou même les engins. Les matériaux contaminés ne doivent pas être sortis du site, à moins qu'ils ne fassent l'objet d'un traitement *ad-hoc* ; et les engins et les outils doivent être soigneusement nettoyés avant d'être utilisés ailleurs (UPGE, 2020).

2. Prélèvement du matériel végétal

Afin de présenter un potentiel élevé de reprise et de ne pas mettre en péril le cas échéant les populations sources, le prélèvement doit respecter certaines exigences relatives à la période, aux populations sources, aux modalités et à la nature du matériel végétal prélevé.

Périodes

Le prélèvement des matériaux végétaux doit s'effectuer pendant la période de dormance de la végétation, avant que les bourgeons ne commencent à débourrer (Hoag, 1994; Gray & Sotir, 1996; Schiechl & Stern, 1996, 1997; Zeh, 2000, 2007, 2010; Eubanks & Meadows, 2002; Florineth & Molon, 2005; Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012). Cette période varie en fonction de la région géographique, de l'altitude et de l'espèce considérée. Dans les régions tempérées d'Europe, elle s'étend d'octobre/novembre jusqu'à février/avril. Le prélèvement des boutures pendant cette période garantit qu'elles disposent de glucides de réserve, sous une forme complexe non soluble, qui pourront être mobilisées pour favoriser leur reprise (Bonicelet al., 1987; Sauter, 1988). De plus, de nombreuses activités métaboliques ralentissent ou s'arrêtent pendant la période de dormance, réduisant ainsi le stress de la transplantation et la vulnérabilité des plantes.

Sources

Concernant les sources de prélèvement des boutures, trois options sont envisageables :

1. Le prélèvement peut s'effectuer au sein d'un peuplement indigène naturel à proximité du site (Zuffi, 1989; Hoag, 1994; Gray & Sotir, 1996; Lewis, 2000; Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008; AMEC, 2012; Baird et al., 2015; Pollock et al., 2019b). Cette option garantit l'adaptation des individus aux conditions spécifiques du site, favorisant ainsi le succès de la reprise et évite la pollution génétique du site. Toutefois, il est parfois difficile de trouver des sites de prélèvement comportant suffisamment de matériel végétal et facilement accessibles. Dans ce contexte, disposer d'une cartographie des sites potentiels de prélèvement peut être d'une grande utilité.
2. Les ouvrages établis à proximité depuis plusieurs années peuvent également servir de source de matériaux vivants pour de nouveaux projets. Ces deux premières méthodes se révèlent plus économiques et écologiques, évitant les coûts liés au transport.
3. Si le prélèvement en milieu naturel n'est pas possible, les matériaux vivants peuvent provenir d'une pépinière, auquel cas un certificat de provenance des végétaux devra être remis au maître d'œuvre (Biotec, 2011). Cependant, il convient de noter que le délai de disponibilité des espèces en pépinière peut être prolongé, car les stocks sont parfois limités, et les espèces disponibles varient d'une année à l'autre (Venti et al., 2003; AMEC, 2012). Cette option est à privilégier en dernier recours, car elle ne garantit pas toujours le caractère rustique des individus, contrairement aux options précédentes, où les espèces initialement adaptées au milieu assurent cette rusticité essentielle pour la résistance future. Le prélèvement en pépinière permet toutefois une meilleure rentabilité du travail de récolte et doit en principe limiter les risques d'erreur dans la détermination et le choix des différentes espèces.

Afin de garantir l'indigénat en pépinière, la marque 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.

Modalités

Le prélèvement des boutures s'effectue à l'aide d'une scie ou d'un sécateur ou même dans certains cas d'une tronçonneuse, selon le diamètre de la branche ou de l'arbuste débité choisi (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Hoag, 1994; Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Lewis, 2000; Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012). Il est crucial que les outils soient parfaitement affûtés, ce qui favorise une coupe nette, précise, sans écorchures ni dommages (Figure



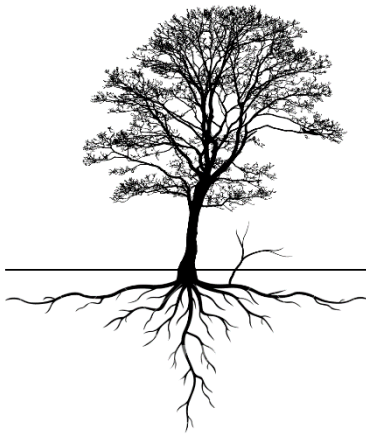
Figure IV-1: Prélèvement d'une bouture à l'aide d'un sécateur électrique affuté © Sébastien De Danieli

IV-1). En effet, une coupe propre est essentielle pour ne pas compromettre la reprise végétative, car les nouvelles pousses ne se développent pas et vont être fragilisées (maladies, insectes, gel) là où l'écorce est endommagée ou écrasée (Adam et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012). Enfin, lors de la récolte, il est préférable de veiller à la propreté et la stérilité des outils de prélèvement afin de limiter la propagation de maladies.

La collecte en milieu naturel doit suivre des règles précises afin de ne pas compromettre la survie des peuplements sources. La campagne de prélèvement doit être réalisée de manière non-invasive et raisonnée, en veillant à ne pas prélever sur plus de 2/3 du peuplement ni plus d'1/3 voire 1/4 des branches d'un même individu. Il est crucial de maintenir un équilibre lors du prélèvement sur chaque plante-mère (Hoag, 1994; Baird et al., 2015; OFB, 2019). Dans la mesure du possible, il est recommandé de solliciter plusieurs sites de prélèvement différents, favorisant ainsi une plus grande diversité génétique et réduisant l'impact sur ces populations (Gray & Sotir, 1996; Eubanks & Meadows, 2002; AMEC, 2012). La collecte ne doit pas avoir lieu plus de trois années consécutives sur un même site (OFB, 2019). Dans le cadre de la marque Végétale Locale, ce sont des règles obligatoires de prélèvement qui sont définies dans le référentiel. Il est impératif de récolter la même espèce sur un nombre aussi étendu que possible de clones, tout en maintenant un équilibre (un clone ne doit pas représenter plus de 10% de la collecte totale d'un lot). Il est recommandé d'étendre la récolte à tous les clones disponibles pour prévenir toute sélection et préserver la plus grande diversité génétique possible. En cas d'utilisation du site par plusieurs récolteurs pour leurs besoins, il est conseillé de définir les règles de récolte dans une convention d'usage, notamment pour les parcs à boutures.

Nature du matériel prélevé

Afin d'optimiser leurs probabilités de reprise, les branches prélevées doivent répondre à plusieurs critères essentiels. Elles doivent être droites pour faciliter la mise en terre et en bonne santé : exemptes d'insectes, de maladies, de parasites, non endommagées, et leur écorce ne doit pas être ni trop vieille, ni trop marquée de sillons (Hoag, 1994; Schiechtl & Stern, 1996; Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012; Baird et al., 2015; Pollock et al., 2019b). En général, elles ont un âge compris entre deux et quatre ans (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Hoag, 1994; Schiechtl & Stern, 1996; Lewis, 2000; Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012). Il est important de noter qu'il convient d'éviter de sélectionner des branches trop anciennes, reconnaissables par leur diamètre important, leur rugosité ou par l'étude des cicatrices foliaires qui offre une indication du nombre de saisons de croissance écoulées. En effet, ces branches présentent un risque accru de mortalité (Lewis, 2000). Il est recommandé de privilégier des branches sans



ramifications et possédant un nombre suffisant de bourgeons (Schiechtl, 1980; Hoag, 1994; Schiechtl & Stern, 1996; Zeh, 2000, 2010; Venti et al., 2003). Dans le cas contraire, les branches latérales doivent être proprement enlevées de la tige, en veillant à ce que les bourgeons en croissance et l'écorce restent intacts. Il est conseillé d'éviter le prélèvement des drageons et des pousses basales de l'année, car ces derniers ne contiennent pas assez d'énergie pour la reprise (Figure IV-2) (Hoag, 1994).

Figure IV-2: Schéma d'un drageon d'arbre - non recommandé pour le prélèvement en vue du bouturage.

Les branches à prélever doivent également présenter une longueur et un diamètre suffisants. Il est conseillé d'utiliser des parties de plantes ligneuses aussi longues et grandes que possible. En effet, le succès de l'enracinement et du développement des plantes est généralement plus élevé à mesure que le volume des branches augmente ; les boutures plus longues et plus épaisses contiennent davantage de glucides et d'hormones et donc d'énergie nécessaire à leur enracinement, leur croissance et leur résistance à la sécheresse (Schiechtl, 1973; Polster, 2002; Venti et al., 2003; Da Costa et al., 2013). Pour donner une idée de la plage optimale de taille pour les boutures, les meilleurs résultats de reprise sont obtenus avec des boutures de la taille d'un doigt jusqu'à celle d'un bras en diamètre. Les tiges fines ont tendance à sécher plus facilement et ne sont donc généralement utilisées qu'en combinaison avec des parties de plantes plus grandes (Figure IV-3). Cependant, les plus grandes boutures peuvent causer plus de dommages aux peuplements indigènes lors de leur prélèvement, et entraînent des coûts plus élevés, à la fois pour leur acquisition et leur plantation (Breton et al., 2014; Pollock et al., 2019b). Les dimensions des boutures varient dans la littérature selon les auteurs et les espèces (Tableau 24). En résumé, il est recommandé de disposer de boutures d'une longueur de 40 cm à 100 cm et un diamètre de 2 cm à 5 cm. En prévision de la recoupe des boutures sur le site après la plantation (si l'extrémité est abimée par la mise en terre), il est judicieux de prévoir des longueurs légèrement plus importantes que celles indiquées (Schiechtl, 1980; Venti et al., 2003; Pollock et al., 2019b).



Figure IV-3: Boutures fraîchement prélevées © Sébastien De Danieli

L'une des étapes les plus cruciales de ce processus est l'identification de l'extrémité supérieure de la bouture. Si la bouture est plantée à l'envers, elle ne poussera pas ou difficilement, entraînant ainsi une perte des efforts investis dans la récolte et la plantation. Pour identifier l'extrémité qui correspond au sommet de la bouture, il suffit d'observer la cicatrice de la feuille et les bourgeons émergents. Les

bourgeons émergeant de la cicatrice foliaire sont toujours orientés vers le haut. Par ailleurs, la tige a généralement un diamètre plus petit près du sommet de la bouture, mais cela n'est pas toujours évident. Les cicatrices foliaires sont la meilleure clé, la plus fiable. Certains auteurs recommandent de sceller le haut de la bouture pour faciliter son identification lors de la plantation, prévenir le dessèchement le temps du transport, du stockage éventuel et des premières phases de croissance. Cette identification peut être réalisée à l'aide d'une solution aqueuse ou d'un mélange constitué de moitié de peinture blanche et de moitié d'eau, voire même de latex ou de paraffine (Hoag, 1994; AMEC, 2012). Cependant, il convient de noter que l'utilisation de substances chimiques n'est pas recommandée du point de vue écologique, surtout en bordure de cours d'eau.

Tableau 5 : Synthèse bibliographique des dimensions des boutures pour le Génie végétal

	Diamètre (cm)		Longueur (cm)		Source
	Min	Max	Min	Max	
Boutures de saules	2	4	20	40-60	Schiechtl, 1973
	2	4	20	40 –60	Schiechtl, 1980
	1	5	40		Zuffi, 1989
	1	5	40		Schiechtl & Stern, 1996
	2	4	40	100	Lachat, 1994
	2*	8*	61*		Hoag, 1994
	1	5	50	100	Donat, 1995
	3	10	30	60	Zeh, 2000
	3*	6*	31*	91*	Eubanks & Meadows, 2002
	1-5	8	50-80		Venti et al., 2003
	3	8	40	100	Florineth & Molon, 2005
	1	5	30	60	Zeh, 2007
	2	4	80		Adam et al., 2008
	1,2	4	75	100	Campbell et al., 2008
	3	10	30	60	Zeh, 2010
	2	4	80		Biotec, 2011
	2		80		AMEC, 2012
	1*		61*		Baird et al., 2015
	0,5		40		Pollock et al. 2019b
1		40		Schoonmaker, 2021	
Boutures <i>Myricaria germanica</i>			25		Staffler, 1999

* Valeurs en unités impériales britanniques (pouces, pieds) provenant d'ouvrages anglo-saxons converties et arrondies à unité supérieure en cm

3. Transport et stockage

Lorsque l'on travaille avec des boutures, l'idéal est de disposer d'un lieu de prélèvement à proximité immédiate du site de plantation, éliminant ainsi le besoin de transport et de stockage. Cette approche réduit considérablement les risques d'endommagement et de dessèchement pendant le transport et le stockage, tout en maximisant les chances de réussite. Dans ce scénario, la mise en terre des boutures doit être effectuée dans un délai d'un à deux jours, idéalement dans l'heure (jusqu'à 4 heures) qui suit leur sortie du lieu de prélèvement (Schiechtl, 1980; Eubanks & Meadows, 2002; Biotec, 2011).

Transport

Une fois prélevées, les boutures doivent être transportées soit sur le site de l'ouvrage si la mise en terre peut être immédiate, soit sur le site du stockage le cas échéant. Lors du transport, il est primordial de s'assurer que les boutures ne soient pas endommagées au niveau des extrémités mais également au niveau de l'écorce (Campbell et al., 2008; AMEC, 2012). Le transport des boutures s'effectue, à plat dans des boîtes ou des sacs en polyéthylène scellés. Les boutures sont rangées en fagots de plusieurs boutures attachés avec de la ficelle (Figure IV-3), de la même espèce, voire du même individu pour une bonne traçabilité et afin de pouvoir mieux respecter les proportions par espèces demandés dans les cahiers des charges des travaux (Gray & Sotir, 1996 ; Rousset et al., in prep). Une fois organisées, les boutures sont transportées de préférence dans des véhicules non chauffés et, si possible, réfrigérés, ou dans une glacière à une température de -1°C à -4°C (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Hoag, 1994; Pollock et al., 2019a; Rousset et al., in prep).



Figure IV-4: Organisation du transport des boutures en fagots © Luce Martin

Que ce soit lors d'une plantation immédiate ou nécessitant un transport jusqu'au site, le risque majeur associé au transport et au stockage des boutures est le dessèchement de ces dernières. Il est crucial de leur accorder une attention particulière en les maintenant humidifiées et en les protégeant de la chaleur en permanence le temps du prélèvement et du transport (Schiechtl, 1980; Hoag, 1994; Gray & Sotir, 1996; Schiechtl & Stern, 1997; Lewis, 2000; Eubanks & Meadows, 2002; Venti et al., 2003; Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; AMEC, 2012). Pour ce faire, elles ne doivent en aucun cas être exposées au soleil, à la chaleur ou au vent. Il est préférable de les couvrir, par exemple, avec des bâches réfléchissantes ou des toiles de jute, voire du chanvre d'origine française, encore plus éco-conçu, humidifiées, et de les placer à l'ombre dans un endroit frais, idéalement à une température ne dépassant pas 4°C (Zuffi, 1989; AMEC, 2012; Pollock et al., 2019b). Il est déconseillé de les recouvrir de bâches en plastique, car elles ont tendance à retenir la chaleur (AMEC, 2012).

Stockage

Si le prélèvement a lieu longtemps avant la mise en terre, il faut procéder au stockage des boutures. Par exemple, il est possible de les récolter à l'automne en vue de leur plantation au printemps, avant le redémarrage de la végétation, ce qui implique un stockage sur plusieurs mois (Schiechtl, 1980; AMEC, 2012). L'objectif principal est de maintenir les boutures artificiellement en dormance jusqu'à la plantation, en évitant les risques de dessèchement, d'endommagement ou de moisissure, similaires à ceux encourus lors du transport. Bien que ce stockage puisse s'étendre sur plusieurs mois, il est important de noter qu'une période de stockage dépassant huit mois aurait un impact négatif sur le taux de reprise (Hoag, 1994; Pollock et al., 2019b).

Le stockage est généralement effectué dans des chambres froides, selon des conditions qui varient dans la littérature (Zuffi, 1989; Hoag, 1994; Gray & Sotir, 1996; Schiechtl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; Pollock et al., 2019b). Une humidité suffisante doit être assurée pour éviter le dessèchement des boutures, ce qui peut être atteint avec un taux d'humidité d'environ 98% (Venti et al., 2003). En ce qui concerne la température, il existe différentes recommandations. Schiechtl & Stern (1996, 1997) et (Venti et al., (2003) suggèrent des températures positives qui toutefois ne suffisent pas à maintenir les boutures en état de dormance. Une température trop basse pourrait à l'inverse endommager les boutures par brûlure par le froid. Hoag (1994) suggère un stockage entre -3°C et 0°C, AMEC (2012) suggère -2°C, Rousset et al. (in prep) réalisent ses expériences à -1°C tandis que Cram & Lindquist (1982) vont jusqu'à -4°C. En ce sens, les préconisations à retenir doit être une température comprise entre 0°C et -2 °C. Il est impératif que ces conditions constantes pour éviter l'alternance gel/dégel et le dessèchement des boutures. Une autre méthode consiste à protéger les boutures en les recouvrant avec des branches de résineux ou des feuilles pour les maintenir à l'ombre et au frais, ou même en les enfouissant directement dans de la terre humide (Zuffi, 1989).



Figure IV-5: Stockage temporaire des boutures le temps de la récolte à l'abri de la chaleur, du soleil et du vent, dans un sac plastique opaque, la base est maintenue humide par du papier absorbant mouillé © Juliette Rousset

Les boutures sont étiquetées individuellement selon l'origine, l'espèce et l'individu.

Les recommandations pour le stockage sont similaires à celles pour le transport, ce qui signifie qu'elles doivent être maintenues à l'ombre, à l'abri de la chaleur, du soleil et du vent (Figure IV-4). Il est recommandé de les placer dans des sacs en plastique (si pas d'autre alternative plus écologique), du papier absorbant, ou préférentiellement dans une toile de jute ou de tourbe, et/ou de les couvrir d'une bâche d'ombrage ou d'une toile de jute (Schiechtl, 1980; Schiechtl & Stern, 1996; Venti et al., 2003; Eubanks & Meadows, 2002; Campbell et al., 2008; AMEC, 2012). De plus, elles doivent être régulièrement arrosées pour éviter le dessèchement (Campbell et al., 2008; AMEC, 2012).



Figure IV-6: Stockage en jauge des boutures (stockage dans l'eau froide)
© Sébastien De Danieli

Le stockage peut être effectué en extérieur, sans nécessairement recourir à une chambre froide avec des options variées. Pour les sites en haute altitude avec une couverture neigeuse prolongée, une méthode efficace consiste à enterrer le matériel végétal à au moins 60 cm de profondeur dans la neige, en l'enveloppant dans une bâche réfléchissante (Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Venti et al., 2003; AMEC, 2012). D'autres options consistent à stocker les boutures dans de la glace, de la terre humide ou à les immerger directement dans de l'eau froide, appelé stockage en jauge (Figure IV-5) (Schiechtl, 1980; Gray & Sotir, 1996; Campbell et al., 2008; Pollock et al., 2019b). Cependant, il est crucial de maintenir l'eau à une température basse et circulante pour éviter le développement de maladies. Des températures élevées pourraient lever la dormance et favoriser la croissance (Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Venti et al., 2003). Une approche mixte consiste à immerger les boutures dans de l'eau froide à l'intérieur d'une chambre froide (Zuffi, 1989). Il est toutefois essentiel d'adopter cette méthode avec précaution, car bien que l'eau froide maintienne la dormance des végétaux, il existe un risque de moisissures ou de manque d'oxygène (Zuffi, 1989; Rousset et al., in prep).

La présence de rejets végétatifs ou des bourgeons débouffés sur les boutures indique la levée de la dormance durant le processus et le début de la croissance (Figure IV-6). Ces spécimens ne peuvent plus être maintenus en état de dormance et doivent donc être remplacés (Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Pollock et al., 2019b). Lorsque la dormance est levée, et en cas de développement de racines, il existe un risque important que celles-ci soient endommagées ou cisailées lors de la mise en terre (Pollock et al., 2019b). Les bourgeons ouverts et les tiges en formation épuisent prématurément les réserves de glucides et l'humidité de la bouture, ce qui peut entraîner le dessèchement des boutures après la mise en terre faute de réserves suffisantes. Dans tous les cas, si une bouture est identifiée comme endommagée, malade ou en début de croissance, il est impératif de la remplacer (AMEC, 2012).



Figure IV-7: Reprise des boutures pendant le stockage avec présence de rejets végétatifs © Luce Martin

4. Préparation du matériel végétal

Mise en jauge

Au préalable de la mise en terre, il est possible d'effectuer une mise en jauge, consistant à immerger les boutures dans de l'eau. Contrairement au stockage en jauge, qui se réalise avec de l'eau à basse température, la mise en jauge vise à réactiver les bourgeons dormants et à stimuler le développement des racines. Réalisé avec une eau à température ambiante, cela accélère le processus d'enracinement et de croissance à l'intérieur de la couche interne de l'écorce (Hoag, 1994; Eubanks & Meadows, 2002; Tilley & Hoag, 2008; Lezberg & Giordanengo, 2008; Pollock et al., 2019a). Cette étape s'applique aussi bien aux boutures stockées préalablement qu'à celles utilisées immédiatement. Une bouture qui a été trempée sort de dormance. En maintenant l'hydratation, le trempage vient favoriser le taux de reprise, renforce la vigueur et stimule la croissance des racines et des pousses (Zuffi, 1989; Eubanks & Meadows, 2002; Tilley & Hoag, 2008). Il est à noter que le trempage à l'automne en vue d'une mise en terre immédiate s'avère plus avantageux que le trempage au printemps (Tilley & Hoag, 2008). Schaff et al. (2002) montre notamment une multiplication par deux de la biomasse totale et du ratio racines/tiges avec un trempage de 10 jours par rapport à un contrôle. La mise en jauge entraîne également une multiplication par trois du nombre de racines, augmentant considérablement la surface racinaire pour une meilleure absorption d'eau et de nutriments. Toutefois, ces bénéfices semblent dépendant de l'état physiologique initial de la bouture, en dormance ou non par exemple (Pezeshki et al., 2005). Paradoxalement, bien que les bénéfices du trempage soient bien établis, cette pratique reste peu répandue en France, en particulier dans le contexte des travaux de restauration, contrairement au stockage en jauge qui est plus courant pour quelques jours entre le prélèvement et la mise en œuvre.

Pendant cette opération, il est important d'utiliser de l'eau courante ou de changer régulièrement l'eau pour éviter qu'elle ne stagne et ne devienne un vecteur de maladies (AMEC, 2012). Il n'existe pas de consensus sur la durée optimale du trempage, qui peut varier selon les conditions. Les recommandations varient d'environ 10 jours pour AMEC (2012) pour une application estivale à 5 jours pour une application printanière, voire 3 jours pour une application automnale, les boutures devant être immédiatement plantées après cette période de trempage. Eubanks & Meadows (2002) préconisent 24 heures, sans dépasser les 3 jours ; Baird et al. (2015) recommandent une période de 5 à 7 jours ; Schaff et al. (2002) optent pour 10 jours dans tous les cas, et Hoag, (1994) parle d'une

immersion de la partie inférieure de la bouture pendant 3 ou 5 jours tandis que Tilley & Hoag, (2008) suggèrent 14 jours. Pendant le trempage, il est possible de couvrir les boutures de bâches réfléchissantes, ce qui empêche leur reprise tout en les protégeant des animaux herbivores (AMEC, 2012). Les boutures peuvent être immergées dans des récipients étanches ou directement dans des cours d'eau ou des lacs, à condition que l'eau ne stagne pas, ou qu'elle soit régulièrement renouvelée dans les récipients (AMEC, 2012).

Recoupe

Avant la mise en terre des boutures, elles doivent être recoupées à la longueur appropriée, comme indiqué dans le *Tableau 24* (Schiechtl, 1980; Venti et al., 2003; Pollock et al., 2019a). La partie sommitale doit être coupée de manière perpendiculaire à la branche (coupe droite) ou en biseau pour le risque de stagnation d'eau à la surface de la bouture vecteur de maladies (Zuffi, 1989; AMEC, 2012). En revanche, la partie basale doit être recoupée en biseau ou en pointe pour faciliter son enfoncement dans le sol (Schiechtl & Stern, 1997; Zeh, 2000, 2007, 2010; Venti et al., 2003; Baird et al., 2015). Comme lors du prélèvement, cette coupe doit être réalisée avec un sécateur ou un ébrancheur bien affûté, en veillant à ce qu'elle soit nette et franche, sans écorchure, car une coupe imparfaite rendrait la reprise végétative plus difficile (Adam et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012).

Traitement

Certaines recommandations suggèrent l'utilisation d'hormones de croissance pour les espèces présentant un taux de reprise relativement faible (Schiechtl, 1980; Venti et al., 2003). Cependant, il est généralement préconisé de privilégier des espèces affichant un fort taux de reprise plutôt que de recourir aux hormones. L'utilisation de celles-ci n'est pas recommandée pour des espèces dont le taux de reprise est inférieur à 30 % (Schiechtl, 1980). Des tests démontrent que ces traitements n'affectent pas de manière significative l'enracinement des boutures de saules et de peupliers, ces espèces étant naturellement enclines à s'enraciner sans l'ajout d'hormones (Hoag, 1994; Rousset et al., in prep). Dans ce cas, l'utilisation de tels traitements pourrait entraîner une augmentation des coûts, de la main-d'œuvre et du temps nécessaire à la plantation, sans pour autant garantir un effet significatif.

Éléments annexes

La première année, les boutures de ligneux contribuent peu à la stabilisation des sols, car elles ne développent pas encore de racines pour maintenir le substrat par cohésion. La stabilité des talus et la protection de la surface du sol sont donc limitées, ne dépassant pas la profondeur à laquelle les boutures sont enfoncées (Lachat, 1994; Adam et al., 2008; Zeh, 2010). Durant la seconde années les biomasses racinaires et aériennes des boutures de saules peuvent être multipliées par 10 (Lavaine, 2013).

Sur les zones qui ont été récemment remaniées, il est courant d'utiliser des géotextiles biodégradables pour éviter l'érosion de la berge le temps que les plantes se développent (Adam et al., 2008) (*Figure IV-8*). Les géotextiles assurent ainsi une fonction de contrôle de l'érosion, limitent les fluctuations microclimatiques du sol (Dinger & Magnin, 1999), retiennent les graines et vont contribuer à la fertilité du sol en se dégradant. Les géotextiles peuvent être fabriqués à partir de toile, de treillis de jute, chanvre ou de coco (Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011). Le treillis coco est plus résistant à la dégradation et à la déchirure que le jute ou le chanvre en raison de sa plus grande teneur en lignine (Florineth & Molon, 2005). Cependant, il soulève également des questions environnementales quant à ces impacts, tout comme le jute (Kuntz, 2019)

L'installation du géotextile s'effectue avant la mise en place des boutures, en le fixant avec des agrafes en fer à béton ou des agrafes en bois ; ces dernières formant une alternative plus respectueuse de l'environnement. Les lés de géotextiles sont disposés en commençant par la base de la berge, parallèlement au sens d'écoulement du cours d'eau (Biotec, 2011). Les surfaces couvertes de géotextiles et bouturées sont presque invariablement ensemencées pour établir une couverture herbacée qui protège la surface du sol. À moindre échelle que les boutures associées aux jeunes plants, les herbacées peuvent présenter des risques de compétition, étant donné que ces espèces ont généralement un effet compétitif élevé sur les jeunes boutures. Il peut être judicieux de restreindre la densité du semis et de surveiller attentivement son développement (Bonin et al., 2013; Schoonmaker, 2021).

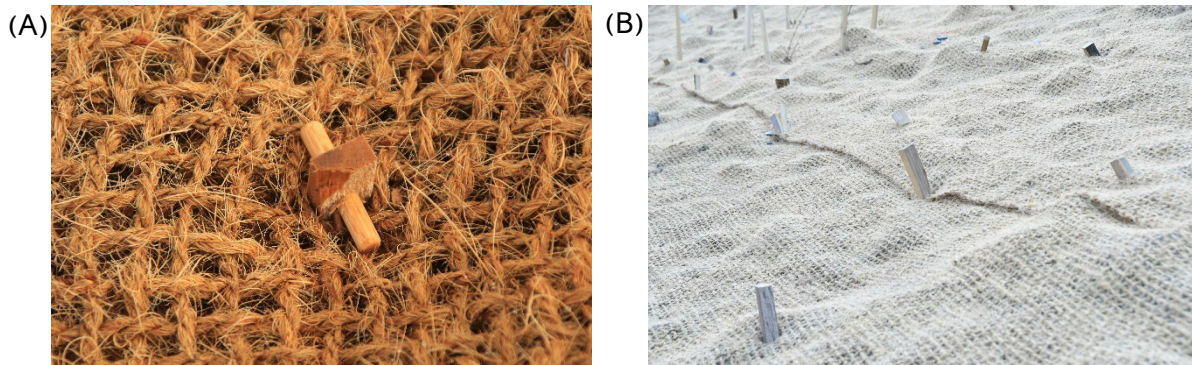


Figure IV-8: (A) Agrafes en bois sur géotextile © Pierre-André Frossard (B) Géotextile de toile de coco fixé par des piquets en bois © Luce Martin

5. Mise en terre des boutures

Période

Plusieurs auteurs recommandent la plantation juste avant le printemps afin d'éviter le stress lié à la chaleur estivale, au manque d'eau et aux maladies, tout en éliminant le besoin de stockage (Schiechtl, 1980; Schiechtl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; Florineth & Molon, 2005; Campbell et al., 2008; Richet et al., 2017; Pollock et al., 2019a). Cependant, la plantation en automne présente des avantages, notamment en limitant au maximum les impacts des crues au moment du chantier et en offrant une meilleure protection contre les crues printanières, typiques des régimes nivaux. Que ce soit pour des cours d'eau à régime nivaux ou pluviaux (majoritaires en France), la plantation devra préférentiellement être effectuée en automne. En effet, les boutures ayant eu le temps de s'installer pendant l'hiver et avant le printemps sont généralement mieux adaptées aux conditions du site une fois la saison de croissance débutée, favorisant ainsi le succès de l'ouvrage et une croissance plus robuste. La plantation à l'automne encourage une croissance précoce par rapport aux plantes adventices.

Technique

Une fois les boutures préparées et traitées, elles sont prêtes à être mises en terre. Pour simplifier cette étape, et éviter que l'écorce des boutures soit abîmée (la partie vivante de celle-ci se trouve à sa périphérie), il est courant de préparer les trous au préalable selon l'orientation souhaitée pour les boutures (Zuffi, 1989; Schiechl & Stern, 1997; Zeh, 2000, 2007, 2010). Ces trous sont généralement réalisés en utilisant une pointe en métal, telle qu'une barre à mine, enfoncée à l'aide d'un marteau (Figure IV-8) (Schiechl, 1980; Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Schiechl & Stern, 1996, 1997; Zeh, 2000, 2007, 2010; Eubanks & Meadows, 2002; Venti et al.,



Figure IV-9: Création du pré-trou à l'aide (A) d'une barre en métal et, (B) d'une pointe en métal et d'un maillet © Luce Martin

2003; Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; Pollock et al., 2019a). En cas de sol compact ou argileux, l'utilisation d'une tarière peut également s'avérer nécessaire (Pollock et al., 2019a). Bien que d'autres outils puissent être employés, la barre en métal reste l'option la plus courante (Tableau 25). Il est essentiel que le diamètre de ces trous soit légèrement inférieur à celui des boutures, pour garantir un contact optimal entre la bouture nouvellement plantée et le sol (Adam et al., 2008; Biotec, 2011; Campbell et al., 2008; Lachat, 1994; Pollock et al., 2019a). Une autre approche consiste à creuser des trous dont le diamètre est légèrement supérieur à celui des boutures, ce qui permet une insertion sans dommage. Ensuite, la différence de diamètre est comblée par la terre et tassée pour assurer un bon contact entre la bouture et le sol (Eubanks & Meadows, 2002). Dans ce dernier cas, on risque néanmoins de laisser des poches d'air préjudiciables au contact de la bouture (voir ci-après). Le battage direct sans pré-trou est également possible dans les substrats meubles, ce qui est fréquent sur des surfaces remblayées.

Tableau 6: Diversité des techniques de mise en terre des boutures dans la littérature

Outil	Main	Hoag (1994)
	Barre à mine / pointe en métal	Zuffi, (1989); Hoag (1994); Lachat (1994); Schiechl & Stern, (1996, 1997); Zeh (2000, 2010); Venti et al. (2003); Adam et al. (2008); Campbell et al. (2008); Pollock et al. (2019a)
	Tarière	Hoag (1994); Pollock et al. (2019a)
	Perçeuse	Schiechl & Stern (1997)
	Pique	Schiechl (1980); Zuffi (1989)
	Buse de jet d'eau	Eubanks & Meadows (2002)
	Pelle à planter	Hoag (1994); Eubanks & Meadows (2002)
	Grand pied de biche	Schiechl (1980)
Angle de plantation	Verticalement (selon l'horizon)	Zeh (2000, 2007, 2010)
	Perpendiculairement (à la surface du sol)	Zuffi (1989); Lachat (1994); Donat (1995); Eubanks & Meadows (2002); Zeh (2007, 2010); Adam et al. (2008)
	En biais (45° par rapport à l'horizon)	Zeh, (2000, 2007, 2010); Campbell et al. (2008)

Tableau 25 (suite) : Diversité des techniques de mise en terre des boutures dans la littérature

Diamètre	Plus petit que celui de la bouture	Lachat (1994); Adam et al. (2008); Campbell et al. (2008); SM3A (2011); Biotec (2011); Pollock et al. (2019a)
	Plus grand que celui de la bouture	Eubanks & Meadows (2002)
Densité	1 à 3 pièces/m ²	Zeh (2000, 2010)
	2 à 3 pièces par m ²	Adam et al. (2008)
	2 à 4 pièces par m ²	Campbell et al. (2008)
	4 pièces par m ²	SM3A (2011)
	2 à 5 pièces par m ²	Schiechtl (1980); Zuffi (1989); Lachat (1994); Schiechtl & Stern (1996, 1997)
	2 à 10 pièces par m ²	Donat (1995)

Les boutures sont plantées avec leurs bourgeons dirigés vers le ciel pour suivre l'orientation naturelle des organes vers la lumière (Lachat, 1994; Donat, 1995; Schiechtl & Stern, 1997; Zeh, 2000, 2010; Eubanks & Meadows, 2002; Venti et al., 2003; Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011; Pollock et al., 2019a). Elles sont enfoncées entre 3/4 et 4/5 de leur longueur dans les pré-trous avec un angle de plantation de préférence perpendiculaire par rapport à la surface du sol (Zuffi, 1989; Lachat, 1994; Donat, 1995; Eubanks & Meadows, 2002; Zeh, 2007, 2010; Adam et al., 2008). Cette profondeur favorise un meilleur rapport racines/tiges, prévient le dessèchement et réduit le risque d'emportement en cas de crues importantes (Schiechtl, 1980; Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Zeh, 2000, 2010; Eubanks & Meadows, 2002; Venti et al., 2003; Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; Baird et al., 2015).



Figure IV-10: Mise en terre des boutures à l'aide (A) du pied et, (B) d'un maillet © Luce Martin

Les boutures sont généralement plantées à l'aide d'un marteau, d'un maillet, ou plus exceptionnellement avec le pied si le sol le permet et sans que cela ne constitue une méthode à part entière (Figure IV-9) (Schiechtl, 1980; Schiechtl & Stern, 1997; Eubanks & Meadows, 2002; Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008). L'objectif est de minimiser les dommages aux boutures, en préservant au maximum l'écorce, bien que des dommages mineurs à l'extrémité supérieure soient inévitables. Il est

recommandé d'utiliser un maillet en bois pour réduire les risques (Venti et al., 2003). Cependant, l'utilisation d'outils comporte le risque de fendre, écraser ou endommager excessivement la bouture (Figure IV-10) (Schiechtl & Stern, 1997; Eubanks & Meadows, 2002). Il est possible de protéger l'extrémité en plaçant un morceau de tube métallique dessus (Schiechtl & Stern, 1997). Si nécessaire, l'extrémité peut être recoupée perpendiculairement ou en biseau à la branche après la plantation pour assurer une extrémité propre et éviter l'entrée de phytophages ou de champignons (Figure IV-11) (Hoag, 1994; Schiechtl & Stern, 1997; Zeh, 2000, 2007, 2010; Venti et al., 2003; Baird et al., 2015).



Figure IV-11: Bouture fendue lors de la mise en terre © Luce Martin

Un aspect essentiel pour le succès des boutures est d'assurer un bon contact avec le substrat tout en évitant la formation de poches d'air. Il est donc crucial de comprimer le sol autour des branches et de légèrement tasser la terre pour éliminer les poches d'air (Zuffi, 1989; Hoag, 1994; Lachat, 1994; Schiechtl & Stern, 1996; Gray & Sotir, 1996; Zeh, 2000, 2010; Eubanks & Meadows, 2002; Adam et al., 2008; Campbell et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012; Baird et al., 2015). Lors de cette opération, il est essentiel de maintenir fermement la bouture pour réduire les mouvements latéraux, qui pourraient agrandir le trou et empêcher certaines parties de la bouture d'être en contact avec le sol. L'utilisation d'un marteau pour tasser délicatement la terre tout autour de la bouture peut aider à garantir un remplissage adéquat du trou, tout en veillant à ne pas compacter excessivement le sol pour maintenir une bonne oxygénation des boutures. Si le trou s'avère trop large, il est recommandé d'ajouter du sable ou de la boue pour caler la branche et éliminer les poches d'air (Schiechtl, 1980; Schiechtl & Stern, 1996; Venti et al., 2003; Adam et al., 2008; Pollock et al., 2019a). Si nécessaire, l'utilisation d'engrais ou d'amendements peut être bénéfique pour stimuler la croissance et la reprise des boutures, mais cela n'est pas obligatoire et rarement réalisé dans la pratique. Il est essentiel de contrôler les doses, notamment à proximité des cours d'eau, et de faire preuve de vigilance quant aux provenances. Les saules se contentent bien de substrats pauvres, bien qu'un substrat plus riche favorise un meilleur développement (Venti et al., 2003; Campbell et al., 2008; AMEC, 2012).



Figure IV-12: Recoupe de la bouture suite à la mise en terre © Sarah Menoli

En ce qui concerne le placement des boutures, il est important de les positionner légèrement au-dessus du niveau moyen du cours d'eau, à déterminer en amont des travaux par une étude hydrologique (Frossard, 2011). Si elles sont placées trop bas sur la berge, elles risquent d'être constamment submergées, tandis qu'un positionnement trop élevé les exposerait à un assèchement excessif (Watson et al., 1997; Venti et al., 2003; Pezeshki et al., 2007; Lavaine, 2013; Baird et al., 2015). Cependant, il est essentiel de noter que certaines espèces possèdent des capacités naturelles pour résister à l'immersion ou à l'assèchement. Dans de tels cas, une implantation en milieu ou en haut de berge peut être envisagée. Pour un aspect plus naturel, il est recommandé de planter les boutures de manière irrégulière, par exemple en triangle, plutôt qu'en rangées (Schiechtl, 1980; Schiechtl & Stern, 1996, 1997; Eubanks & Meadows, 2002; Campbell et al., 2008). Une densité de plantation de 2 à 3

boutures par mètre carré est généralement conseillée, mais elle peut être supérieure (Tableau 16). Des densités élevées (> 3 pièces/m²) sont recommandées lorsque la stabilité de la berge dépend principalement du bouturage et/ou lorsque l'aménagement vise également à limiter le développement de plantes invasives. En cas d'incertitude quant à l'organisation de la plantation, il est possible de s'inspirer de la disposition naturelle des saules et d'autres éléments de la ripisylve pour créer un modèle intégré de manière harmonieuse à l'environnement.

Un guide visuel complet sous forme de schéma illustrant les étapes successives pour la mise en terre efficace d'une bouture en bordure de cours d'eau est présenté à la Figure IV-13.

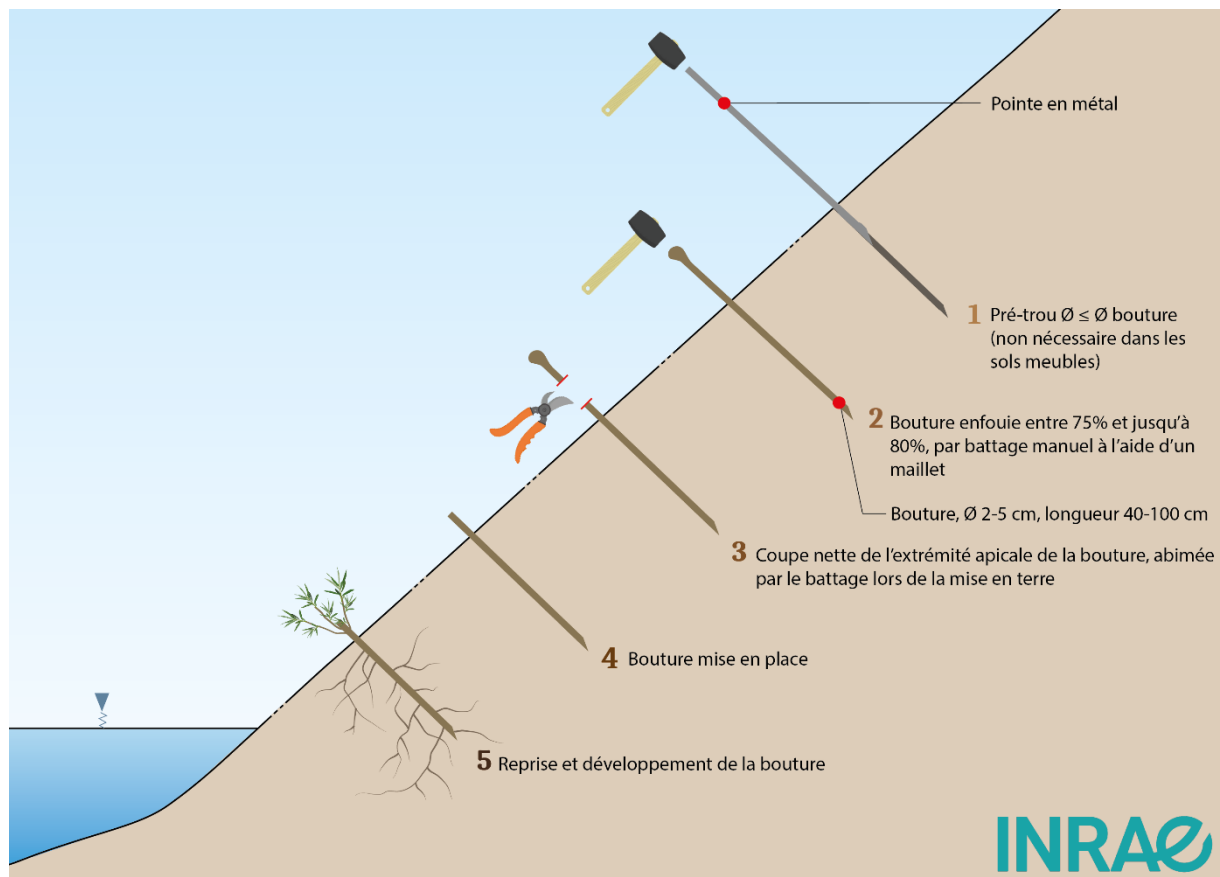


Figure IV-13: Guide visuel de la mise en terre efficace d'une bouture à l'aide d'un maillet, modifié depuis Lachat, 1994 et Hepia

6. Entretien et suivi de l'ouvrage

Les premières années suivant la réalisation d'un ouvrage de génie végétal revêtent une importance cruciale, car elles conditionnent le succès à long terme de l'aménagement. Durant cette phase initiale, les plantations et les structures végétales se trouvent exposées à différentes pressions, menaces et aux conditions environnementales. Le suivi de cette période permet d'évaluer la croissance et la santé des végétaux, de détecter tout signe de stress ou d'échec de la reprise végétale, et d'apporter les ajustements nécessaires par le biais de mesures correctives précoces.

Bien que la conception initiale vise à minimiser les opérations futures de soins et d'entretien des aménagements végétaux, l'absence de suivi au cours des premières années après les travaux peut conduire à des échecs potentiels (Pezeshki et al., 2007; Adam et al., 2008; Biotec, 2011; Peeters et al., 2018). Ces situations peuvent comprendre des installations récentes souffrant des effets de conditions

climatiques inhabituelles, telles que des périodes soudaines de sécheresse, sans irrigation. Il peut également s'agir de zones végétalisées broutées par des herbivores, subitement envahies par des espèces indésirables qui ne sont pas éliminées, de jeunes arbustes perturbés par les crues et non redressés immédiatement, ou encore de déchets et de bois flottants déposés sur des berges nouvellement végétalisées lors de la décrue, mais non évacués. Il est ainsi primordial de veiller au bon développement des boutures via une gestion régulière, a minima les trois premières saisons végétatives avec plusieurs interventions par an (Eubanks & Meadows, 2002; Adam et al., 2008; Biotec, 2011; AMEC, 2012; Peeters et al., 2018). Cette période est effectivement suffisante pour permettre aux végétaux implantés d'atteindre une parfaite autonomie et de répondre aux objectifs qui ont motivé la réalisation des aménagements.

Tableau 7: Principales menaces et pressions sur les ouvrages récemment réalisés, les mesures associées et leur fréquence

Menaces et pressions		Mesures à prendre	Fréquence
Activités anthropiques	Abrouissement, piétinement, dégradation, etc.	Mise en place de protection physique (clôtures, protection, etc.)	Une fois, à retirer dès que les boutures sont suffisamment développées
Conditions climatiques inhabituelles	Sécheresse	Arrosage les premières années	Selon les besoins, particulièrement pendant les périodes sèches
	Crues et leurs conséquences	Réparation des dégâts, remplacement des végétaux morts, retrait des débris, redressement des jeunes arbustes	Ponctuellement à l'évènement
Problèmes de croissance végétale	Mauvaise reprise, maladies, etc.	Remplacement des boutures n'ayant pas repris, des boutures malades, etc.	En fonction des observations et besoins. Visites régulières au cours des premières années
Compétition	Avec espèces exotiques envahissantes	Gestion ou élimination	Selon l'apparition et le développement des concurrents
	Avec d'autres ligneux ou herbacées	Fauchage ou désherbage sélectif	Dès que nécessaire, généralement une à deux fois par an

Pour anticiper au mieux les pressions et menaces pouvant affecter les ouvrages, le Tableau 7 répertorie les principales contraintes. Ces matériaux vivants ont été soumis à diverses exigences, de leur prélèvement jusqu'à leur plantation. Bien que les cas d'arrosage demeurent rares, il est possible d'arroser régulièrement les boutures au cours des premières années ou de mettre en place un système d'irrigation afin de favoriser la reprise végétative immédiate après la réalisation de l'ouvrage (Leblois et al., 2022). Cette pratique s'avère particulièrement utile dans les situations de plantation tardive au printemps. Les boutures qui n'auront pas repris devront être impérativement remplacées (Zuffi, 1989; Venti et al., 2003). Si nécessaire, les espèces exotiques envahissantes ainsi que les plantes adventices pourront être éliminées pour ne pas représenter une concurrence pour les jeunes boutures et un traitement contre d'éventuelles maladies devra être effectué sur les boutures qui en ont besoin (Schiechtl, 1980; Biotec, 2011; AMEC, 2012). Une opération de fauchage sélectif et/ou de désherbage peut également être réalisée au cours de la première année, dans l'idée de réduire la compétition avec d'éventuelles repousses ligneuses (Adam et al., 2008; AMEC, 2012). Dans la pratique, c'est une opération qui reste difficile et qui comporte un risque élevé d'endommagement des boutures, compte tenu des densités de plantation généralement pratiquées. Enfin, une surveillance accrue doit être effectuée concernant le régime hydrologique, que ce soit lors des périodes d'étiage au printemps ou à l'automne, en période de crue lors d'épisodes de débit important, ou encore en cas d'embâcle (AMEC,

2012). Ces évènements peuvent en effet causer des dégâts considérables, voire même détruire l'ouvrage. De l'érosion, de l'affouillement, des pertes de matériaux, des pertes de végétation, des débris ou encore des dégâts dû aux herbivores sont possibles. Un suivi permettra de nettoyer le site après chaque crue, évacuer en un lieu de décharge approprié les déchets accumulés, remplacer les végétaux ayant été déracinés ou endommagés, puis éventuellement ensemercer certaines surfaces lessivées afin d'assurer une protection rapide des sols mis à nu. Les érosions doivent en effet être traitées dès leur apparition pour éviter une destruction complète de l'ouvrage (Leblois et al., 2022). Une fois la reprise amorcée, les individus peuvent être taillés, favorisant le développement racinaire et la production de tiges souples de meilleure qualité (Schiechtl & Stern, 1997; Leblois et al., 2022).

Plus globalement, à l'échelle de l'ouvrage, il est recommandé de mettre en place des protections telles que des clôtures autour de l'ouvrage en attendant que les boutures atteignent une taille suffisante afin de réduire le risque d'abrutissement ou de piétinement (AMEC, 2012; Breton et al., 2014). En effet, le castor d'Europe (*Castor fiber*), ainsi que le ragondin (*Myocastor coypus*), un rongeur aquatique exotique envahissant, se nourrissent principalement de plantes ligneuses, montrant un intérêt particulier pour les *Salicaceae* (Evette et al., 2009; Breton et al., 2014). Leur activité nuit à la régénération de la végétation naturelle et peut endommager les berges. Les boutures sont également vulnérables à la consommation par des ruminants, des chevaux ou d'autres herbivores sauvages (Newsholme, 1992).

Ce suivi après la mise en œuvre est réalisable par les entreprises mandataires uniquement lorsque les garanties et les modalités de suivi des aménagements ont été clairement établies dans le cahier des charges des travaux.

7. Coûts

Souvent qualifiée comme la technique de génie végétal la plus simple et la plus économique, le coût des boutures varie selon plusieurs facteurs, dépendant par exemple de la région, de la quantité de boutures, la proximité des branches prélevées, la distance, l'utilisation ou non de géotextile, etc. Actuellement, le coût d'une bouture, incluant à la fois le matériel et la mise en terre, est estimé à quelques euros par unité (Tableau 26).

En termes de temps, Zuffi, (1989) estime qu'une minute est nécessaire pour planter une bouture. Cependant, il est important de noter que cette estimation ne prend pas en compte le temps requis pour le prélèvement et le transport. Donat (1995) évoque une fourchette de 50 secondes à 6 minutes par bouture, avec un rendement de 5 à 7 m² par heure. En revanche, Schiechtl (1980) estime que l'ensemble du processus, incluant le prélèvement, le transport, et la mise en terre d'une bouture, requiert de 2,5 à 6 minutes, ou encore 5 min par unité pour Zeh (2007). Il est essentiel de souligner que cette durée varie en fonction de nombreux facteurs, notamment les conditions spécifiques du site. En résumé, du prélèvement à la mise en terre des boutures, plusieurs minutes de travail sont nécessaires, avec un temps plus long si des étapes de stockage et de transport des boutures sont incluses.

Tableau 8: Coûts au cours du temps des boutures et de leur mise en terre dans la littérature (sans éléments annexes tels que le géotextile, les clôtures, etc.)

Coût du matériel végétal et de la mise en terre	Sources
3 à 5 euros/pièce	Zeh (2007)
1 à 3 euros HT/pièce	Adam et al. (2008)
1 à 5 euros HT/pièce	Bonin et al. (2013)
1 euro/pièce	COUDERT (2012)
2,5 euros/pièce	L'atelier des Territoires (2018)
4 à 5 euros HT/pièce	SM3A (2023)

Conclusion

Si ce 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. Il doit être utilisé de manière intelligente et réfléchie. 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.

Même si le bouturage représente la technique de génie végétal relativement la plus économique et la plus facile à mettre en place, elle ne doit être utilisée 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 de milieux 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.

Références

- Adam, P., Debais, 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, Éd.). MEDDE.
- AMEC. (2012). *Design guidelines for erosion and flood control projects for streambank and riparian stability restoration* (AMEC Environment & Infrastructure CW2098). The City of Calgary, Water Resources.
- Amlin, N. A., & Rood, S. B. (2001). Inundation Tolerances of Riparian Willows and Cottonwoods. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(6), 1709-1720.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03671.x>
- Amlin, N. M., & Rood, S. B. (2002). Comparative tolerances of riparian willows and cottonwoods to water-table decline. *Wetlands*, 22(2), 338-346.
[https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2002\)022\[0338:CTORWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2002)022[0338:CTORWA]2.0.CO;2)
- Argus, G. W. (1997). Infrageneric Classification of Salix (Salicaceae) in the New World. *Systematic Botany Monographs*, 52, 1-121.
<https://doi.org/10.2307/25096638>
- Arizpe, D., Mendes, A., & Rabaça, J. E. (2008). *Sustainable Riparian Zones—A management guide*. Generalitat Valenciana, España.
<https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/6864>
- Aronsson, P., & Perttu, K. (2001). Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *The Forestry Chronicle*, 77(2), 293-299.
<https://doi.org/10.5558/tfc77293-2>
- Bailey-Serres, J., & Voisenek, L. A. C. J. (2008). Flooding Stress: Acclimations and Genetic Diversity. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 313-339.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092752>
- 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.
- Balian, E. V., Segers, H., Martens, K., & Lévêque, C. (2008). The Freshwater Animal Diversity Assessment: An overview of the results. In E. V. Balian, C. Lévêque, H. Segers, & K. Martens (Éds.), *Freshwater Animal Diversity Assessment* (p. 627-637). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8259-7_61
- Barnes, W. J. (1985). Population dynamics of woody plants on a river island. *Canadian Journal of Botany*, 63(3), 647-655. <https://doi.org/10.1139/b85-081>
- Bergou, N., Hammoud, R., Smythe, M., Gibbons, J., Davidson, N., Tognin, S., Reeves, G., Shepherd, J., & Mechelli, A. (2022). The mental health benefits of visiting canals and rivers: An ecological momentary assessment study. *PLOS ONE*, 17(8), e0271306.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271306>
- Bigham, K. A. (2020). *Streambank Stabilization Design, Research, and Monitoring: The Current State and Future Needs*.
<https://doi.org/10.13031/trans.13647>
- Bill, H. C., Spahn, P., Reich, M., & Plachter, H. (1997). Bill, H. C., Spahn, P., Reich, M.,

- & Plachter, H. (1997). The distribution and patch dynamics of the German tamarisk *Myricaria germanica* (L) Desv, in the upper River Isar, Bavaria. *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz*, 6(3), 137-150.
- 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).
- Blom, C. W. P. M., & Voeselek, L. a. C. J. (1996). Flooding : The survival strategies of plants. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(7), 290-295. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(96\)10034-3](https://doi.org/10.1016/0169-5347(96)10034-3)
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., ... Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 7772. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Bonicel, A., Haddad, G., & Gagnaire, J. (1987). Seasonal variations of starch and major soluble sugars in the different organs of young poplars. *Seasonal variations of starch and major soluble sugars in the different organs of young poplars*, 25(4), 451-459.
- 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>
- Boyer, M., Popoff, N., & Piton, G. (2023). *La gestion de la végétation dans le cadre de la compétence GEMAPI*.
- Breton, V., Forestier, O., Guindon, O., & Evette, A. (2014). Ecological Restoration Under Pressure from Invasive Animal Species : Use of Salicaceae Cuttings in a River Bank Overrun by Coypu. *River Research and Applications*, 30(8), 1002-1012. <https://doi.org/10.1002/rra.2688>
- Brock, J. H. (1994). Tamarix spp. (Salt Cedar), an Invasive Exotic Woody Plant in Arid and Semi-arid Riparian Habitats of Western USA. *Ecology and Management of Invasive Riverside Plants*, 4, 28-44.
- Campbell, S. D. G., Shaw, R., Sewell, R. J., & Wong, J. C. F. (2008). *Guidelines for soil bioengineering applications on natural terrain landslide scars*. 227.
- Carleton, M. A. (1914). Adaptation of the Tamarisk for Dry Lands. *Science*, 39(1010), 692-694. <https://doi.org/10.1126/science.39.10.692.b>
- Carlson, M. C. (1950). Nodal Adventitious Roots in Willow Stems of Different Ages. *American Journal of Botany*, 37(7), 555-561. <https://doi.org/10.2307/2438033>
- Catford, J. A., & Jansson, R. (2014). Drowned, buried and carried away : Effects of plant traits on the distribution of native and alien species in riparian ecosystems. *New Phytologist*, 204(1), 19-36. <https://doi.org/10.1111/nph.12951>
- Chase, J. M., Blowes, S. A., Knight, T. M., Gerstner, K., & May, F. (2020). Ecosystem decay exacerbates biodiversity loss with habitat loss.

- Nature*, 584(7820), 7820.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2531-2>
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., & Lacaze, X. D. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, 4, 4.
<https://doi.org/10.1051/lhb/2013027>
- Chauvet, E., & Jean-Louis, A.-M. (1988). Production de litière de la ripisylve de la Garonne et apport au fleuve. *Acta Oecologica, Oecologia Generalis*, 9(n° 3), 265-279.
- Chen, F.-Q., & Xie, Z.-Q. (2009). Survival and growth responses of *Myricaria laxiflora* seedlings to summer flooding. *Aquatic Botany*, 90(4), 333-338.
<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.12.006>
- Christersson, L., Sennerby-Forsse, L., & Zsuffa, L. (1993). The role and significance of woody biomass plantations in Swedish agriculture. *The Forestry Chronicle*, 69(6), 687-693.
<https://doi.org/10.5558/tfc69687-6>
- Clark, J., & Hellin, J. (1996). *Bio-engineering for effective road maintenance in the Caribbean*. Natural Resources Institute (NRI).
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19971901164>
- Clément, J.-C., Holmes, R. M., Peterson, B. J., & Pinay, G. (2003). Isotopic investigation of denitrification in a riparian ecosystem in western France. *Journal of Applied Ecology*, 40(6), 1035-1048.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2003.00854.x>
- Cleverly, J. R., Smith, S. D., Sala, A., & Devitt, D. A. (1997). Invasive capacity of *Tamarix ramosissima* in a Mojave Desert floodplain: The role of drought. *Oecologia*, 111(1), 12-18.
<https://doi.org/10.1007/s004420050202>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. *IUCN: Gland, Switzerland*, 97, 2016-2036.
- Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., & Gurnell, A. M. (2007). Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84(1), 56-86.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>
- COUDERT. (2012). *Travaux de restauration de la rivière Artière sur le site de Crouel—Marché public de travaux (Clermont communauté)*.
- Cram, W. H., & Lindquist, C. H. (1982). Refrigerated storage for hardwood cuttings of Willow and Poplar. In *Tree Planters' Notes*. The Service.
- Crawley, M. J. (1997). *Plant Ecology*. John Wiley & Sons.
- Da Costa, C., De Almeida, M., Ruedell, C., Schwambach, J., Maraschin, F., & Fett-Neto, A. (2013). When stress and development go hand in hand: Main hormonal controls of adventitious rooting in cuttings. *Frontiers in Plant Science*, 4.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2013.00133>
- Datry, T., Boulton, A. J., Bonada, N., Fritz, K., Leigh, C., Sauquet, E., Tockner, K., Hugué, B., & Dahm, C. N. (2018). Flow intermittence and ecosystem services in rivers of the Anthropocene. *Journal of Applied Ecology*, 55(1),

- 353-364.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12941>
- Décamps, H. (1996). The renewal of floodplain forests along rivers : A landscape perspective. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03680770.1995.11900692>
- Décamps, H. (2002). Du bon usage des ripisylves. *La Houille Blanche*, 88:3, 49-53.
- Décamps, H., Gazelle, F., & Pautou, G. (1988). *Historical influence of man on the riparian dynamics of a fluvial landscape*. 1, 163-173.
- Décamps, H., Pinay, G., Naiman, R. J., Petts, G. E., McClain, M. E., Hillbricht-Ilkowska, A., Hanley, T. A., Holmes, R. M., Quinn, J., Gibert, J., Planty-Tabacchi, A. M., Schiemer, F., Tabacchi, E., & Zalewski, M. (2004). Riparian zones : Where biogeochemistry meets biodiversity in management practice. *Polish Journal of Ecology*, 52(1), 1.
- de Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., ... Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100.
<https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Didier, M., Evette, A., Schmitt, E., Leblois, S., Jaymond, Delphine, Evette, J.-B., Mira, E., Raymond, P., & Frossard, P.-A. (2023). *Les fascines de ligneux en génie végétal, guide technique en partenariat avec l'OFB*.
https://genibiodiv.inrae.fr/wp-content/uploads/Les_fascines_de_ligneux_INRAE_OFB.pdf
- Dinger, F., & Magnin, V. (1999). Micro-climatologie du sol sous toile de jute : Exemple d'un talus de route de montagne. *Sciences Eaux & Territoires, Spécial Ingénieries-EAT-10, Spécial Ingénieries-EAT-10*.
- Dommanget, F., Evette, A., Breton, V., Daumergue, N., Forestier, O., Poupart, P., Martin, F.-M., & Navas, M.-L. (2019). Fast-growing willows significantly reduce invasive knotweed spread. *Journal of Environmental Management*, 231, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.004>
- Donat, M. (1995). *Bioengineering techniques for streambank restoration. A review of Central European practices* (Watershed Restoration Project Report No. 2). Ministry of Environment, Lands and Parks and Ministry of Forests.
- Druart, P., Husson, C., & Paul, R. (2013). *Renaturation des berges de cours d'eau et phytoremédiation*. Presses Agronomiques de Gembloux.
- Druege, U., Hilo, A., Pérez-Pérez, J. M., Klotek, Y., Acosta, M., Shahinnia, F., Zerche, S., Franken, P., & Hajirezaei, M. R. (2019). Molecular and physiological control of adventitious rooting in cuttings : Phytohormone action meets resource allocation. *Annals of Botany*,

- 123(6), 929-949.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcy234>
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D. J., Lévêque, C., Naiman, R. J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, M. L. J., & Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81(2), 163-182. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>
- Dufour, S., & Piégay, H. (2006). Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves : Spécificités, fonctions et gestion. *Revue forestière française*, 58(4), 339-350. <https://doi.org/10.4267/2042/6704>
- Dufour, S., Rodríguez-González, P. M., & Laslier, M. (2019). Tracing the scientific trajectory of riparian vegetation studies : Main topics, approaches and needs in a globally changing world. *Science of The Total Environment*, 653, 1168-1185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.383>
- Dušek, J., & Květ, J. (2006). Seasonal dynamics of dry weight, growth rate and root/shoot ratio in different aged seedlings of *Salix caprea*. *Biologia*, 61(4), 441-447. <https://doi.org/10.2478/s11756-006-0074-0>
- Eggenberg, S., & Möhl, A. (2008). *Flora vegetativa : Un guide pour déterminer les plantes de Suisse à l'état végétatif*. (Rossolis).
- Ernst, W. H. O. (1990). Ecophysiology of plants in waterlogged and flooded environments. *Aquatic Botany*, 38(1), 73-90. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(90\)90099-7](https://doi.org/10.1016/0304-3770(90)90099-7)
- Eubanks, C., & Meadows, D. (2002). *A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization*. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Technology and Development Program.
- Everitt, B. L. (1980). Ecology of saltcedar—A plea for research. *Environmental Geology*, 3(2), 77-84. <https://doi.org/10.1007/BF02473474>
- Evette, A. (2017). *Ingénierie écologique pour la restauration des berges de rivières : Adaptation de techniques ancestrales aux nouveaux défis d'un monde en transition* [Mémoire établi en vue de l'obtention d'une Habilitation à Diriger des Recherches de l'EDISCE].
- Evette, A., Balique, C., Lavaine, C., Rey, F., & Prunier, P. (2012). Using Ecological and Biogeographical Features to Produce a Typology of the Plant Species Used in Bioengineering for Riverbank Protection in Europe. *River Research and Applications*, 28(10), 1830-1842. <https://doi.org/10.1002/rra.1560>
- Evette, A., Breton, V., Forestier, O., Lavaine, C., & Lemoine, G. (2009). *Les saules utilisés en génie végétal*. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6474720c79cbb2c2c1b226bd>
- 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 bénéfices. *Comprendre pour agir*. <https://hal.science/hal-04102067>
- Faber, R. (2004). *New techniques for urban river rehabilitation. Specifications for new materials and techniques improve instream morphology soil-bioengineering*. IWHW-BOKU.

- Fernandes, J. P., & Guiomar, N. (2018). Nature-based solutions : The need to increase the knowledge on their potentialities and limits. *Land Degradation & Development*, 29(6), 1925-1939. <https://doi.org/10.1002/ldr.2935>
- Florineth, F., & Molon, M. (2005). *Dispensa di ingegneria naturalistica* (Università di Bodenkultur. Istituto di ingegneria Naturalistica e Costruzione del Paesaggio).
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>
- Frossard, P. A. (2011). *Techniques de génie végétal applicables en rivière de montagne* [Association Rivière Rhône-Alpes Auvergne - ARRA2]. <https://www.araa.org/journees-techniques/techniques-de-genie-vegetal-applicables-en-riviere-de-montagne>
- Frossard, P.-A., & Evette, A. (2009). *Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : Une tradition millénaire en constante évolution*.
- García, R., & Jáuregui, D. (2020). Morphoanatomical characteristics in Riparian vegetation and its adaptative value. In *River Basin Management : Sustainability Issues and Planning Strategies* (IntechOpen). BoD – Books on Demand.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2), 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis. A guide to the World's Fresh Water Resources* (Oxford Univ. Press.).
- Glenz, C., Schlaepfer, R., Iorgulescu, I., & Kienast, F. (2006). Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. *Forest Ecology and Management*, 235(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.065>
- Glynn, C., Herms, D. A., Orians, C. M., Hansen, R. C., & Larsson, S. (2007). Testing the growth-differentiation balance hypothesis : Dynamic responses of willows to nutrient availability. *New Phytologist*, 176(3), 623-634. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02203.x>
- Graf, C., Böll, A., & Graf, F. (2003). Des plantes pour lutter contre l'érosion et les glissements en surface. *Not. prat.*
- Graf, W. L. (1978). Fluvial adjustments to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. *GSA Bulletin*, 89(10), 1491-1501. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<1491:FATTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<1491:FATTSO>2.0.CO;2)
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization : A practical guide for erosion control*. John Wiley and Sons, Inc.
- Gregory, S. V., Swanson, F. J., McKee, W. A., & Cummins, K. W. (1991). An Ecosystem Perspective of Riparian Zones. *BioScience*, 41(8), 540-551. <https://doi.org/10.2307/1311607>
- Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., Babu, S., Borrelli, P., Cheng, L., Crochetiere, H., Ehalt Macedo, H., Filgueiras, R., Goichot, M., Higgins, J., Hogan, Z., Lip, B., McClain, M. E., Meng, J., Mulligan, M., ... Zarfl, C. (2019). Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 569(7755), 7755. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>

- Gurnell, A. M., Bertoldi, W., & Corenblit, D. (2012). Changing river channels : The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111(1), 129-141.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.005>
- Gurnell, A. M., Corenblit, D., García de Jalón, D., González del Tánago, M., Grabowski, R. C., O'Hare, M. T., & Szewczyk, M. (2016). A Conceptual Model of Vegetation–hydrogeomorphology Interactions Within River Corridors. *River Research and Applications*, 32(2), 142-163.
<https://doi.org/10.1002/rra.2928>
- Gurnell, A., & Petts, G. (2006). Trees as riparian engineers : The Tagliamento river, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(12), 1558-1574.
<https://doi.org/10.1002/esp.1342>
- Hartmann, H. T., & Kester, D. E. (2011). Chapter 9—Principles of Propagation by Cuttings. In *Plant Propagation : Principles and Practices* (Pearson Prentice Hall).
- He, W.-M., & Dong, M. (2003). Plasticity in Physiology and Growth of *Salix matsudana* in Response to Simulated Atmospheric Temperature Rise in the Mu Us Sandland. *Photosynthetica*, 41(2), 297-300.
<https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000011966.30235.91>
- Heller, R., Esnault, R., & Lance, C. (2006). *Physiologie végétale : Développement: Vol. Nouvelle présentation* (6ème édition).
- 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.
- Hughes, F. M. R. (1997). Floodplain biogeomorphology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 21(4), 501-529.
<https://doi.org/10.1177/030913339702100402>
- Husson, C., Dowkiw, A., Saintonge, F.-X., & Marçais, B. (2016). La chalarose du frêne en France. *Forêt Entreprise*, 228, 10-13.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. (p. 3056) [Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA,]. 10.1017/9781009325844.
- IPCC. (2023). *Sections. In : Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. (IPCC, Geneva, Switzerland, p. 35-115). 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Irvine, J. R., & West, N. E. (1979). Riparian Tree Species Distribution and Succession along the Lower Escalante River, Utah. *The Southwestern Naturalist*, 24(2), 331-346.
<https://doi.org/10.2307/3670931>

- Jackson, M. B., & Attwood, P. A. (1996). Roots of willow (*Salix viminalis* L.) show marked tolerance to oxygen shortage in flooded soils and in solution culture. *Plant and Soil*, 187(1), 37-45. <https://doi.org/10.1007/BF00011655>
- Janssen, P., Cavaillé, P., Bray, F., & Evette, A. (2019). Soil bioengineering techniques enhance riparian habitat quality and multi-taxonomic diversity in the foothills of the Alps and Jura Mountains. *Ecological Engineering*, 133, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.017>
- Julve, P. (2015). *Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France. Version 2015. Programme Catminat.*
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences*, 106(1), 110-127.
- Karrenberg, S., Edwards, P. J., & Kollmann, J. (2002). The life history of Salicaceae living in the active zone of floodplains. *Freshwater Biology*, 47(4), 733-748. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00894.x>
- 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>
- Krasny, M. E., Zasada, J. C., & Vogt, K. A. (1988). Adventitious rooting of four Salicaceae species in response to a flooding event. *Canadian Journal of Botany*, 66(12), 2597-2598. <https://doi.org/10.1139/b88-352>
- Kudrnovsky, H. (2002). Die Deutsche Tamariske an der Isel. In *Auftrag des Österreichischen Alpenvereins* (p. 25).
- Kumari, B. (2008). Tree planting-An answer for improvement of saline/alkaline and waterlogged soils. *Annals of Biology*, 24(1), 81-84.
- Kuntz, C. (2019). *Fiche matériau: Fibres Végétales. Stage intitulé « Écoconception des solutions utilisées dans le cadre du génie écologique » au sein du Centre de ressources Génie écologique de l'Office français de la biodiversité (OFB).*
- Kuzovkina, Y. A. (2003). *Stress tolerance and horticultural evaluation of the genus Salix.* <https://www.proquest.com/openview/7ce7ffaa5c64b02fed6a939b2b08add8/1?cbl=18750&diss=y&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=SXOt90nV3acr5Va0F0I0bTCJkM7YY7KHTUwZu4JKtdA%3D>
- Kuzovkina, Y. A., Knee, M., & Quigley, M. F. (2004). Effects of Soil Compaction and Flooding on the Growth of 12 Willow (*Salix* L.) Species. *Journal of Environmental Horticulture*, 22(3), 155-160. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-22.3.155>
- 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), 183-204. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-6272-5>
- Kuzovkina, Y. A., & Volk, T. A. (2009). The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Coordination of structure, function and autecology. *Ecological Engineering*, 35(8), 1178-1189.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.010>
- Kuzovkina-Eishen, Y. A. (2003). *Stress tolerance and horticultural evaluation of the genus Salix*. The Ohio State University.
- Laan, P., Tosserams, M., Blom, C. W. P. M., & Veen, B. W. (1990). Internal oxygen transport in *Rumex* species and its significance for respiration under hypoxic conditions. *Plant and Soil*, 122(1), 39-46. <https://doi.org/10.1007/BF02851908>
- Labroche, A., Piroux, M., Culat, A., Celle, J., Renaux, B., & CBN Massif central. (2021). *Flore & végétations des ripisylves de Loire Forez agglomération : Guide d'évaluation de l'état de conservation* (Conservatoire botanique national du Massif central, Éd.). Conservatoire botanique national du Massif central.
- Lachat, B. (1991). Hydroécologie et génie biologique-les fondements de l'aménagement des cours d'eau. *Ingénieurs et architectes suisses*, 24, 503-510.
- Lachat, B. (1994). *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales (en collaboration avec P. Adam, P.-A. Frossard, R. Marcaud)*. Ministère de l'Environnement.
- Lachat, B. (1999). Quelques souvenirs historiques et perspectives d'avenir du génie biologique en Suisse romande et en francophonie. *Génie biologique*, 4(7-14).
- Laille, P., Provendier, D., Colson, F., & Salanié, J. (2013). Les bienfaits du végétal en ville : Étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse. *Plante & Cité, Angers*.
- Laitung, B., Pretty, J. L., Chauvet, E., & Dobson, M. (2002). Response of aquatic hyphomycete communities to enhanced stream retention in areas impacted by commercial forestry. *Freshwater Biology*, 47(2), 313-323. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00801.x>
- L'atelier des Territoires. (2018). *Restauration de la Plaine et la Meurthe sur des sites ponctuels* [Avant-projet].
- Lauber, K., & Wagner, G. (1998). *Flora helvetica : Flore illustrée de Suisse 2e ed.* (Vienna, Bern, Stuttgart: P. Haupt).
- Lavaine, C. (2013). *Evaluation des capacités biotechniques de boutures de Salicaceae et Tamaricaceae sur un gradient de sécheresse* [These de doctorat, Lyon, École normale supérieure]. <https://www.theses.fr/2013ENSL0851>
- 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>
- Lavaine, C., Evette, A., Piégay, H., Lachat, B., & Brahic, P. (2012). Les Tamaricaceae en génie végétal. *Sciences Eaux & Territoires, Hors série*, 9 p. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2011.HS.04>
- 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>
- Lévêque, C. (2016). *Quelles rivières pour demain ? : Réflexions sur l'écologie et la restauration des cours d'eau*. 1-288.
- Lewis, L. (2000). *Soil bioengineering : An alternative for roadside management [A practical guide]*. United States Department of Agriculture.
- Lezberg, A., & Giordanengo, J. (2008). *A Guide for Harvesting, Storing, and Planting Dormant Willow Cuttings | Colorado Riparian Association*. <https://coloradoriparian.org/2008/06/20/a-guide-for-harvesting-storing-and-planting-dormant-willow-cuttings-2/>
- Li, T. S. C., Beveridge, T. H. J., Canada, C. national de recherches, & CNRC (Canada), P. des monographies du. (2004). *Production et utilisation de l'argousier (Hippophae rhamnoides L.)*. NRC Research Press.
- Malanson, G. P. (1993). *Riparian Landscapes*. Cambridge University Press.
- Malavoi, J. R., & Adam, P. (2007). Les interventions humaines et leurs impacts hydromorphologiques sur les cours d'eau. *Sciences Eaux & Territoires*, 50 Ingénieries-EAT, 50 Ingénieries-EAT.
- Martin, F.-M., Janssen, P., Bergès, L., Dupont, B., & Evette, A. (2021). Higher structural connectivity and resistance against invasions of soil bioengineering over hard-engineering for riverbank stabilisation. *Wetlands Ecology and Management*, 29(1), 27-39. <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09765-6>
- Meikle, R. D. (1984). *Willows and poplars of Great Britain and Ireland*.
- MNHN & OFB. (2023). *Fiche espèces. Inventaire national du patrimoine naturel (INPN)*. Site [web : https://inpn.mnhn.fr/espece](https://inpn.mnhn.fr/espece)— Consulté le 6 septembre 2023.
- Moggridge, H. L., & Gurnell, A. M. (2009). Controls on the sexual and asexual regeneration of Salicaceae along a highly dynamic, braided river system. *Aquatic Sciences*, 71(3), 305. <https://doi.org/10.1007/s00027-009-9193-3>
- Naiman, R. J., & Décamps, H. (1997). The Ecology of Interfaces : Riparian Zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1), 621-658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Naiman, R. J., Decamps, H., & McClain, M. E. (2005). *Riparia : Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*. Elsevier.
- Naiman, R. J., Magnuson, J. J., McKnight, D. M., & Stanford, J. A. (1995). *The Freshwater Imperative : A Research Agenda*. Island Press.
- Naiman, R. J., & Turner, M. G. (2000). A Future Perspective on North America's Freshwater Ecosystems. *Ecological Applications*, 10(4), 958-970. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0958:AFPONA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0958:AFPONA]2.0.CO;2)
- Nakai, A., Yurugi, Y., & Kisanuki, H. (2009). Growth responses of *Salix gracilistyla* cuttings to a range of substrate moisture and oxygen availability. *Ecological Research*, 24(5), 1057-1065. <https://doi.org/10.1007/s11284-009-0583-8>

- National Research Council. (2002). *Riparian Areas : Functions and Strategies for Management*. National Academies Press.
- Newsholme, C. (1992). Willows : The genus Salix. *Willows: The Genus Salix*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19930666787>
- Niinemets, Ü., & Valladares, F. (2006). Tolerance to Shade, Drought, and Waterlogging of Temperate Northern Hemisphere Trees and Shrubs. *Ecological Monographs*, 76(4), 521-547. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2)
- Nilsson, C., Brown, R. L., Jansson, R., & Merritt, D. M. (2010). The role of hydrochory in structuring riparian and wetland vegetation. *Biological Reviews*, 85(4), 837-858. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2010.00129.x>
- Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems. *Science*, 308(5720), 405-408. <https://doi.org/10.1126/science.1107887>
- Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., Beek, R. van, Nicoll, B. C., & Achim, A. (2008). *Slope Stability and Erosion Control : Ecotechnological Solutions*. Springer Science & Business Media.
- OFB. (2019). *Référentiel technique associé au règlement d'usage de la marque collective simple Végétal Local*. https://www.vegetal-local.fr/sites/default/files/2020-02/R%C3%A9f%C3%A9rentiel_technique_VLocal_modif_6dec2019.pdf
- 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., Brown, C. E., Elcan, J. M., & Douglas Shields Jr., F. (2005). Responses of Nondormant Black Willow (*Salix nigra*) Cuttings to Preplanting Soaking and Soil Moisture. *Restoration Ecology*, 13(1), 1-7. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00001.x>
- 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. (1997). Interactions between Floodplain Forests and Overbank Flows : Data from Three Piedmont Rivers of Southeastern France. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6(3/4), 187-196. <https://doi.org/10.2307/2997732>
- Piégay, H., Darby, S. E., Mosselman, E., & Surian, N. (2005). A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor : A sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications*, 21(7), 773-789. <https://doi.org/10.1002/rra.881>
- Piégay, H., & Maridet, L. (1994). Revue bibliographique—Formations végétales arborées riveraines des cours d'eau et potentialités piscicoles. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 333, 333.

- <https://doi.org/10.1051/kmae:1994025>
- Piégay, H., Pautou, G., & Ruffinoni, C. (2003). *Les forêts riveraines des cours d'eau : Écologie, fonctions et gestion*. CNPF-IDF.
- Pimm, S. L., Jenkins, C. N., Abell, R., Brooks, T. M., Gittleman, J. L., Joppa, L. N., Raven, P. H., Roberts, C. M., & Sexton, J. O. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, *344*(6187), 1246752. <https://doi.org/10.1126/science.1246752>
- 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>
- Pollock, A., Schoonmaker, A., Sobze, J. M., & Goehing, J. (2019a). Handling of Poplar and Willow Cuttings—Part 2. In *Canadian Conservation and Land Management (CCLM) Knowledge Network*. <https://www.cclmportal.ca/resource/handling-poplar-and-willow-cuttings-part-2>
- Pollock, A., Schoonmaker, A., Sobze, J. M., & Goehing, J. (2019b). Handling of Poplar and Willow Cuttings—Part 1. In *Canadian Conservation and Land Management (CCLM) Knowledge Network*. <https://www.cclmportal.ca/resource/handling-poplar-and-willow-cuttings-part-1>
- Polster, C. (2002). A Break from the Past : Impacts and Implications of the Canada Foundation for Innovation and the Canada Research Chairs Initiatives*. *Canadian Review of Sociology/Revue Canadienne de Sociologie*, *39*(3), 275-299. <https://doi.org/10.1111/j.1755-618X.2002.tb00621.x>
- Polster, D. F. (2016). Natural processes for the restoration of disturbed sites. *JASMR*, *5*(2).
- Popoff, N., Jaunatre, R., Le Bouteiller, C., Paillet, Y., Favier, G., Buisson, M., Meyer, C., Dedonder, E., & Evette, A. (2021). Optimization of restoration techniques : In-situ transplantation experiment of an endangered clonal plant species (*Typha minima* Hoppe). *Ecological Engineering*, *160*, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106130>
- Prada, M. A., & Arizpe, D. (2008). *Riparian tree and shrub propagation handbook : An Aid to Riverine Restoration in the Mediterranean Region*.
- Preti, F., Capobianco, V., & Sangalli, P. (2022). Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS) : A reasoned comparison of terms and definitions. *Ecological Engineering*, *181*, 106687. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106687>
- Rameau, J.-C., Mansion, D., & Dumé, G. (1994). *Flore forestière française tome 2, Montagnes : Guide écologique illustré. Montagnes*. Forêt privée française.
- Rameau, J.-C., Mansion, D., Dumé, G., & Gauberville, C. (2008). *Flore forestière française tome 3, région méditerranéenne : Guide écologique illustré*. CNPF-IDF.
- Randall, C. (2015). *Survival & growth of sandbar willow, Salix interior, in bioengineering projects, and the implications for use in erosion control*

- in *Manitoba*.
<http://hdl.handle.net/1993/30242>
- Raven, J. A. (1992). The physiology of *Salix*. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences*, 98, 49-62.
<https://doi.org/10.1017/S0269727000007442>
- Rey, F. (2018). *Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal*. éditions Quae.
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2778-5>
- Richardson, D. M., Holmes, P. M., Esler, K. J., Galatowitsch, S. M., Stromberg, J. C., Kirkman, S. P., Pyšek, P., & Hobbs, R. J. (2007). Riparian vegetation : Degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and Distributions*, 13(1), 126-139.
<https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2006.00314.x>
- 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>
- Riis, T., Kelly-Quinn, M., Aguiar, F. C., Manolaki, P., Bruno, D., Bejarano, M. D., Clerici, N., Fernandes, M. R., Franco, J. C., Pettit, N., Portela, A. P., Tammeorg, O., Tammeorg, P., Rodríguez-González, P. M., & Dufour, S. (2020). Global Overview of Ecosystem Services Provided by Riparian Vegetation. *BioScience*, 70(6), 501-514.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biaa041>
- Ruffinoni, C., Tremolières, M., & Sanchez-Pérez, J. M. (2003). Végétation alluviale et flux de nutriments : Des liens interactifs. In *Les forêts riveraines des cours d'eau : Écologie, fonctions et gestion*.
- Saillard, J., Pouvaret, S., & Cruchaudet, C. (2018). *Etude des forêts alluviales du val d'Allier : Synthèse des connaissances sur la faune, dynamique spatio-temporelle, services écosystémiques, foncier et préservation actuelle*. *Contrat territorial Val d'Allier*. (Conservatoire d'espaces naturels d'Auvergne, p. 62 + annexes).
- Sandercock, P. J., & Hooke, J. M. (2010). Assessment of vegetation effects on hydraulics and of feedbacks on plant survival and zonation in ephemeral channels. *Hydrological Processes*, 24(6), 695-713.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7508>
- Sauli, G., & Cornelini, P. (2007). The application of native species of shrubs rooted and as cuttings in soil bioengineering intervention in the mediterranean areas in Italy. *Geophysical Research Abstracts*, 9(2).
- Sauli, G., Cornelini, P., & Preti, F. (2006). *Manuale di ingegneria naturalistica vol. 3 sistemazione dei versanti*.
- Sauquet, E., Beaufort, A., Sarremejane, R., & Thirel, G. (2021). Predicting flow intermittence in France under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 66(14), 2046-2059.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963444>
- Sauter, J. J. (1988). Seasonal changes in the efflux of sugars from parenchyma cells into the apoplast in poplar stems (*Populus × canadensis* "robusta"). *Trees*, 2(4), 242-249.
<https://doi.org/10.1007/BF00202379>

- Schaff, S. D., Pezeshki, S. R., & Shields, F. D. (2003). Effects of Soil Conditions on Survival and Growth of Black Willow Cuttings. *Environmental Management*, 31(6), 748-763. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2909-y>
- Schaff, S. D., Pezeshki, S. R., & Shields Jr., F. D. (2002). Effects of Pre-Planting Soaking on Growth and Survival of Black Willow Cuttings. *Restoration Ecology*, 10(2), 267-274. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.02035.x>
- Schiechtl, H. M. (1973). *Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau : Grundlagen lebende baustoffe Methoden*.
- Schiechtl, H. M. (1980). *Bioengineering for land reclamation and conservation*. University of Alberta Press. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Bioengineering+for+land+reclamation+and+conservation&author=Schiechtl%2C+Hugo+M.&publication_year=1980
- 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* (L. Jaklitsch, Trad.; Blackwell Science). David H. Barker.
- Schoonmaker, A. (2021). Timing of Planting : What Are Our Options? In *Canadian Conservation and Land Management (CCLM) Knowledge Network*.
- SM3A. (2011). *Techniques de génie végétal applicables en rivière de montagne*.
- Sol, S. (2008). Elaboration d'une stratégie de conservation du peuplier noir *Populus nigra L.* en Bassée seine-et-marnaise : Gestion de milieux naturels, Réaménagements écologiques de carrières et Conservation ex-situ de la ressource génétique. *Elaboration d'une Stratégie de Conservation Du Peuplier Noir Populus Nigra L. En Bassée Seine-et-Marnaise, Université Paris Diderot (Paris 7)(2008)*. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/647760def2e6fe92b3675067>
- Staffler, H. (1999). *Die Deutsche Tamariske (Myricaria germanica (L.) Desv.)—Bepflanzung und Pflege von verbauten Bachböschungen in Südtirol*.
- Stanford, J. A., Lorang, M. S., & Hauer, F. R. (2005). The shifting habitat mosaic of river ecosystems. *Internationale Vereinigung Für Theoretische Und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03680770.2005.11901979>
- Stokes, A., Mine, F.-X., Mao, Z., & Brancheriau, L. (2012). Multi-stemming and mechanical traits ensure persistence of subalpine woody plants exposed to a disturbance gradient. *Journal of Vegetation Science*, 23(2), 325-338. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01349.x>
- Stromberg, J. (1998). Dynamics of Fremont cottonwood (*Populus fremontii*) and saltcedar (*Tamarix chinensis*) populations along the San Pedro River, Arizona. *Journal of Arid Environments*, 40(2), 133-155. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0438>
- Su, H., Li, Y., Lan, Z., Xu, H., Liu, W., Wang, B., Biswas, D. K., & Jiang, G. (2009). Leaf-level plasticity of *Salix gordejvii* in fixed dunes compared with lowlands in Hunshandake Sandland, North China. *Journal of Plant Research*, 122(6),

- 611-622.
<https://doi.org/10.1007/s10265-009-0249-1>
- Symmank, L., Natho, S., Scholz, M., Schröder, U., Raupach, K., & Schulz-Zunkel, C. (2020). The impact of bioengineering techniques for riverbank protection on ecosystem services of riparian zones. *Ecological Engineering*, *158*, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106040>
- Tallent-Halsell, N. G., & Walker, L. R. (2002). Responses of *Salix gooddingii* and *Tamarix ramosissima* to flooding. *Wetlands*, *22*(4), 776-785. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2002\)022\[0776:ROSGAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2002)022[0776:ROSGAT]2.0.CO;2)
- Tilley, D., & Hoag, C. (2008). Evaluation of fall versus spring planting of dormant hardwood willow cuttings. *USDA, Riparian Wetland Project Information Series*, *25*.
- Tison, J.-M., & De Foucault, B. (2014). *Flora gallica—Flore de France* (Biotope (Mèze)).
- Tisserant, M., Bourgeois, B., González, E., Evette, A., & Poulin, M. (2021). Controlling erosion while fostering plant biodiversity: A comparison of riverbank stabilization techniques. *Ecological Engineering*, *172*, 106387. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106387>
- Tisserant, M., Janssen, P., Evette, A., González, E., Cavallé, P., & Poulin, M. (2020). Diversity and succession of riparian plant communities along riverbanks bioengineered for erosion control: A case study in the foothills of the Alps and the Jura Mountains. *Ecological Engineering*, *152*, 105880. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105880>
- Tramblay, Y., Rutkowska, A., Sauquet, E., Sefton, C., Laaha, G., Osuch, M., Albuquerque, T., Alves, M. H., Banasik, K., Beaufort, A., Brocca, L., Camici, S., Csabai, Z., Dakhlaoui, H., DeGirolamo, A. M., Dörflinger, G., Gallart, F., Gauster, T., Hanich, L., ... Datry, T. (2021). Trends in flow intermittence for European rivers. *Hydrological Sciences Journal*, *66*(1), 37-49. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1849708>
- Tuttle, R., Ralston, D., Sotir, R., Gray, D., & Adams, C. (1992). Soil bioengineering for Upland slope protection and erosion reduction: Chapter 18. In *Engineering Field Handbook*.
- UICN. (2016). *Union Internationale pour la Conservation de la Nature* [Rapport Annuel 2016].
- UPGE. (2020). *Préconisations pour une meilleure prise en compte du risque de dissémination des espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE) terrestres dans les projets de travaux*. (Document rédigé par le groupe de travail EVEE de l'Union professionnelle du génie écologique (UPGE) pour la préconisation de rédaction des CCTP.) [Cahiers des charges et EVEE].
- Vandersande, M. W., Glenn, E. P., & Walworth, J. L. (2001). Tolerance of five riparian plants from the lower Colorado River to salinity drought and inundation. *Journal of Arid Environments*, *49*(1), 147-159. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0839>
- 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.).

- Verdonschot, P. F. M., & Verdonschot, R. C. M. (2024). Ecological Functions and Management of Large Wood in Fluvial Systems. *Current Forestry Reports*, 10(1), 39-55. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00209-x>
- Verwijst, T. (2001). Willows: An underestimated resource for environment and society. *The Forestry Chronicle*, 77(2), 281-285. <https://doi.org/10.5558/tfc77281-2>
- Vesipa, R., Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2017). Effect of river flow fluctuations on riparian vegetation dynamics: Processes and models. *Advances in Water Resources*, 110, 29-50. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.028>
- von der Thannen, M., Hoerbinger, S., Paratscha, R., Smutny, R., Lampalzer, T., Strauss, A., & Rauch, H. P. (2020). Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(2), 141-155. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1369460>
- von Schiller, D., Acuña, V., Aristi, I., Arroita, M., Basaguren, A., Bellin, A., Boyero, L., Butturini, A., Ginebreda, A., Kalogianni, E., Larrañaga, A., Majone, B., Martínez, A., Monroy, S., Muñoz, I., Paunović, M., Pereda, O., Petrovic, M., Pozo, J., ... Elozegi, A. (2017). River ecosystem processes: A synthesis of approaches, criteria of use and sensitivity to environmental stressors. *Science of The Total Environment*, 596-597, 465-480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.081>
- Wagner, N. D., He, L., & Hörandl, E. (2021). The Evolutionary History, Diversity, and Ecology of Willows (*Salix* L.) in the European Alps. *Diversity*, 13(4), 4. <https://doi.org/10.3390/d13040146>
- Walker, L. R., Barnes, P. L., & Powell, E. A. (2006). TAMARIX APHYLLA: A NEWLY INVASIVE TREE IN SOUTHERN NEVADA. *Western North American Naturalist*, 66(2), 191-201. [https://doi.org/10.3398/1527-0904\(2006\)66\[191:TAANIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3398/1527-0904(2006)66[191:TAANIT]2.0.CO;2)
- Warren, D. K., & Turner, R. M. (1975). Saltcedar (*Tamarix chinensis*) Seed Production, Seedling Establishment, and Response to Inundation. *Journal of the Arizona Academy of Science*, 10(3), 135-144. <https://doi.org/10.2307/40021795>
- Watson, C. C., Abt, S. R., & Derrick, D. (1997). Willow Posts Bank Stabilization. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 33(2), 293-300. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1997.tb03510.x>
- Wikberg, J., & Ögren, E. (2007). Variation in drought resistance, drought acclimation and water conservation in four willow cultivars used for biomass production. *Tree Physiology*, 27(9), 1339-1346. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.9.1339>
- Wilkinson, A. G. (1999). Poplars and willows for soil erosion control in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 16(4), 263-274. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00007-0)
- Wilson, J. B. (1988). A Review of Evidence on the Control of Shoot: Root Ratio, in Relation to Models. *Annals of Botany*, 61(4), 433-449. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournal.s.aob.a087575>

- Zeh, H. (2000). *Méthodes de construction du génie biologique*. Office fédéral des eaux et de la géologie.
- Zeh, H. (2007). *Ingenieurbiologie : 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). <http://www.biodiversiteetbati.fr/Files/Other/DocComplGTBPU/F22-GenieBiologiqueAmenagementCoursD'Eau-OFEV.pdf>
- Zuffi, D. (1989). *Génie biologique—Cours sur la stabilisation végétale des talus*. Inspection cantonale des forêts.

Annexe 1

Fiches espèces

<i>Myricaria germanica</i> (L.) Desv.	74
<i>Populus nigra</i> L.	78
<i>Salix alba</i> L.	82
<i>Salix appendiculata</i> Vill.	86
<i>Salix atrocinerea</i> Brot.	90
<i>Salix aurita</i> L.	94
<i>Salix caesia</i> Vill.	98
<i>Salix cinerea</i> L.	102
<i>Salix daphnoides</i> Vill.	106
<i>Salix eleagnos</i> Scop.	110
<i>Salix foetida</i> Schleich. ex DC.	114
<i>Salix</i> × <i>fragilis</i> L.	118
<i>Salix hastata</i> L.	121
<i>Salix myrsinifolia</i> Salisb.	125
<i>Salix pentandra</i> L.	129
<i>Salix purpurea</i> L.	133
<i>Salix triandra</i> L.	137
<i>Salix viminalis</i> L.	141
<i>Tamarix gallica</i> L.	145

Myricaria germanica (L.) Desv.

Myricaire d'Allemagne

Tamaricacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ⁵	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
50-80	4	Faible	Tolérante	a	x	a	x	a	a	a	a	Niinemets & Valladares, 2006; Bonin et al., 2013; Lavaine, 2013; Lavaine et al., 2015

X : espèce non adaptée

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

Distribution géographique

Espèce eurasiatique, péréalpine continentale, dispersée et peu fréquente dans les massifs montagneux du territoire français. Bien que généralement peu fréquente et dispersée dans des régions telles que le Jura, les Pyrénées et le long du Rhin, elle devient plus fréquente, voire localement abondante, dans les Alpes, en particulier dans les Alpes du Nord.

Écologie

Espèce pionnière héliophile, inféodée aux milieux rivulaires et alluviaux de montagne, principalement sur les terrasses alluviales des rivières et torrents de montagne. Elle trouve son optimum écologique au sein des saulaies



Port buissonnant de *Myricaria germanica* © Patrice Prunier

⁵ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées.

alluviales sur des matériaux grossiers (*Salicion elaeagni*) et dans les communautés herbacées riveraines d'altitude (*Epilobion fleischeri*). On la rencontre de l'étage collinéen à l'étage subalpin, jusqu'à 2100 mètres d'altitude, avec un optimum à l'étage montagnard.

On la retrouve surtout dans des milieux secs subissant des crues régulières avec des remaniements sédimentaires, nécessaires à sa reproduction sexuée et à son maintien. L'arasement des saulaies par les crues lui permet de ne plus entrer en concurrence pour la lumière avec les saules. Cette espèce se développe sur des substrats alluviaux plutôt grossiers, peu rétenteurs d'eau (sables, graviers, galets), assez riches en nutriments mais pauvres en matière organique, à humidité variable en tant que phréatophyte facultative, neutres à basiques. La survie des plantules est toutefois limitée et conditionnée par la présence de matériaux fins et humides. Bien qu'héliophile, elle est peu compétitrice pour la lumière, surtout sur des substrats peu rétenteurs en eau, tels que des galets, graviers, sables, et pauvres en matière organique, mais riches en nutriments. Elle présente une capacité importante d'ancrage, de rétention de particules fines, de résistance à l'ensevelissement, à l'arrachement et à la sécheresse (mais non à l'état juvénile, ni en haut de berge), et son appareil aérien est très rétenteur en particules fines.

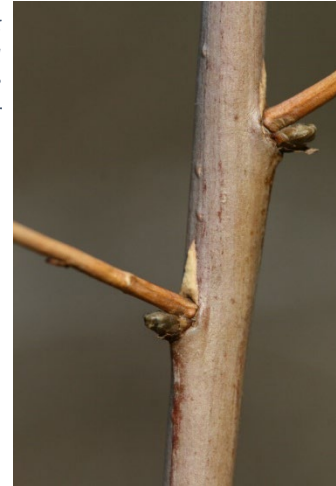
Description

Arbrisseau élancé à feuilles caduques pouvant atteindre 3 mètres de hauteur, il forme généralement des buissons denses. Le tronc présente une couleur beige à brune.

Rameaux

Les rameaux sont grêles et flexibles, dressés. Initialement verts, ils deviennent pourpre à rosés avec l'âge. Les ramifications secondaires sont nombreuses et fines, un peu anguleuses.

Rameaux dressés et grêles de *Myricaria germanica* © Patrice Prunier



Bourgeons globuleux de *Myricaria germanica* © Patrice Prunier



Bourgeons

Les bourgeons sont glabres et globuleux, pouvant atteindre 3 mm de diamètre. Nombreuses, les écailles sont de couleur marron à verdâtre et pourvues d'une marge plus claire.

Feuilles

Les feuilles glauques sont minuscules (2 à 10 mm de long). Celles des rameaux principaux sont linéaires à lancéolées, atteignant 1 cm, et tombent rapidement. Celles des rameaux axillaires, en forme d'écailles plus ou moins imbriquées, mesurent moins de 4 mm.

Fleurs, fruits et graines

La floraison s'étend de mai à juillet. Les inflorescences se présentent en grappes terminales lâches, mesurant de 3 à 15 cm de long. Elles arborent une teinte rose pâle à blanc rosé et sont brièvement pédicellées. Les fleurs,

régulières, sont constituées de 5 sépales et 10 étamines soudées. Les capsules, de forme piriforme et d'une longueur de 8 à 12 mm, affichent une couleur gris verdâtre. Les graines sont pourvues d'aigrettes pédicellées.

Capsules en forme de pyramide de Myricaria germanica © Patrice Prunier



Confusion

La myricaire peut être confondue avec d'autres espèces de la famille des Tamaricacées, les tamaris (*Tamarix* spp.). Ils sont absents dans les Alpes du Nord avec une affinité marquée pour le littorale.



Fleurs en grappes de Myricaria germanica © Yvan Francey



Feuilles linéaires à lancéolées de Myricaria germanica © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Plusieurs études ont souligné l'intérêt de la myricaire (*Myricaria germanica*) dans les projets de génie végétal. Cette espèce présente des caractéristiques similaires à celles des saules, ce qui la rend idéale pour la stabilisation des berges des cours d'eau, bien qu'elle soit encore peu utilisée dans ce domaine. Naturellement présente sur les terrasses alluviales de l'étage montagnard, elle est susceptible de former des colonies denses à proximité immédiate du lit mineur. Elle offre un bon taux de reprise en reproduction végétative, dépassant les 80% en pied de berge, en association avec son système racinaire ancré, offrant une résistance importante aux forces d'arrachement et permettant une protection rapide des berges. Grâce à son port buissonnant et à ses rameaux souples mais robustes, elle offre une excellente résistance le long des berges sans le risque de déstabilisation lié à la chute des espèces arborées. En pied de berge, elle contribue à la dissipation de l'énergie du courant, à la capture des sédiments fins et à l'augmentation de la rugosité pour réduire le risque d'érosion. La myricaire est sensible à la concurrence d'autres essences et est de ce fait difficile à associer à d'autres espèces dans les aménagements, y compris et même surtout les saules.

Son adaptation aux substrats alluviaux permet son utilisation sur des matériaux bruts drainants, particulièrement lorsqu'elle est implantée en pied de berge, près de la nappe. Son port buissonnant et

la souplesse de ses tiges lui permettent de dissiper l'énergie du courant tout en capturant les sédiments fins. Elle présente une tolérance significative à l'ensevelissement. Cette espèce est préconisée dans les zones les plus perturbées du pied de berge, de préférence en massifs purs. Elle peut supporter des périodes de sécheresse prolongées et intenses, pourvu que son système racinaire soit suffisamment développé.

Son taux de reprise permet son utilisation sous forme de boutures ou de plançons dans divers types d'aménagement tels que des caissons en rondins végétalisés, des lits de plants et plançons, ainsi que des ramilles anti-affouillement. Cependant, les boutures supportent très mal la sécheresse prolongée juste après leur plantation, nécessitant un arrosage abondant en début de reprise de végétation. En raison du faible diamètre de ses rameaux, le bouturage reste assez aléatoire, et le matériel végétal de taille suffisante est rarement abondant aux abords des chantiers.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Groupements pionniers des lits majeurs des torrents et cours d'eau de montagne (*Salici-Myricarietum*), saulaies montagnardes (*Salicion elaeagni*), saulaies collinéennes (*Salicion albae*).

Populus nigra L.

Peuplier noir

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ⁶	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
70-100	0,4	Rapide	Modérément tolérante	c	c	b	b	b	b	b	b	Schiechl, 1973; Venti et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Arizpe et al., 2008; Lavaine, 2013; Tison & De Foucault, 2014

b : espèce adaptée, mais utilisation en quantité limitée pour éviter de fermer le milieu et de préférence en haut de berge

c : espèce adaptée, sous la forme de pieux morts et en pied de berge uniquement

Distribution géographique

Espèce eurasiatique, le peuplier noir est également présente sur le continent américain et en Afrique du Nord, où elle est non indigène. En France, on le trouve sur l'ensemble du territoire, mais il est plus répandu dans le quart Sud-Est.

Écologie

Espèce pionnière héliophile et thermophile, on la trouve au sein des forêts ripicoles, des groupements pionniers ou des milieux frais sur alluvions à texture grossière. Son gradient

Port arboré ample de *Populus nigra* © Patrice Prunier



⁶ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées.

d'altitude s'étend aux étages méditerranéen, supraméditerranéen, collinéen et montagnard, jusqu'à 1800 mètres d'altitude.

Cette espèce préfère les sols aérés, riches en bases et en azote, avec un pH basique à neutre. Son développement se réalise sur des substrats alluviaux grossiers, allant des sables et des graviers jusqu'aux limons. Elle présente un comportement mésohygrophile à légèrement hygrophile sur les sols régulièrement inondés. Elle est pionnière sur des substrats secs.

Description

Grand arbre caducifolié pouvant atteindre 25 à 30 mètres de hauteur, il possède un houppier ample et irrégulier avec d'épaisses branches lui conférant un aspect buissonnant. Le tronc présente généralement moins de broussins en montagne qu'en plaine. L'écorce jeune est lisse, mince, de couleur grisâtre, devenant rapidement rugueuse, noirâtre et fissurée en long.

Rameaux

Les jeunes rameaux sont glabres, ronds ou légèrement anguleux. Ils sont généralement minces, flexibles et de couleur brunâtre à grisâtre. Ils peuvent présenter une écorce lisse, mais elle a tendance à devenir plus rugueuse avec l'âge

Bourgeons

Les bourgeons, souvent appliqués, sont de forme conique et allongée, glabres et visqueux. Ils sont relativement petits et pointus, brillants, pouvant présenter une couleur variant du brun clair au brun foncé, selon la saison.

Feuilles

Les feuilles, caractéristiques du genre, ont une forme triangulaire, losange ou en coin à la base. Elles sont denticulées, vertes et glabres sur les deux faces, éventuellement plus claires en dessous. Elles sont visqueuses au débourrement, avec un pétiole court et aplati, mesurant de 5 à 10 cm de long et 3 à 9 cm de large.

*Rameau à écorce lisse
de Populus nigra ©
Patrice Prunier*



*Bourgeons coniques
et appliqués de
Populus nigra ©
Patrice Prunier*



*Chatons pendants de
Populus nigra © Patrice
Prunier*



Fleurs, fruits et graines

La floraison survient avant la feuillaison, généralement de mars à avril. La reproduction s'effectue par pollinisation et dispersion par le vent. Les fleurs sont regroupées en chatons, qui sont pendants.

Les chatons mâles sont sessiles, de couleur rouge violacée, tandis que les chatons femelles sont pédonculés et de couleur verte jaunâtre. Les capsules, ovoïdes et en chapelets, renferment des graines cotonneuses.



Feuilles glabres triangulaires de Populus nigra © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Le peuplier noir, d'origine sauvage et non cultivé, se révèle être une espèce intéressante pour le génie végétal en raison de son système racinaire dense et puissant qui contribue à stabiliser les berges. Son taux de reprise élevé et sa croissance rapide en font un choix optimal pour la protection rapide des berges. Cependant, les espèces à port arborescent, telles que le saule blanc (*Salix alba*) et le peuplier noir (*Populus nigra*), ne sont généralement pas recommandées pour les fascines et autres ouvrages en pied de berge. Un port arborescent n'est pas souhaitable à la base des berges, car les arbres de gros diamètre peuvent augmenter les turbulences et l'érosion en agissant comme un bras de levier. Ces espèces créent des points durs et peuvent même favoriser l'érosion au lieu de la prévenir. De plus, les arbres de grande taille ont plus de risques de basculer dans le cours d'eau par temps venteux. Il est donc préférable de les utiliser en haut de berge.

Caractérisée par un tronc difforme boursoufflé et noueux dès la base, qui peut atteindre parfois 5 m de circonférence, cette espèce thermophile et héliophile pousse volontiers dans les sols alluviaux grossiers, de préférence en milieux régulièrement inondés et est à favoriser dans ces milieux propices. Le peuplier noir est capable de tolérer les sécheresses et les inondations.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise au bouturage dépassant les 60 %, cette espèce est bien adaptée à une utilisation sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être intégrée facilement dans divers ouvrages de génie végétal, à condition qu'ils ne se trouvent pas en pied de berge. On peut citer les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés, les couches de branches à rejets et le bouturage. Il est également possible de l'utiliser sous forme de pieu. Cette espèce a la capacité de se régénérer rapidement et peut être utilisée comme pieux vivants dans certaines situations en dehors du pied de berge.

Cas des cultivars de peupliers

Les cultivars de peupliers, souvent issus d'hybridations, présentent une diversité remarquable. La variété de formes observées sur le terrain découle de la commercialisation et de la fréquente plantation de nombreux clones étroitement apparentés. Les principaux défis pour trouver des peupliers noirs indigènes dans les écosystèmes ripicoles européens résultent principalement de ces variations biologiques et commerciales, ainsi que des espèces exotiques nord-américaines. Les caractéristiques divergent par rapport à l'espèce indigène de base et sont parfois opposées. Les cultivars, même s'ils peuvent être bouturés, sont déconseillés en raison de leur enracinement superficiel et traçant, peu adapté à la protection des berges, ils peuvent

facilement être déchaussés en emmenant une galette de terre déstabilisant la berge, et favorisant l'érosion.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Peupleraies naturelles, souvent en compagnie du Saule blanc (*Salix alba*), comme composant d'associations végétales rivulaires typiques ; groupements pionniers (*Salicion triandrae*, *Populion nigrae*) des forêts ripicoles (*Populion albae*, *Alno-Padion*, *Salicion albae*) ou des milieux frais (*Corylo-Fraxinetalia*) sur alluvions à texture grossière.

Salix alba L.

Saule blanc

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ⁷	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 70	0.5	Elevée	Tolérante	c	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

c : espèce adaptée, sous la forme de pieux morts et en pied de berge uniquement

Distribution géographique

Espèce commune, présente sur l'ensemble des continents. En France, elle s'étend sur l'ensemble du territoire, y compris dans la région méditerranéenne.

Écologie

Espèce pionnière, héliophile et mésohygrophile, elle colonise les berges des cours d'eau et les sols frais, privilégiant les zones alluvionnaires. On la trouve dans les saulaies pionnières ainsi que dans les forêts à « bois tendres » (*Salicetalia albae* et *Populion albae*). Son gradient d'altitude s'étend de



Port arboré de Salix alba © Virginie Favre

⁷ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

l'étage supraméditerranéen à l'étage montagnard, atteignant parfois 1700 m d'altitude.

Les conditions propices à son implantation correspondent à des substrats grossiers, tels que des matériaux alluviaux, argilo-limoneux à graveleux, bien alimentés en eaux et aérés, avec un pH basique à neutre. Bien qu'elle ne soit pas particulièrement compétitive, elle tolère les sols régulièrement inondés. C'est une espèce qui affectionne les sols plus ou moins carbonatés.

Description

Arbre caducifolié pouvant mesurer de 5 à 25 m de hauteur, parfois même jusqu'à 30 mètres. Il forme des troncs bien développés et robustes avec de grosses branches. L'écorce âgée est brune-gris, profondément crevassée. Les branches principales sont ascendantes, pouvant former des couronnes pointues ou des couronnes tronquées. Les divisions ultimes peuvent être étalées à légèrement pendantes.

Rameaux

Les rameaux, flexibles et dressés, sont initialement verdâtres, à pubescence soyeuse appliquée dense (rarement éparse), puis deviennent bruns à orangés, à l'automne et ensuite glabres et brillants lors de leur deuxième année.

Bourgeons

Les bourgeons sont petits, ovoïdes, pointus, de couleur brun foncé. Ils sont généralement recouverts d'une pubescence appliquée, soyeuse.

Feuilles

Les feuilles sont lancéolées et acuminées, mesurant de 5 à 10 cm de long (parfois jusqu'à 12 cm) et de 0,5 à 1,5 cm de large. Elles adoptent une forme étroitement cunéiforme, avec un apex effilé. Leur marge est finement denticulée. Initialement, le limbe est dense et velu, affichant une teinte gris argenté. Au fil du temps, la face supérieure tend à devenir d'un

Rameau luisant de Salix alba © Patrice Prunier



Chatons de Salix alba © Patrice Prunier



vert terne et glabre, tandis que la face inférieure conserve sa teinte grisâtre ou glauque, restant soyeuse. Les pétioles sont pubescent, courts, généralement de moins de 1 cm de long. Les stipules sont étroites, presque subulées, avec des bords finement glanduleux et denticulés.

Le caractère argenté de son jeune feuillage en fait un arbre facile à reconnaître, même de loin.

Fleurs, fruits et graines

La floraison de cette espèce se produit simultanément avec la feuillaison, entre mars et mai. Les fleurs sont regroupées en chatons unisexués pédonculés.

Les chatons mâles sont allongés-cylindriques, avec des fleurs plutôt denses. Les écailles qui les entourent sont uniformément jaune pâle, oblongues. Elles sont pubescentes à la base et glabres sur le dessus, sauf sur les marges. Chaque chaton mâle porte 2 étamines, avec des filaments libres, glabres ou finement pubescents surtout dans la moitié inférieure. Les anthères sont jaunes, largement oblongues. Le chaton femelle est plutôt plus

court et plus étroit que le chaton mâle, mesurant environ 3-4 cm de long et 0,4 cm de diamètre. Le style est très court et peu distinct, et les stigmates sont étalés, à deux fentes.

Confusion

Cette espèce peut être confondue à l'état végétatif avec le saule drapé (*Salix eleagnos*) et le saule des vanniers (*Salix viminalis*) en raison de sa pilosité appliquée. Il s'hybride facilement avec *Salix fragilis* pour former *Salix x rubens*.



Face supérieure d'un vert terne et face inférieure grisâtre chez *Salix alba* © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Le saule blanc, en raison de ses caractéristiques, est adapté à une utilisation en génie végétal, bien que certaines considérations soient à prendre en compte. Son taux de reprise élevé et sa capacité à produire des racines en grande quantité en fait un bon choix pour stabiliser les berges. Toutefois, les espèces de saule à développement arborescent, telles que le saule blanc (*Salix alba*) et le saule fragile (*Salix fragilis*), ne sont généralement pas recommandées dans les fascines et autres ouvrages de pied de berge. 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. On préfère donc l'utiliser en haut de berge ou sous la forme de pieu.

Son utilisation dépend des préférences écologiques de l'espèce, allant des substrats alluviaux, argilo-limoneux, jusqu'aux substrats graveleux. Elle résiste relativement bien aux inondations et à la sécheresse, ce qui en fait un bon choix pour la stabilisation des berges.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise au bouturage dépassant les 70 %, cette espèce est bien adaptée à une utilisation sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être intégrée facilement dans divers ouvrages de génie végétal, à condition qu'ils ne se trouvent pas en pied de berge. Outre les boutures, ramilles et lits de plants et plançons, on peut citer les caissons en rondins végétalisés, les couches de branches à rejets et le bouturage. Il est également possible de l'utiliser sous forme de pieu, bien qu'il convienne de noter que le saule blanc est un bois cassant, ce qui augmente le risque de rupture s'il est utilisé comme pieu en raison de la pression potentielle exercée pendant la mise en place. Cette espèce a la capacité de se régénérer rapidement et peut être utilisée comme pieux vivants dans certaines situations.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies pionnières, forêts "à bois tendres" (*Salicetalia albae*, *Populion albae*), souvent associée à *Salix triandra* à basse altitude.

Salix appendiculata Vill.

Saule appendiculé

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ⁸	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
Faible	1,7	Rapide	Tolérante	d	e	d	✓	d	✓	d	✓	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

d : espèce avec un taux de reprise faible, à utiliser en mélange avec d'autres espèces et en garantissant des conditions optimales de reprise

e : espèce adaptée pour une utilisation sous la forme de pieux morts, sous réserve de trouver des branches de taille suffisante

Distribution géographique

Espèce montagnarde périalpine originaire du sud de l'Europe. En France, on la trouve principalement dans les Alpes, le Jura et plus rarement dans les Pyrénées orientales. Elle demeure commune dans les Alpes du Nord mais a disparu dans le Cantal.

Écologie

spèce pionnière d'altitude, elle s'épanouit dans des environnements lumineux ou en demi-ombre, principalement dans des fourrés



Port dressé de *Salix appendiculata* © Patrice Prunier

⁸ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

subalpins frais qu'elle peut parfois structurer (*Salicetum appendiculatae*), sur des matériaux grossiers où elle trouve son optimum écologique. On la rencontre également dans des lisières et les recrus, ainsi que dans des forêts montagnardes fraîches comme les hêtraies, les érablaies, les pessières, certaines pinèdes et les aulnaies blanches. Elle se développe également dans des zones propices telles que les couloirs d'avalanche, les creux où la neige persiste longtemps, ou encore les ravins. Généralement localisée entre 800 m et 2300 m d'altitude, aux étages montagnard et subalpin, en particulier le long des cours d'eau et aux abords des torrents.

Cette espèce peut prospérer sur divers types de sols, argileux à caillouteux, neutres à légèrement acides, plus ou moins riches en nutriments. Elle se trouve fréquemment sur des substrats bruts calcaires ou schisteux basiques. Toutefois, elle présente un optimum sur les sols souvent profonds avec une bonne réserve en eau.

Description

Arbuste caducifolié dont la taille varie de 3 à 6 mètres de haut, il est composé d'une ou plusieurs tiges ascendantes à dressées ; les rameaux étant étalés et arrondis.

Rameaux

Les rameaux de l'année sont bruns gris à bruns verdâtre, pubescents et assez courts. Avec le temps ils deviennent glabres et possèdent des cicatrices foliaires saillantes. Le bois nu est très lisse.

Bourgeons

Les bourgeons ont une longueur qui varie entre 3 à 6 mm, de couleur jaune à brun foncé, parfois rouge orangé. Ils sont généralement velus dans un premier temps avant de devenir glabres, et ils sont généralement ovoïdes à coniques. Leur forme est généralement bombée sur la moitié inférieure.

*Feuilles texturées
de Salix
appendiculata ©
Patrice Prunier*



*Rameaux et chatons
femelles de Salix
appendiculata ©
Patrice Prunier*

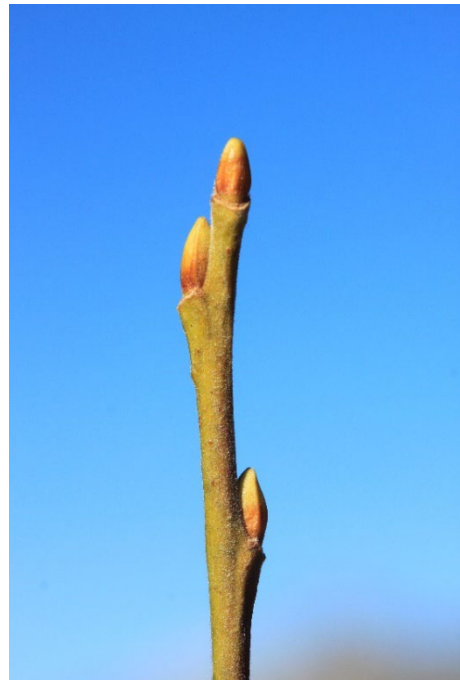


Feuilles

Les jeunes feuilles sont pubescentes, avec une teinte brune vers leur base. Elles ont une texture rugueuse, et une nervation profondément marquée sur la face supérieure. La partie supérieure des feuilles matures est luisante, de teinte verte/bleuâtre, présentant

un réseau réticulé. La surface inférieure exhibe une nervation réticulée en relief ainsi qu'une pubescence persistante. Bien que la forme des feuilles puisse varier, elles sont généralement plus de deux fois plus longues que larges, avec la partie la plus large située dans la moitié supérieure. De grande taille, mesurant de 5 à 14 cm de long sur 2 à 5 cm de large, elles présentent des formes oblongues-lancéolées à obovales, avec des contours ondulés et des marges denticulées, pouvant être grossièrement dentelées à entières. Elles se rétrécissent à la base et comportent généralement plus de dix paires de nervures latérales. Les pétioles, mesurant environ 1 cm de long, sont dotés de deux grandes stipules persistantes, semi-cordées et dentelées.

*Bourgeons velus
de Salix
appendiculata ©
Patrice Prunier*



Flours, fruits et graines

La floraison de cette espèce survient entre fin avril et début juillet, en même temps que l'apparition des feuilles. Elles sont regroupées en chatons de forme oblongue ou cylindrique, subsessiles à écailles poilues, brunâtres au sommet.

Les chatons mâles, nombreux, comprennent deux étamines libres et sont regroupés en chatons courts et denses, généralement arqués. Ces chatons mâles sont initialement ovoïdes et deviennent presque sphériques en pleine floraison. Quant aux fleurs femelles, elles sont composées d'une capsule velue portée par un long pédoncule qui est plus long

que l'écaille, mesurant environ 1 cm de long avec de longs poils basaux. Elles possèdent un style court terminé par 2 stigmates bilobés.

Confusion

Le saule appendiculé peut être confondu avec le saule marsault (*Salix caprea*) qui a généralement moins de 9 paires de nervures latérales et des stipules courtes tombant rapidement. Il peut aussi être confondu avec le saule de Lagger (*Salix laggeri*) dont les feuilles et les rameaux de deux ans sont nettement velus, ainsi que les bourgeons floraux aplatis à l'extrémité.

Concernant le génie végétal

Le saule appendiculé est une espèce idéale pour les aménagements en altitude, qu'il s'agisse de protéger les berges des torrents ou de stabiliser des pentes et talus sujets aux glissements et à l'érosion. Son système racinaire ramifié associé à une croissance rapide et son fort pouvoir de régénération rend cette espèce apte à la protection rapide des couches superficielles du sol. Il est susceptible de se développer sur des terrains instables soumis à des perturbations régulières grâce à son port souple et dense ne dépassant pas 6 m de hauteur. Il peut d'ailleurs être utilisé du pied de berge jusqu'en haut de berge.

Sa grande amplitude écologique lui permet de s'implanter sur divers types de substrats et dans différentes conditions d'ensoleillement, y compris jusqu'à 2300 m d'altitude. On peut noter sa résistance à l'ensevelissement grâce à la flexibilité des troncs et à la production de racines adventives.

L'espèce montre également une forte résistance à la sécheresse, et une tolérance limitée aux inondations prolongées.

Les branches de cette espèce permettent la production de plants, de boutures et de pieux. Cependant, son taux de réussite en bouturage est relativement variable en milieu naturel, dépendant du type de rameaux utilisés, de la période de plantation et de l'apport en eau pendant les premiers mois (le taux de bouturage fluctue de 30 à 70 % selon les conditions). On préférera utiliser des plants à racines nues. Son utilisation est envisageable en combinaison avec des espèces à fort taux de reprise, comme le saule pourpre (*Salix purpurea*), le saule drapé (*Salix eleagnos*) ou le saule à trois étamines (*Salix triandra*). Il est judicieux de l'associer à d'autres espèces telles que l'aulne vert (*Alnus alnobetula*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) ou le cytise des Alpes (*Laburnum alpinum*), notamment dans les lits de plants et de plançons, ainsi que dans les caissons en rondins végétalisés. Pour les aménagements réalisés à des altitudes inférieures à 1 000 mètres, le saule marsault est à privilégier, sauf dans les zones encaissées.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Aulnaies vertes et fruticées fraîches (*Alnion viridis*, *Sorbion aucupariae*), boulaies pionnières d'altitude, ripysilves (*Alno-Ulmenalia*, *Salicion elaeagni*), mégaphorbiaies (*Adenostyletalia alliariae*) et faciès humides de diverses forêts (*Erico-Pinion*, *Aceri-Fagion*, *Fagion sylvaticae*, *Piceion abietis*) ; en association avec l'aulne vert (*Alnus viridis*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), l'épicéa (*Picea abies*), plus rarement le cytise des Alpes (*Laburnum alpinum*).

Salix atrocinerea Brot.

Saule roux

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ⁹	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
Cf. <i>S. cinerea</i>		Faible	Très intolérante	x	x	x	x	x	✓	x	✓	Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

Distribution géographique

Espèce subatlantique européenne présente en Espagne, au Portugal, en Grande-Bretagne, plus localement en Italie, Allemagne, Suisse et Danemark. En France, elle est assez commune dans la moitié ouest du pays et dans les Pyrénées, mais elle est plus rare ou absente sur le reste du territoire, remplacée par *Salix cinerea*.

Écologie

Espèce héliophile et hygrophile des bords des eaux, des tourbières et des lieux humides, on la retrouve également sur les lisières de forêts, dans les prairies humides et les milieux marécageux où elle est pionnière. Elle est



Port buissonnant de *Salix atrocinerea* © Patrice Prunier

⁹ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

présente aux étages collinéen et montagnard, jusqu'à 1500 m d'altitude.

Elle colonise des milieux diversifiés, notamment des prairies humides (*Molinio-Holoschoenion*), des aulnaies noires et structure certaines saulaies (*Osmundo-Alnion* et *Alnion glutinosae*). Espèce hygrophile à large amplitude, elle se développe sur des sols tourbeux, argileux ou limoneux, régulièrement inondés, plus ou moins riches en bases et au pH très variable ; parfois sur travertins. Sur les sols très acides, elle est fréquemment remplacée par *S. aurita*.

Description

Arbuste caducifolié souvent plus haut que *Salix cinerea*, mesurant généralement de 3 à 6 mètres, mais pouvant atteindre 10 à 15 mètres dans certaines conditions. Son aspect est assez polymorphe, avec généralement un tronc bien développé et une écorce irrégulièrement fissurée. Son port est buissonnant avec des tiges ascendantes et dressées.

Rameaux

Les jeunes rameaux sont de couleur beige à brun foncé, veloutés, plus ou moins anguleux, et deviennent progressivement glabrescents, sillonnés. Le bois de 2 à 4 ans présente des cannelures saillantes sous l'écorce, à l'instar de *Salix cinerea*.

Bourgeons

Les bourgeons sont imposants, de forme ovoïde, veloutés et d'une couleur brune.

Feuilles

Les feuilles, alternes, sont lancéolées ou oblongues, avec une largeur maximale dans le tiers supérieur, mesurant de 3 à 8 cm de long et se rétrécissant en coin à la base. Elles sont souvent entières, légèrement ondulées. Sur le dessus, elles sont d'un vert foncé brillant, tandis que dessous, elles sont cendrées et tomenteuses, avec des poils roux à peine visibles à l'œil nu, le long des nervures saillantes. Cette teinte rouille est plus

Rameau de l'année et rameau plus ancien de *Salix atrocinerea*
© Ludovic Bonin



Feuilles légèrement ondulées de *Salix atrocinerea* © Patrice Prunier



Bourgeon velouté de *Salix atrocinerea* © Ludovic Bonin



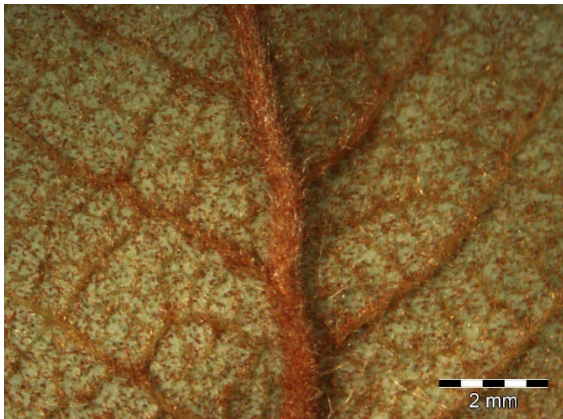
prononcée vers l'extrémité des nouvelles pousses à la fin de l'été et au début de l'automne. Les stipules sont de petite taille.

La forme des feuilles peut parfois être difficile à distinguer de celle de *Salix cinerea*.

Fleurs, fruits et graines

La floraison a lieu avant la feuillaison, de mars à avril. Les fleurs sont regroupées en chatons unisexués à écailles velues. Ils présentent des caractéristiques similaires à ceux de la *Salix cinerea*. Initialement dressés, sessiles ou subsessiles, ils deviennent brièvement pédonculés et prennent une forme cylindrique ou étroitement évasée. Ils mesurent environ 2 à 3 cm de long.

Les chatons mâles possèdent 2 étamines velues et 1 ou 2 anthères jaunes, tandis que les chatons femelles sont souvent plus petits et plus étroits que les mâles possèdent un style court et des capsules tomenteuses.



Poils roux sur les nervures de *Salix atrocinerea* © Virginie Favre

Chatons femelles
de *Salix
atrocinerea* ©
Patrice Prunier



Confusion

Le saule roux peut facilement être confondu avec *Salix cinerea*. Les distinctions entre les deux espèces peuvent sembler subtiles, mais la principale réside dans la pubescence des feuilles de *Salix atrocinerea* aux poils roux le long des nervures de la face inférieure de feuilles dures et brillantes. Les feuilles de *Salix cinerea* se caractérisent par une couleur grise cendrée.

Concernant le génie végétal

Comme le saule cendré, le saule roux présente certaines limites dans son utilisation en génie végétal. En plus de sa croissance relativement lente, il affiche un taux de reprise assez faible, ce qui rend difficile d'assurer une protection rapide du sol. Ces caractéristiques restreignent son utilisation. Toutefois, son port arbustif permet une implantation sur toute la hauteur de la berge.

Il peut être implanté sur divers types de substrats et dans des conditions écologiques variées en raison de sa grande amplitude écologique. Le saule roux a une tolérance relativement bonne aux inondations mais une résistance limitée à la sécheresse.

En raison de son taux de reprise faible (même si des exceptions locales peuvent exister), il n'est généralement pas recommandé de l'utiliser sous forme de boutures, du fait du risque élevé de mortalité. Par conséquent, il est préférable de ne pas l'inclure dans des techniques telles que le tressage, les fascines, les couches de branches à rejet, les lits de plants et plançons. Il peut toutefois être utilisé dans ces techniques en association avec d'autres espèces. L'utilisation du saule roux doit se faire principalement sous la forme de plantations (sauf exceptions), en particulier avec des plants à racines nues.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Fruticées en conditions fraîches ou mésophiles (*Prunetalia spinosae*) ; fourrés marécageux (*Osmundo-Myricion gale*) ; aulnaies noires (*Alnion glutinosae*) ; saulaies ripicoles (*Salicion albae*).

Salix aurita L.

Saule à oreillettes

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁰	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
40-70		Moyenne	Très intolérante	x	x	x	x	d	✓	d	✓	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

d : espèce avec un taux de reprise faible, à utiliser en mélange avec d'autres espèces et en garantissant des conditions optimales de reprise

Distribution géographique

Espèce eurasiatique subboréale commune, le saule à oreillettes est présent dans presque toute la France, à l'exception de la région méditerranéenne et des zones de haute montagne. Elle est assez répandue dans les Alpes du Nord.



Port buissonnant étalé de *Salix aurita* © Patrice Prunier

¹⁰ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

Écologie

Espèce pionnière héliophile ou de demi-ombre, elle est principalement présente dans les saulaies buissonnantes marécageuses (*Salicion cinereae*). Elle atteint son optimum écologique à l'étage montagnard, à proximité des tourbières (*Frangulo-Salicetum auritae*). Elle colonise également les hauts marais et les forêts ouvertes plus ou moins humides, comme les aulnaies et les forêts de bouleaux tourbeuses. *S. aurita* est aussi fréquemment présente au sein des landes acides et des landes à bruyères. Sa distribution s'étend de l'étage collinéen à la base de l'étage subalpin, atteignant jusqu'à 1700 m d'altitude.

C'est une espèce très tolérante qui prospère même dans des conditions d'exposition défavorables. Elle se développe sur divers types de sols organiques ou minéraux granulométrie fine, de type tourbeux, argileux ou limoneux, à engorgement prolongé et pH plutôt acide.

Description

Arbuste extrêmement ramifié, à nombreuses branches, mesurant généralement moins de 2 m de haut. Caducifolié et à port étalé, il forme souvent des peuplements denses et monospécifiques.

Rameaux

Les jeunes rameaux sont généralement anguleux et s'écartent de la tige dans toutes les directions. Ces rameaux sont minces, allant du brun foncé au rougeâtre ou au beige orangé, plus ou moins pubescents, mais devenant rapidement glabres ou parfois munis de poils épars avec le temps. Le bois des rameaux présente de nombreuses stries proéminentes sous l'écorce.

Bourgeons

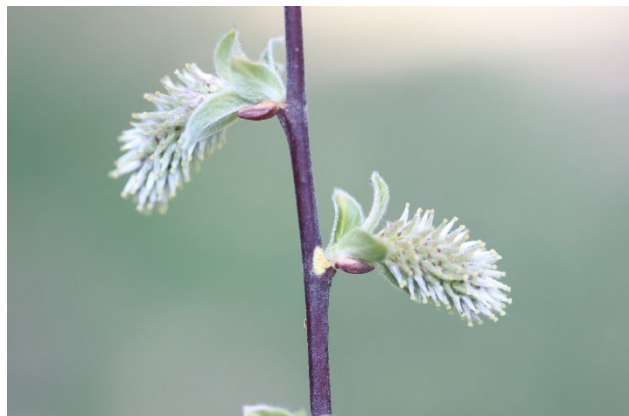
Les bourgeons sont de couleur rougeâtre, globuleux à ovoïdes, et sont glabres à glabrescents. Ils mesurent moins de 4 mm et



Feuilles aux stipules auriculaires proéminentes de *Salix aurita*
© Patrice Prunier



Rameaux minces de *Salix aurita* © Patrice Prunier



Chatons de *Salix aurita* © Patrice Prunier

sont protégés par une seule écaille en forme de capuchon.

Feuilles

Les feuilles, alternes, sont obovales ou oblongues, d'un vert foncé mat et rugueuse sur la face supérieure, tandis qu'elles sont tomenteuses, de couleur blanchâtre, avec une

nervation proéminente sur la face inférieure. Mesurant de 1 à 4 cm de long, elles présentent des bords ondulés et robustes, avec une petite pointe tordue (déjetée). La base des feuilles est cunéiforme, se rétrécissant en un pétiole court de 2 à 5 mm de long. Une caractéristique distinctive de cette espèce réside dans ses stipules auriculaires proéminentes, de grande taille, dentées et persistantes, qui ressemblent à des oreillettes, bien qu'elles soient caduques à la fin de la saison de végétation.

Fleurs, fruits et graines

La floraison est précoce, se produisant d'avril à mai avant le développement des feuilles. Les fleurs sont regroupées en chatons unisexués, dressés, petits et denses. Les bractées sont noirâtres au sommet.

Les chatons mâles, bien que petits, sont nombreux. Ils mesurent de 1 à 2 cm de long et de 0,5 à 1 cm de large. Ces chatons sont composés de deux étamines velues avec des anthères jaunes. Les chatons femelles sont plus longs que les chatons mâles. Les ovaires sont étroitement en forme de flasque et de couleur gris-tomenteux, avec des pédoncules distincts. Les fleurs femelles, à écailles velues, se composent d'un style court se terminant par deux stigmates bilobés.

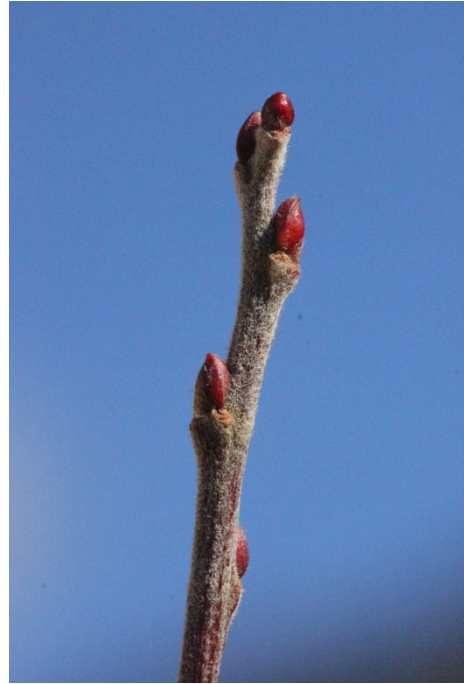
Concernant le génie végétal

Bien qu'il offre de nombreux avantages pour le génie végétal, le saule à oreillettes (*Salix aurita*) est encore sous-utilisé dans ce domaine. Son système racinaire très étendu et son port buissonnant s'avèrent adaptés pour le drainage des terrains argilo-limoneux déstabilisés par des infiltrations d'eau, à teneur en eau peu importante.

Son utilisation est très limitée par sa faible amplitude écologique, préférentiellement sur des matériaux fins, riches en matière organique et bien alimentés en eau. Il faut éviter les substrats grossiers qui sont trop drainants. En association avec le saule laurier (*Salix pentandra*) et le saule rampant (*Salix repens*), espèce protégée, il est possible de l'implanter au niveau des zones d'infiltration d'eau ou des sols sujets à des risques de déstabilisation des berges. Néanmoins, sa faible compétitivité est un élément clé à prendre en compte pour les associations avec d'autres espèces, en évitant les espèces à fort développement et en l'implantant en forte densité.

Compte tenu de son taux de reprise relativement faible et de ses branches minces, qui rendent souvent difficile la recherche de boutures ayant un diamètre suffisamment large et une longueur adaptée pour être enfoncées dans le sol ou insérées dans des fascines, des tressages ou des couches de branches à

*Bourgeons
ovoïdes de Salix
aurita © Patrice
Prunier*



Confusion

Le saule à oreillettes peut être confondu avec le saule roux (*Salix atrocinerea*) et le saule cendré (*Salix cinerea*). Ces derniers se distinguent du saule à oreillettes par leurs feuilles, qui ne présentent pas d'ondulations sur la marge et dépassent généralement 4 cm de long. Les hybrides entre ces espèces sont localement répandus.

rejet, son utilisation dans ces structures n'est ni possible ni recommandée. Privilégier son utilisation en plants paraît l'option la plus adaptée pour cette espèce. On peut ainsi la retrouver dans les lits de plants et plançons, les caissons végétalisés et les plantations, sous la forme de branches, à condition de pallier le taux de reprise faible en l'associant à d'autres espèces et en garantissant des conditions optimales de reprise.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Fruticées sur sols marécageux (*Salicetalia auritae*) ; aulnaies de sols acides (*Alnion glutinosae*) ; forêts collinéennes sur sols hydromorphes, à couvert clair (*Quercetalia roboris*).

Salix caesia Vill.

Saule bleuâtre

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹¹	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 50		Lente		x	x	x	x	✓	f	✓	f	Schiechtl, 1973; Bonin et al., 2013; Rousset et al., in prep

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

f : espèce adaptée, sous réserve de disponibilité en pépinière

Distribution géographique

Espèce eurasiatique présente seulement dans les Alpes et en Asie centrale et boréale, plus localement en Norvège, elle est globalement assez rare dans les Alpes du Nord, mais localement abondante dans certaines zones intra-alpines.

Écologie

Espèce pionnière, on la trouve principalement dans les broussailles subalpines fraîches. Son habitat optimal se situe dans les saulaies buissonnantes riveraines intra-alpines subalpines (*Salicetum caesio-foetidae*). Cette espèce est fréquemment observée le long des sources et des torrents, ainsi que dans les prairies humides et les marais. Son aire de



Port buissonnant de *Salix caesia* © Patrice Prunier

distribution s'étend généralement entre 1700 m et 2300 m d'altitude, soit à l'étage subalpin supérieur (optimum) et à la base de l'étage alpin.

Elle prospère sur des matériaux alluviaux fins tels que les sables, les limons et les argiles,

¹¹ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

parfois tuffeux, et sur des sols à faible teneur en nutriments, frais à humides au pH variable, mais le plus souvent neutre à basique.

Description

Arbrisseau buissonnant à feuilles caduques, fortement ramifié, adoptant un port étalé ou ascendant, pouvant atteindre parfois jusqu'à 2 mètres de hauteur, il se développe souvent en populations denses.

Rameaux

Les jeunes rameaux sont brillants, d'une teinte rougeâtre à noirâtre. Ils sont généralement minces, lisses, et conservent une couleur brune foncée avec le temps. Ils poussent en s'étalant ou en s'orientant vers le haut. L'écorce n'est pas desquamante.

Bourgeons

Les bourgeons sont de forme globuleuse ou ovoïde. Ils sont glabres, aplatis avec une légère entaille sur le dessus. Leur dimension varie de 2 à 4 mm, avec une longueur au moins deux fois supérieure à leur largeur. Les bourgeons inférieurs sont souvent disposés de manière opposée ou subopposée.

Feuilles

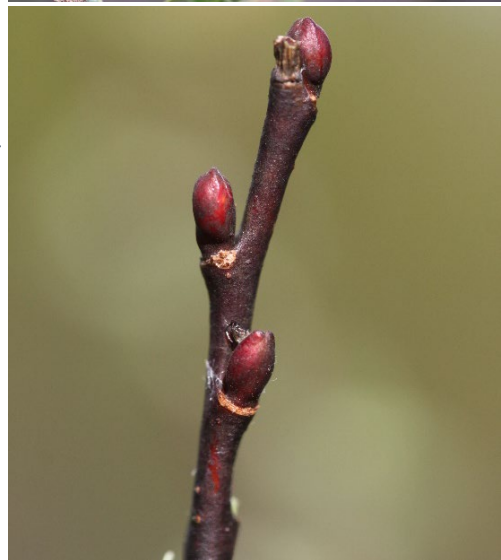
Les feuilles sont épaisses et adoptent une forme variant d'ovale à obovale, elliptique à lancéolée, avec des marges entières. Elles ont un sommet brusquement pointu et une base cunéiforme. Leur longueur se situe généralement entre 1 et 3 cm, tandis que leur largeur varie de 1 à 2 cm, les rendant environ 2 à 3 fois plus longues que larges. Elles sont glabres sur les deux faces, avec une surface mate. La face supérieure est d'un vert pâle, tandis que la face inférieure est de couleur blanchâtre ou glauque. Les pétioles qui les attachent à la branche sont très courts, mesurant seulement entre 1 et 2 mm. De minuscules stipules sont présentes.

Fleurs, fruits et graines

Feuilles elliptiques à lancéolées et rameaux rougeâtres de Salix caesia © Patrice Prunier



Bourgeons ovoïdes de Salix caesia © Patrice Prunier



Chatons de Salix caesia © Patrice Prunier



La floraison de cette espèce survient en juin à juillet, coïncidant avec la feuillaison. Les fleurs, protégées par des écailles glabrescentes, initialement jaunâtres, virent au brun-rouge à l'extrémité. Elles sont regroupées en petits chatons ovoïdes prolifiques et denses, mesurant environ 1 à 1,5 cm de long et 1 à 1,25 cm de diamètre, s'étendant alternativement le long des branches. Les chatons peuvent être sessiles ou avoir de courts pédoncules allant jusqu'à 3 mm de long. Ils sont entourés de trois à six bractées foliaires ovales ou largement elliptiques, lisses sur la face supérieure mais légèrement velues sur la face inférieure.

Les chatons mâles comprennent deux étamines, généralement soudées à la base, avec des anthères d'abord rouge pourpre, puis devenant dorées à maturité. Les chatons femelles sont constitués d'une capsule violacée pubescente, mesurant environ 4 à 5 mm, attachée à un court pédoncule. L'ovaire peut être sessile ou subsessile, tandis que le style est moitié moins long que l'ovaire.



Rameaux de *Salix caesia* © Patrice Prunier

Confusion

Pendant la période de repos hivernal, le saule bleuâtre peut être pris pour le saule fétide (*Salix foetida*) qui par contre présente des bourgeons généralement velus, deux à trois fois plus longs que larges. Le saule bleuâtre peut parfois être également confondu avec le saule pourpre (*Salix purpurea*), qui se distingue par ses bourgeons allongés, au moins deux fois plus longs que larges, et ses feuilles parfois légèrement dentées à l'extrémité.

Concernant le génie végétal

Salix caesia est une espèce adaptée à une utilisation en génie végétal, principalement à l'étage alpin et subalpin. Grâce à sa ramure souple, étalée ou ascendante, elle se révèle idéale pour stabiliser les berges des torrents ou les terrains inclinés soumis à des perturbations régulières. Plantée en bordure de berges, les buissons denses qu'elle forme aident à disperser l'énergie des crues et à retenir les sédiments fins, favorisant ainsi l'établissement d'autres espèces.

Cette espèce est adaptée à une variété de substrats, qu'ils soient fins ou grossiers, calcaires ou siliceux, de préférence dans des zones bien approvisionnées en eau, telles que les zones proches des nappes phréatiques ou des écoulements. En tant qu'espèce d'altitude, il est recommandé de l'implanter dans des zones ensoleillées situées entre 1 700 et 2 300 mètres d'altitude.

Il est à noter que le taux de reprise de cette espèce reste moyen, mais peut atteindre plus de 50%, ce qui permet son utilisation en bouture ou en branches, bien qu'une mortalité importante soit possible. En raison de ses branches courtes, fines et très ramifiées, il peut être difficile de se procurer des boutures ou des branches de taille suffisante pour les aménagements. Cependant, il peut être intéressant de l'intégrer sous forme de ramilles vivantes fixées sous des fascines ou dans des lits de plants et de plançons. Cette approche peut être efficace avec des densités appropriées, à environ 30 à 40 pièces par mètre, et en présence d'espèces complémentaires associées, à faible compétitivité. Il est également possible de l'utiliser sous forme de plants en motte ou en racines nues dans les lits de plants et de plançons, ainsi que dans les caissons en rondins végétalisés, du pied jusqu'au milieu de la berge. Il peut être bénéfique de l'associer à d'autres saules subalpins, tels que les saules fétide (*Salix foetida*) ou hasté (*Salix hastata*), avec lesquels il coexiste fréquemment en milieu naturel.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies buissonnantes subalpines riveraines intra-alpines (*Salicetum caesio-foetidae*) ; peut être utilisé avec le saule fétide (*Salix foetida*) et le saule hasté (*Salix hastata*).

Salix cinerea L.

Saule cendré

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹²	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 70 sauf exception		Faible	Très intolérante	x	x	x	x	x	✓	x	✓	Schiechtl, 1973; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Sauli et al., 2006; Evette et al., 2009

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

Distribution géographique

Espèce eurasiatique présente également sur le continent Américain. En France, elle est très commune, sauf dans la moitié ouest, où elle est remplacée par *Salix atrocinerea*.

Écologie

Espèce pionnière héliophile et hygrophile des bords des eaux, des tourbières et des lieux humides, on la retrouve également sur les lisières de forêts, dans les prairies humides et les milieux marécageux. Elle est présente de



Port arbustif de *Salix cinerea* © Patrice Prunier

¹² La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

l'étage collinéen à l'étage subalpin, jusqu'à 2000 m d'altitude.

Elle se développe généralement sur des sols argileux, limoneux ou tourbeux, parfois des travertins, fréquemment inondés, plus ou moins riches en bases et au pH variable. Cette espèce hygrophile à large amplitude trophique présente une résistance élevée aux inondations, mais une faible résistance à la sécheresse.

Description

Arbuste caducifolié, atteignant généralement une hauteur de 3 et 6 mètres, il est souvent très ramifié dès la base, bien qu'il puisse parfois avoir un tronc distinct. Il présente un port en boule avec des tiges ascendantes. Ses branches s'étendent pour former une couronne large, qui peut être arrondie ou aplatie. Son écorce est de couleur gris-brun foncé et devient fissurée avec l'âge.

Rameaux

Les jeunes rameaux sont épais, arrondis, de couleur gris-olive et veloutés. Ils présentent une pilosité dense au moins jusqu'à la fin de la première année, avant de devenir glabres ou subglabres avec le temps. Les nœuds sont bien marqués et des cannelures saillantes sont visibles sous l'écorce.

Bourgeons

Les bourgeons sont de couleur grisâtre-cendrée, pubescents et veloutés. Ils sont de forme ovoïde-pointue et mesurent entre 5 et 8 mm de long.

Feuilles

La forme des feuilles de cette espèce est très variable, généralement lancéolée avec la plus grande largeur dans le tiers supérieur, une base en coin et une pointe courte au sommet, Mesurant de 4 à 10 cm de long, elles sont rugueuses, légèrement ondulées, mates sur le dessus, cendrées et tomenteuses avec des nervures saillantes sur le dessous. Les pétioles mesurent généralement moins de 1 cm de

*Jeune rameau
velouté de Salix
cinerea ©
Patrice Prunier*



*Chatons mâles
de Salix
cinerea ©
Patrice Prunier*



long. Les stipules, parfois persistantes et presque aussi longues que le pétiole, ont une forme assez large en oreille, bien qu'elles puissent également être petites et caduques, voire absentes.

Fleurs, fruits et graines

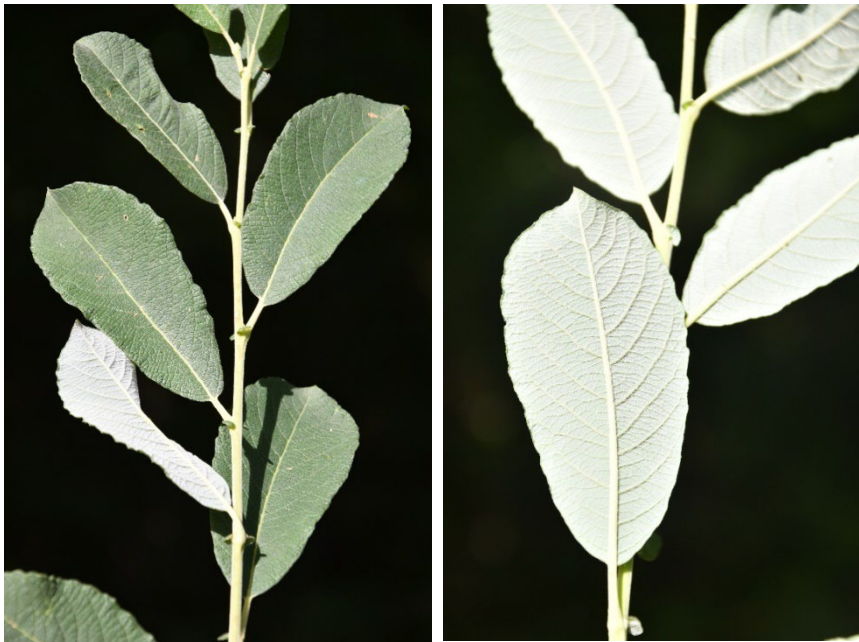
La floraison a lieu avant la feuillaison, de mars à avril. Les fleurs sont regroupées en chatons unisexués, à écailles velues. Ils présentent des caractéristiques similaires à ceux de la *Salix atrocinerea*. Initialement dressés, sessiles ou subsessiles, ils deviennent brièvement pédonculés et prennent une forme cylindrique ou étroitement évasée. Ils mesurent environ 2 à 3 cm de long.

Les chatons mâles possèdent 2 étamines velues et 1 ou 2 anthères jaunes, tandis que les chatons femelles sont souvent plus petits et

plus étroits que les mâles. Ils possèdent un style court et des capsules tomenteuses.

Confusion

Le saule cendré peut facilement être confondu avec *Salix atrocinerea*. Les distinctions entre les deux peuvent sembler subtiles, mais la principale réside dans la pubescence des feuilles de *Salix atrocinerea* avec des poils roux le long des nervures de la face inférieure des feuilles qui sont également dures et brillantes. Les feuilles de *Salix cinerea* se caractérisent par une couleur cendrée à la face inférieure.



Face supérieure et face inférieure de Salix cinerea © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Le saule cendré présente certaines limites dans son utilisation en génie végétal. En plus de sa croissance relativement lente, il affiche un taux de reprise généralement assez faible, ce qui rend difficile une protection rapide du sol. Ces caractéristiques restreignent son utilisation. Toutefois, son port arbustif permet une implantation sur toute la hauteur de la berge.

En raison de sa grande amplitude écologique, il peut être implanté sur divers types de substrats et dans des conditions écologiques variées sous conditions d'un accès à l'eau ; le saule cendré présentant une tolérance relativement bonne aux inondations, mais une résistance limitée à la sécheresse.

En raison de son taux de reprise assez faible, il n'est généralement pas recommandé de l'utiliser sous forme de boutures. Par conséquent, il est préférable de ne pas l'inclure dans des techniques telles que le tressage, les fascines, les couches de branches à rejet, les lits de plants et plançons. Il peut toutefois

être utilisé dans ces techniques en association avec d'autres espèces. L'utilisation du saule cendré doit se faire principalement sous la forme de plantations, en particulier avec des plants à racines nues.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Fourrés en conditions marécageuses (*Salicetalia auritae*) ; aulnaies noires (*Alnion glutinosae*) ; saulaies blanches ripicoles (*Salicion albae*) ; plus rarement dans certaines fruticées en conditions fraîches (*Prunetalia spinosae*).

Salix daphnoides Vill.

Saule faux daphné

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹³	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 90		Rapide	Modérément tolérante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; C. Graf et al., 2003; Venti et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

Distribution géographique

Espèce eurasiatique, périalpine, relativement rare à l'échelle du territoire français. Elle est particulièrement rare dans les Pyrénées, le massif central, la vallée du Rhin et le Jura, mais est un peu plus fréquente dans les Alpes du Nord, notamment en Savoie et dans le Dauphiné.



Port dressé de *Salix daphnoides* © Patrice Prunier

¹³ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

Écologie

Espèce pionnière héliophile, mésohygrophile orophile, colonisant les lits majeurs et terrasses alluviales des torrents et rivières subalpines, voire collinéennes. On la retrouve dans les saulaies ripicoles (*Salicion eleagni*) et les saulaies subalpines (*Salicion pentandrae*). Son aire de répartition s'étend jusqu'à 2300 mètres d'altitude, à l'étage subalpin, avec une préférence marquée pour l'étage montagnard.

Les conditions propices à son développement correspondent à des substrats grossiers (sables à galets), avec un pH basique à légèrement acide, le plus souvent calcaires ou schisteux riches en bases. Elle se développe sur des sols humides mais filtrants, présentant des alternances d'engorgement et de dessèchement, plus ou moins riches en nutriments.

Description

Arbuste caducifolié de 4 à 14 m de hauteur, il présente un port dressé avec une couronne arrondie, des branches dressées ou étalées, et une écorce plutôt lisse et grisâtre. Il forme des troncs robustes.

Rameaux

Les rameaux se distinguent par leur robustesse. Les jeunes rameaux de la saison peuvent être plus ou moins velus, mais deviennent généralement glabres et brillants, affichant une couleur vert jaunâtre à rouge foncé. À l'âge de 2 à 3 ans, devenus glabres et lustrés, ils revêtent le plus souvent une pruine bleuâtre à blanche et adoptent une teinte brun rougeâtre foncé. Avec le temps, l'écorce des rameaux vieillissants vire au gris-noir, tandis que leur face intérieure conserve sa couleur jaune.

Bourgeons

De couleur cramoisie foncée et glabres, les bourgeons sont de grande taille, pointus, dressés, renflés-aigus, et peuvent parfois être légèrement velus. Les bourgeons foliaires sont plus ou moins comprimés dorsalement et ont

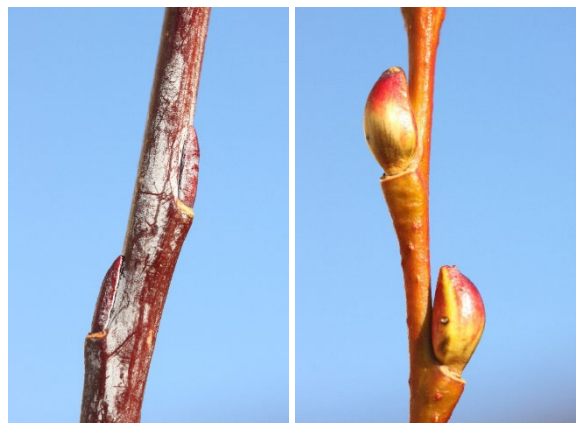
Rameaux prumineux
de *Salix daphnoides*
© Patrice Prunier



Chatons femelles
de *Salix daphnoides*
© Florian Mombrial



une taille allant de 3 à 8 mm. Les bourgeons floraux sont plus imposants, de forme ovoïde, renflés à la base, et aplatis à l'apex, évoquant la forme d'un "bec de canard", dépassant couramment 1 cm de long.



Bourgeons comprimé et en forme de "bec de canard" et bourgeons ovoïdes © Patrice Prunier

Feuilles

Les feuilles, alternes, sont de grande taille, mesurant de 6 à 12 cm de long et de 2 à 4 cm de large. Initialement finement laineuses, elles deviennent glabres, avec un aspect brillant sur la face supérieure et une teinte glauque blanchâtre sur la face inférieure, présentant quelques poils. Elles ont une texture légèrement coriace et prennent une forme elliptique-lancéolée, se terminant en une pointe brièvement acuminée, avec une base largement cunéiforme. Les marges sont distinctement et assez régulièrement pourvues de glandes, étroitement épineuses. Le pétiole est bien développé, mesurant de 0,7 à 2 cm de long, est assez robuste, canaliculé et densément poilu sur la face supérieure. Les pétioles sont dépourvus de glandes. Les stipules sont grandes, aiguës et dentées, mais rapidement caduques.

Flours, fruits et graines

La floraison survient entre fin février et début mai, précédant la formation des feuilles. Les fleurs sont protégées par une écaille ovale-elliptique, de teinte brunâtre, jaune ou verte, recouverte de poils. Groupées en chatons de taille considérable, mesurant entre 3 et 4 cm de long, ils se présentent de manière dense, soit

cylindriques, érigés ou légèrement inclinés, et sont fortement velus.

Les fleurs mâles comportent 2 étamines distinctes et lisses, généralement avec 1 ou 2 anthères jaunes. Les chatons mâles sont courts, denses et dressés, et sessiles. Les fleurs femelles, bien que moins ornementales que les mâles, présentent des poils plus courts sur les écailles du chaton. Elles sont dotées d'un style allongé et de stigmates entiers ou divisés. Leurs capsules, glabres et non pédonculées, mesurent de 3 à 5 mm de long.

Confusion

Il est possible de confondre le saule faux daphné avec le saule à trois étamines (*Salix triandra*), qui se distingue par ses rameaux de l'année cannelés à l'extrémité et par des fleurs mâles dotées de trois étamines. Il peut être également confondu avec le saule laurier (*Salix pentandra*), reconnaissable à ses feuilles visqueuses et odorantes lorsqu'elles sont jeunes, ainsi qu'à ses bourgeons foliaires dont l'apex n'est pas appliqué sur les rameaux. Le saule laurier se distingue par ailleurs par la persistance de ses fleurs et la couleur jaune présente sous l'écorce.



Face supérieure verte luisante et face inférieure glauque à blanchâtre des feuilles de *Salix daphnoides* © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Le saule faux daphné présente des caractéristiques particulièrement adaptées au génie végétal, en faisant une espèce idéale et précieuse pour la stabilisation des berges de rivières, pour lequel elle est déjà largement utilisée. Grâce à ses rameaux de grande taille, sa forte capacité de régénération et son taux de reprise élevé, cette espèce vigoureuse protège rapidement les couches supérieures du sol tout en résistant à la traction et aux chocs éventuels. Elle est également efficace pour le drainage des berges et talus instables soumis à des infiltrations. Cependant, il est recommandé de ne pas l'implanter en grande quantité à la base de la berge pour éviter le basculement de l'arbre, car cette espèce peut atteindre plus de dix mètres de hauteur et développe souvent des troncs uniques.

Ses préférences écologiques permettent son utilisation sur des substrats grossiers, allant des sables aux galets, sur des sols humides avec des alternances d'engorgement et de dessèchement. Sa tolérance au froid et à la sécheresse permet son implantation même sur des substrats bruts très drainants, du pied jusqu'au sommet de la berge.

Son excellent taux de reprise et la taille de ses rameaux en font une source idéale de boutures, plançons, ramilles, ou même de pieux vivants ou morts. Elle peut être intégrée dans divers ouvrages de génie végétal tels que des caissons en rondins, des tressages et fascines, des lits de plants et plançons, du bouturage et des couches de branches à rejets. Pour une couverture végétale et un enracinement complémentaire, il est courant de l'associer à d'autres saules arbustifs aux schémas racinaires différents.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies ripicoles (*Salicion eleagni*) ; saulaies subalpines (*Salicion pentandrae*) ; aulnaies alluviales (*Alnion incanae*). On l'associe le plus souvent avec le saule drapé (*Salix elaeagnos*), le saule pourpre (*Salix purpurea*) ou encore le saule noircissant (*Salix myrsinifolia*).

Salix eleagnos Scop.

Saule drapé

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁴	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
70-90	1.8	Faible sauf en juvénile	Modérément tolérante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; C. Graf et al., 2003; Venti et al., 2003; Sauli et al., 2006; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

Distribution géographique

Espèce européenne péréalpine, assez commune en France, on la retrouve principalement dans les régions montagneuses telles que les Alpes, les Pyrénées, le Jura, les Cévennes, les Corbières, et les Vosges. Elle peut également être rencontrée le long de l'arc méditerranéen. Cependant, sur le reste du territoire, elle demeure plus rare.



Port dressé de *Salix eleagnos* © Patrice Prunier

¹⁴ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

Écologie

Espèce pionnière, héliophile, elle structure les saulaies arbustives des bords de rivières et des terrasses alluviales, mais peut être également présente au sein des fourrés de bords de torrents, fruticées sèches, saulaies arborées et pineraies à tendance sèche. Elle peut même s'adapter à des environnements plus extrêmes tels que des carrières, des gravières, et des talus exposés à des inondations temporaires. Il arrive parfois qu'elle forme des peuplements monospécifiques. Son aire de répartition s'étend de l'étage collinéen à subalpin, jusqu'à 2000 m d'altitude.

Son optimum écologique se situe au sein de saulaies alluviales sur des matériaux grossiers (*Salicion elaeagni*). Elle prospère sur des substrats alluvionnaires plus ou moins grossiers, de préférence calcaires ou schisteux, riches en bases, au pH basique à neutre et relativement pauvres en nutriments. Il s'agit d'une espèce pionnière mésoxérophile à mésohygrophile capable de supporter des fluctuations du niveau hydrique de la nappe phréatique, y compris des inondations régulières.

Description

Arbuste caducifolié dressé, atteignant généralement de 1 à 5 mètres de hauteur, il peut parfois dépasser les 8 voire 10 mètres pour prendre une forme d'arbre élancé, notamment dans les aulnaies blanches. Il génère de nombreuses tiges dressées, créant ainsi un arbuste très ramifié.

Rameaux

Les rameaux de l'année sont originellement verdâtres, avec une pubescence grise ou tomenteuse à subtomentueuse densément blanchâtre. Avec le temps, ils prennent une couleur brun jaunâtre, voire rougeâtre, et deviennent glabres et luisants. Ils peuvent être cannelés à l'extrémité.

Rameaux de l'année
tomenteux de *Salix*
eleagnos © Patrice
Prunier



Face inférieure
blanche
tomentueuse des
feuilles de *Salix*
eleagnos ©
Patrice Prunier



Bourgeons
appliqués sur le
rameau de *Salix*
eleagnos ©
Patrice Prunier



Bourgeons

Les bourgeons sont de petite taille, mesurant de 4 à 9 mm de long, étroits et plaqués contre le rameau. Initialement finement poilus, ils deviennent assez rapidement glabres, affichant une couleur verte-marron ou rougeâtre. Ils sont fréquemment regroupés vers l'extrémité des rameaux, avec plusieurs bourgeons sur les derniers centimètres.

Feuilles

Les feuilles, disposées de manière alterne, sont longues, parfois presque linéaires à linéaires-lancéolées, assez rapprochées les unes des autres. Leur longueur varie de 2 à 15 cm pour une largeur d'environ 0,8 cm. Les bords des feuilles sont à peine dentés et fortement enroulés. La face supérieure des feuilles est lisse, d'un vert mat, tandis que la face inférieure est visiblement recouverte d'une tomentum blanchâtre. Ces poils se croisent, donnant un aspect mat lorsque observés à l'œil nu. Les feuilles se rétrécissent vers la base et se terminent par un apex finement acuminé. Les nervures sont prononcées, et les feuilles sont munies de courts pétioles. Les stipules sont généralement absentes.

Fleurs, fruits et graines

La floraison a lieu juste avant la feuillaison, de mars à avril. Les fleurs sont protégées par des écailles vertes qui deviennent brunâtres à l'extrémité. Elles sont regroupées en chatons unisexués qui se forment principalement vers l'extrémité des rameaux. Les chatons sont effilés, sub-cylindriques, minces (de 2 à 4 cm) et généralement arqués vers le bas. Les bractées sont obovales et jaunâtres.

Concernant le génie végétal

En raison de ses caractéristiques, le saule drapé se révèle être une espèce idéale pour la stabilisation des berges des rivières, particulièrement sur des substrats grossiers. Sa croissance juvénile rapide, son système racinaire robuste et sa grande capacité de régénération en font une espèce extrêmement efficace pour la protection rapide des sols, même sur des terrains en forte pente. Les rameaux, à la fois robustes et souples, offrent une résistance à la traction et aux chocs, se cicatrisant rapidement tout en produisant de nouvelles pousses. Cette espèce résiste également à l'ensevelissement et peut tolérer un recouvrement important de la base du tronc par des matériaux gravelo-terreux, en cas de crues ou

*Chatons mâles de
Salix eleagnos ©
Patrice Prunier*



Les chatons mâles sont étalés, denses, avec 2 étamines soudées à la base et sont glabres. Les chatons femelles sont généralement plus courts et dressés que les mâles, et avec l'âge, ils deviennent plus relâchés. Ils possèdent un style court terminé par 2 stigmates, qui peuvent être entiers ou bilobés.

Confusion

L'état végétatif rend parfois difficile la distinction entre certaines espèces. Le saule drapé peut être confondu avec le saule des vanniers (*Salix viminalis*), qui a des feuilles argentées et soyeuses sur la face inférieure, ainsi qu'avec le saule blanc (*Salix alba*), qui possède des feuilles et des rameaux recouverts de poils appliqués.

de glissements de terrain. Les applications de cette espèce sont variées, du pied de la berge jusqu'au sommet, bien qu'il soit recommandé de ne pas l'utiliser en grande quantité au pied de la berge en raison de sa tendance à développer des troncs uniques pouvant atteindre jusqu'à 10 mètres de hauteur.

Ses préférences écologiques assez larges rendent son champ d'application également vaste, s'adaptant à des substrats alluvionnaires plus ou moins grossiers. Tolérant à l'inondation et à la sécheresse, le saule drapé peut être utilisé même sur des substrats très drainants.

Grâce à la taille de ses rameaux et son taux élevé de reprise lors du bouturage, le saule drapé peut être utilisé sous diverses formes, allant des boutures, de plançons, de branches ou de pieux. Il trouve des applications dans diverses techniques de génie végétal, notamment les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés, les tressages et les fascines de saules, les couches de branches à rejets et le bouturage. Cette espèce est souvent associée à d'autres espèces telles que les saules faux daphné, pourpre et noircissant, assurant ainsi une complémentarité en termes de couverture végétale et d'enracinement.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Fourrés de bords de torrents et zones alluviales (*Salicion elaeagni*) ; saulaies basses (*Salicetalia purpureae*) ; fruticées sèches (*Berberidion*) ; pineraies à tendance sèche (*Erico-Pinetalia*). Le saule drapé est souvent associé au saule faux daphné (*Salix daphnoides*), au saule pourpre (*Salix purpurea*) et au saule noircissant (*Salix myrsinifolia*), ou encore au bouleau pendant (*Betula pendula*), au sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), à l'aulne blanc (*Alnus incana*) ou à l'argousier (*Hippophae rhamnoides*).

Salix foetida Schleich. ex DC.

Saule fétide

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁵	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 50 Jusqu'à 96 pour Rousset et al., in prep		Lente	Intolérante	x	x	a	x	✓	f	a	f	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; Niinemets & Valladares, 2006; Bonin et al., 2013; Rousset et al., in prep

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

f : espèce adaptée, sous réserve de disponibilité en pépinière

Distribution géographique

Espèce orphyte européenne, elle est présente exclusivement dans les Alpes et les Pyrénées en France. Elle est relativement répandue dans les Alpes du Nord, où elle peut abonder localement, surtout dans les zones supraforestières des Alpes internes, telles que les Écrins et la Vanoise.



Arbrisseau buissonnant de *Salix foetida* © Patrice Prunier

¹⁵ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

Écologie

Espèce pionnière que l'on trouve dans les brousses subalpines fraîches, elle colonise les abords des sources et des torrents, ainsi que les couloirs d'avalanches, les pelouses fraîches humides, les marécages, et même les moraines et les éboulis. Principalement présente dans des milieux ouverts et bien exposés, elle atteint son optimum écologique au sein des saulaies buissonnantes riveraines subalpines (subalpin supérieur) (*Salicion waldsteinianae*) qu'elle structure parfois. On peut la rencontrer aux étages subalpin et alpin inférieur, de 1400 à 2500 mètres d'altitude.

Cette espèce prospère sur des substrats frais à humides, caractérisés par une faible teneur en nutriments et en bases, avec un pH neutre à acide et une granulométrie variable. On peut la retrouver même sur des substrats grossiers, à condition qu'ils soient pauvres en calcaire et alimentés en eau.

Description

Arbrisseau buissonnant de petite taille, caducifolié, il est caractérisé par des branches courtes et denses. Son port est étalé ou ascendant, avec des rameaux disposés en couronne divergente, atteignant rarement plus de 2 mètres de hauteur. Il a la particularité de former fréquemment des populations denses.

Rameaux

Les rameaux de l'année peuvent présenter des variations allant de glabre au nettement velu, souvent avec une pilosité discrète (poils courts et épars). Au fil du temps, ils deviennent lisses et brillants, montrant des stries sous l'écorce. Initialement verdâtres, ils deviennent bruns-noir, rougeâtres ou orangés en cours d'été, puis évoluent vers une teinte gris foncé et ont tendance à s'exfolier avec l'âge. Ils sont généralement arqués-ascendants.

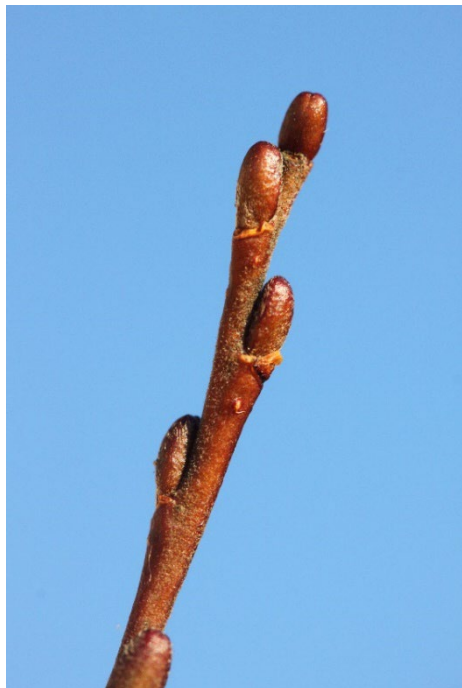
Bourgeons

Les bourgeons sont légèrement velus, présentant une couleur similaire à celle des

Feuilles à la face supérieure vert luisant et la face inférieure vert pâle de *Salix foetida* © Patrice Prunier



Bourgeons ovoïdes de *Salix foetida* © Patrice Prunier



rameaux. Mesurant de 2,5 à 4,5 mm, ils présentent une forme ovoïde, ellipsoïde, ou cylindrique avec un sommet obtus, souvent deux à trois fois plus longs que larges.

Feuilles

Les feuilles sont elliptiques-lancéolées, mesurant de 1 à 5 cm de long, soit environ 2 à 3 fois plus longues que larges. Elles sont fortement et régulièrement dentelées ; les dents portant des glandes jaunes

proéminentes. Sur le dessus, elles sont d'un vert foncé, glabres et luisantes, tandis qu'elles

présentent une teinte verte pâle, à glauque au revers et sont légèrement soyeuses.

Fleurs, fruits et graines

Les chatons sont tardifs, la floraison a lieu en même temps que la feuillaison, de juin à juillet. Les fleurs sont protégées par une écaille barbue brune ou ferrugineuse et sont rassemblées en chatons courts et dressés ne dépassant pas 2 cm de long.

Les chatons mâles, composés de 2 étamines à filets glabres et d'anthères rougeâtres, sont courts et subsessiles, tandis que les chatons femelles sont oblongs, pédonculés et constitués d'une capsule velue pouvant atteindre 5 mm de long.

Chatons de Salix foetida © Patrice Prunier



Rameaux arqués-ascendants de Salix foetida © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

En formant des colonies denses le long des torrents, cette espèce présente un intérêt particulier pour le génie végétal en milieu subalpin. Grâce à ses branches souples, qui généralement n'excèdent pas 2 mètres en pleine lumière, elle assure la stabilisation des berges des torrents et des terrains fortement inclinés. Les buissons denses ont la capacité de dissiper l'énergie des crues et de retenir les sédiments fins en pied de berge, favorisant ainsi la stabilisation des berges et la création d'un environnement propice à l'installation d'autres espèces végétales.

Cependant, il y a quelques contraintes à considérer lors de son utilisation. Elle peut être implantée sur des substrats grossiers et bien drainés, à condition qu'ils soient peu riches en calcaire et qu'ils bénéficient d'un bon apport en eau. Elle préfère les secteurs ouverts ou bien exposés. Son utilisation optimale se situe entre 1700 m et 2300 m d'altitude, du pied de la berge jusqu'au milieu de la berge.

Le taux de reprise de cette espèce est variable, allant de moyen à élevé, mais ses rameaux sont courts, fins et très ramifiés, ce qui la rend moins adaptée à une utilisation sous forme de bouture ou de branches dans des aménagements tels que les fascines ou les couches de branches à rejet. Il est souvent difficile de trouver un grand nombre de boutures suffisamment longues, larges et rectilignes. Cependant, elle peut être intégrée sous forme de ramilles vivantes anti-affouillement sous une fascine, ou encore dans des lits de plants et plançons, à condition que la densité de plantation soit suffisamment élevée (environ 30 à 40 pièces par mètre) et que la compétition entre les espèces soit évitée.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies buissonnantes subalpines riveraines intra-alpines (*Salicetum caesio-foetidae*) ; à associer avec le saule bleuâtre (*Salix caesia*) sur matériaux fins ou avec le saule hasté (*Salix hastata*) sur matériaux grossiers, l'aulne vert (*Alnus viridis*) ou la myricaire (*Myricaria germanica*) en pied de berge, voire *Salix daphnoides*, *Salix purpurea*, *Betula pendula*, *Alnus viridis* et *Rosa pendulina* en haut de berges.

Salix × fragilis L.

Saule fragile

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁶	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 95		Elevée	Modérément tolérante	x	c	✓	g	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973; Schiechtl & Stern, 1997; Graf et al., 2003; Evette et al., 2009

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

c : espèce adaptée, sous la forme de pieux morts et en pied de berge uniquement

g : espèce adaptée, relativement fragile à la mise en place

Distribution géographique

Espèce eurasiatique assez commune sauf en altitude. En France, elle est présente sur presque l'ensemble du territoire sauf en région méditerranéenne, où elle est très rare.

Écologie

Espèce pionnière, héliophile, mésohygrophile qui se développe dans les milieux humides, aux bords des eaux, des marres et des fossés mais également dans les prairies humides. Elle se développe dans les étages collinéen et montagnard, jusqu'à 1100 m d'altitude. Son

Port arboré de
Salix × fragilis ©
Ludovic Bonin



¹⁶ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

optimum se situe au sein des saulaies ripicoles (*Salicion albae*).

Les conditions propices à son implantation correspondent à des sols riches en bases ou en azote, au pH neutre à légèrement acide. Les substrats sont généralement des sols alluviaux grossiers, avec des graviers, galets, sables ou limons. Elle s'accommode mal des terrains calcaires mais préfère les stations régulièrement inondées.

Description

Arbre caducifolié à tronc individualisé, parfois multi-tronc, le saule fragile peut dépasser 15 m de hauteur, atteignant jusqu'à 25 m dans certains cas. Il forme généralement une couronne irrégulière souvent inclinée. Son écorce est rugueuse, sombre, de teinte grise-brunâtre, et elle présente des crevasses sur les vieux sujets.

Rameaux

Ses rameaux, d'un vert olive et glabres, sont étalés et dressés. Les rameaux axillaires terminaux se cassent facilement à leur base, une particularité distinctive de l'espèce.

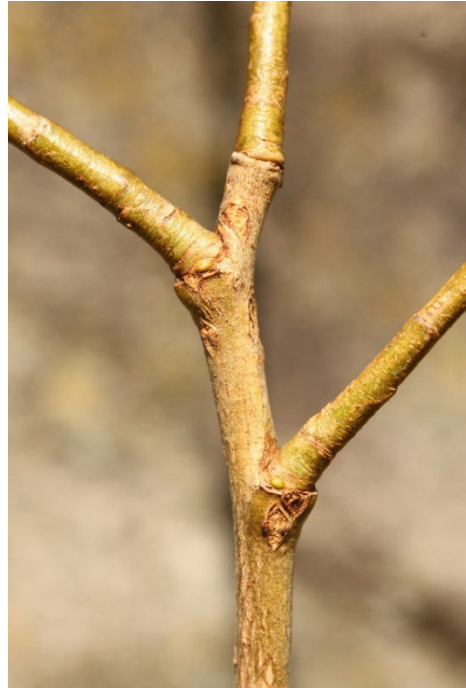
Bourgeons

Les bourgeons sont alternes et arborent une couleur brune foncée à noirâtre, parfois verdâtre ou orangée, avec une fréquente bicoloration. Ils sont de forme fusiforme, atteignant pour les plus grands plus de 8 mm de long.

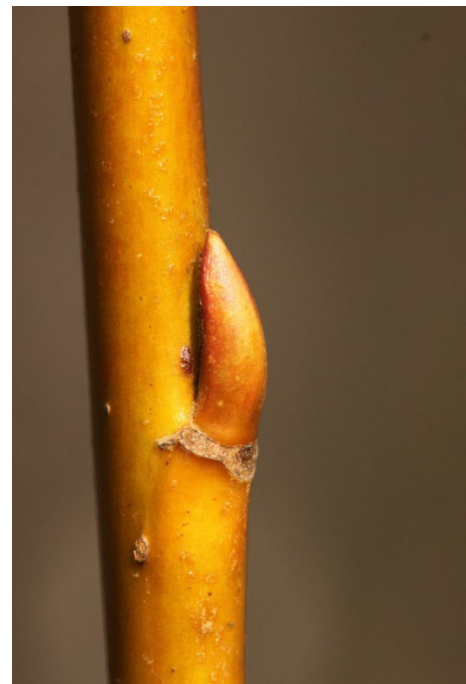
Feuilles

Disposées de manière alternes, les feuilles non visqueuses peuvent être aromatiques dans leur jeunesse. Elles sont courtement pétiolées, lancéolées, avec la plus grande largeur située à la moitié de la longueur du limbe ou légèrement en dessous. Elles mesurent généralement de 6 à 15 cm de longueur. Ces feuilles sont denticulées à dents un peu cartilagineuses, acuminées et glabres sur les deux faces, y compris au dépliage. Leur partie supérieure est mate ou peu luisante, tandis que

*Rameaux
glabres de Salix
× fragilis ©
Ludovic Bonin*



*Bourgeon
fusiforme de
Salix × fragilis
© Ludovic
Bonin*



leur partie inférieure est glauque ou blanchâtre. Un critère distinctif de l'espèce est la pointe déjetée des feuilles.

Fleurs, fruits et graines

La floraison des chatons commence nettement après l'ouverture des bourgeons foliaires. Les fleurs sont regroupées en chatons sur un pédoncule à feuilles velues et soyeuses, avec des bractées jaunâtres.

Les chatons mâles comportent généralement 1 à 2 étamines, parfois 3, avec des anthères jaunes. Quant aux chatons femelles, ils possèdent un style court, 2 nectaires et des capsules glabres ou faiblement pubescentes.

Confusion

Cette espèce peut être confondue à l'état végétatif avec le saule blanc (*Salix alba*), dont le port est similaire mais qui se différencie par une écorce moins fissurée et plus lisse que le saule fragile ainsi que des feuilles plus étroites et d'une couleur argent typique. Il peut également être confondu avec le saule des vanniers (*Salix viminalis*) dont les feuilles ne sont pas déjetées.



Feuilles lancéolées de *Salix × fragilis* © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Le saule fragile, en raison de ses caractéristiques, est adapté à une utilisation en génie végétal, bien que certaines considérations soient à prendre en compte du fait qu'il s'agisse d'un arbre, tout comme pour le saule blanc (*Salix alba*). Son taux de reprise élevé et sa capacité à produire des racines en grande quantité, associés à sa flexibilité, en font un bon choix pour stabiliser les berges. Toutefois, les espèces de saule à développement arborescent, telles que le saule blanc (*Salix alba*) et le saule fragile (*Salix × fragilis*), ne sont généralement pas recommandées dans les fascines et autres ouvrages en pied de berge. Le port arborescent n'est pas souhaitable en pied de berge, car les arbres de gros diamètre peuvent augmenter les phénomènes de turbulences et d'érosion associés. Ces espèces créent des points durs et peuvent favoriser l'érosion au lieu de la prévenir. De plus, les arbres de grande taille ont plus tendance à basculer dans le cours d'eau lors de forts vents. On préférera donc les utiliser en haut de berge ou sous forme de pieux.

Son utilisation dépend de ses préférences écologiques, privilégiant les sols pauvres en calcaire, les sols alluviaux, du gravier jusqu'aux limons, tant qu'ils sont bien aérés.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise au bouturage dépassant les 90 %, cette espèce est bien adaptée à une utilisation sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être intégrée facilement dans divers ouvrages de génie végétal, à condition qu'ils ne soient pas situés en pied de berge. On peut citer les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés, les couches de branches à rejets et le bouturage. Il est également possible de l'utiliser sous forme de pieu, bien qu'il convienne de noter que, comme son nom l'indique, le saule fragile est un bois fragile qui risque de rompre avec pression potentielle exercée pendant la mise en place de pieu.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies ripicoles (*Salicion albae*) ; forêts ripicoles (*Alno-Ulmenalia*) en comportement pionnier. Souvent en association avec *Salix alba*.

Salix hastata L.

Saule hasté

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁷	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 60		Elevée	Modérément tolérante	✓	a	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973, 1980; Bonin et al., 2013; Rousset et al., in prep

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

Distribution géographique

Espèce circumboréale avec une affinité pour les régions arctiques et alpines. En France, elle est présente localement dans les Pyrénées, le Massif central, les Vosges et les Alpes. Elle est relativement fréquente dans les Alpes du Nord.

Écologie

Espèce pionnière d'altitude aux étages subalpin et alpin inférieur (1 500 à 2 500 mètres), le saule hasté se développe en pleine lumière ou en demie-ombre. Elle structure certaines saulaies basses ou elle est à son optimum écologique et se développe également dans les fourrés subalpins frais, notamment les aulnaies vertes (*Betulo carpaticae-Alnetea viridis*). On la trouve



Forme arbustive ascendante de *Salix hastata* © André Evette

¹⁷ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

également au sein de pelouses fraîches, parfois dans les clairières des forêts de conifères, les marais, et même sur les éboulis.

Cette espèce est extrêmement adaptable et peut croître sur divers types de substrats, des alluvions aux moraines, qu'ils soient frais ou humides, plus ou moins riches en bases et en nutriments, au pH basique à légèrement acide, pourvu qu'ils soient bien aérés.

Description

Arbrisseau à plusieurs troncs, caducifolié, de taille peu étendue mais parfois étalée, avec un port ascendant, atteignant généralement 1,5 m de hauteur, et parfois jusqu'à 3 m. Les troncs deviennent progressivement glabres. Il peut également présenter une forme naine.

Rameaux

Les rameaux de l'année sont de couleur brun chocolat à rougeâtre, et ils peuvent être mats et glabres ou présenter une pilosité longue, éparsée ou enchevêtrée. Au fil du temps, ces rameaux deviennent glabres, affichant une teinte allant du verdâtre au brun-glabrescent, avec des nœuds marqués par des cicatrices foliaires saillantes.

Bourgeons

Les bourgeons arborent une couleur similaire à celle des rameaux. Une distinction morphologique notable peut être établie entre les bourgeons foliaires et les bourgeons floraux. Les bourgeons foliaires se caractérisent par leur forme plan-convexe, leur longueur de 3,5 à 7 mm, et un apex aigu ou obtus, en étant appliqués contre le rameau. En revanche, les bourgeons floraux sont plus imposants, mesurant entre 8 et 10 mm de long, et présentent un sommet aigu ou légèrement aplati, avec l'apex qui est éloigné du rameau.

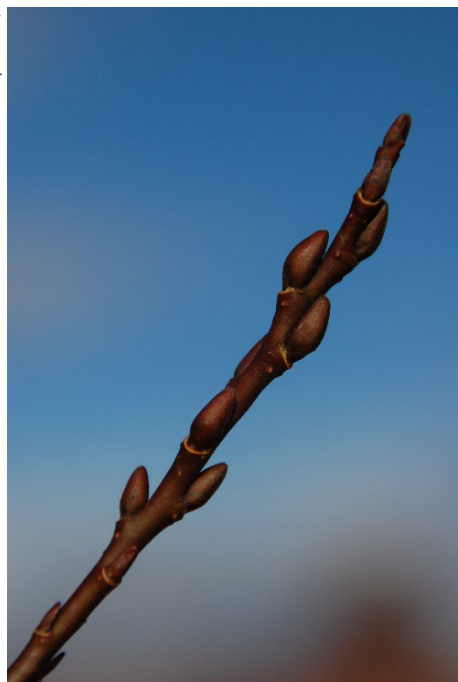
Feuilles

Les feuilles immatures sont clairsemées, présentant une coloration blanchâtre à pubescente sur les faces supérieure et

Rameau de 2 ans de Salix hastata
© Patrice Prunier



Bourgeons ovoïdes de Salix hastata
© Patrice Prunier



inférieure. À maturité, les feuilles peuvent être très variables, de forme elliptique, ovale, voire obovale, mesurant de 2 à 8 cm de long sur 1 à 4 cm de large, avec un apex et une base aigüe, arrondis ou cordés. Les marges peuvent être entières ou régulièrement et finement denticulées. Elles possèdent de courts pétioles. Au fil du temps, les feuilles matures deviennent d'un vert mat sur la face supérieure et présentent un aspect mat ou glauque sur la face inférieure. Elles deviennent assez rigides

et épaisses, avec parfois quelques poils persistants de couleur rouille observables le long de la nervure centrale. Les feuilles sont dotées d'un pétiole mesurant de 3 à 6 mm de long, teinté de rouge, et sont accompagnées de grandes stipules à sommet droit à la base de ce pétiole. Il est à noter que les feuilles ne noircissent pas en séchant.

Fleurs

La floraison est simultanée avec la feuillaison, généralement de juin à août. Les fleurs sont regroupées en chatons allongés, dressés et portés par un pédoncule feuillé, mesurant de 1,5 à 7 cm de long et dépassant les 6 mm de diamètre à la fructification. Les chatons, étant persistants, constituent un critère de reconnaissance facile. Les chatons mâles sont de forme ovoïde-oblongue, longs de 1,5 à 4 cm et contiennent 2 étamines glabres et libres.

Les chatons femelles, cylindriques et allongés, sont plus imposants, variant de 3 à 7 cm de long, à fleurs lâches. Les fleurs sont composées d'une capsule glabre, aplatie et presque sessile, mesurant de 4 à 8 mm de long, et d'un long style se terminant par des stigmates bifurqués, légèrement plus longs que les stigmates à deux ou quatre lobes. Les fleurs femelles sont protégées par des écailles oblongues de

*Chatons femelles
et feuilles de
Salix hastata ©
Patrice Prunier*



couleur brunâtre, légèrement pubescentes voire presque barbues au sommet.

La morphologie du saule hasté peut facilement être confondue avec celle d'individus prostrés de saule appendiculé (*Salix appendiculata*) qui présentent des rameaux de l'année de couleur brun jaunâtre à brun verdâtre. Il peut également être confondu avec le saule fétide (*Salix foetida*), qui se caractérise par des feuilles régulièrement dentées et glanduleuses, ainsi qu'une pilosité courte et peu visible.

Concernant le génie végétal

Le saule hasté présente des caractéristiques d'intérêt pour le génie végétal en altitude, plus adaptées que celles du saule bleuâtre et du saule fétide. Formant naturellement des colonies denses qui ne dépassent pas 3 mètres de hauteur, il est bien adapté à la stabilisation des berges et des torrents en montagne. Lorsqu'il est implanté en pied de berge, ses buissons denses permettent de dissiper l'énergie des courants lors des crues et de piéger les sédiments, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces. Cette espèce peut être installée sur des terrains inclinés soumis à des perturbations régulières, offrant une résistance significative à la traction grâce à la souplesse de ses tiges, qui s'adaptent aux contraintes du terrain.

Le saule hasté présente une grande amplitude écologique, ce qui en fait un atout majeur pour son utilisation. Il peut être implanté sur des substrats grossiers et drainants, ainsi que sur des matériaux plus fins gorgés d'eau, qu'ils soient calcaires ou siliceux. Cette espèce peut être installée sur des pentes raides exposées ou dans des vallées encaissées, en restant généralement entre 1500 m et 2300 m d'altitude.

Son taux élevé de reprise au bouturage (au moins 60 à 70%) et la taille de ses rameaux permettent de l'utiliser sous forme de boutures, de branches, de plançons ou de ramilles. Cependant, même si cette espèce peut être localement abondante aux abords des fourrais subalpins frais, il peut parfois être difficile de trouver un nombre suffisamment important de boutures de bonne longueur et de bon diamètre pour les intégrer dans des ouvrages tels que les fascines ou les couches de branches à rejet. Il est également possible de l'utiliser sous forme de ramilles vivantes anti-affouillement sous les fascines ou dans les lits de plants et plançons. L'idéal est de ne pas l'associer à d'autres espèces à fort potentiel de croissance pour limiter la concurrence interspécifique.

Dans l'ensemble, les caractéristiques et l'écologie du saule hasté en font un modèle d'intérêt particulier à fort potentiel pour le génie végétal à l'étage subalpin et alpin.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Fourrés subalpins frais (*Betulo carpaticae-Alnetea viridis*), saulaies basses subalpines neutro-calcicoles (*Salicion waldsteinianae*) ; en association avec le saule fétide (*Salix foetida*), le saule bleuâtre (*Salix caesia*), le saule alpestre (*Salix myrsinifolia* subsp. *alpicola*), le saule noircissant (*Salix myrsinifolia*) et l'aulne vert (*Alnus viridis*).

Salix myrsinifolia Salisb.

Saule noircissant

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁸	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
70-90	1,8	Elevée	Intolérante	✓	x	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973, 1980; Zuffi, 1989; Venti et al., 2003; Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

Distribution géographique

Espèce euro-sibérienne péréalpine, on la trouve en France dans l'Est, notamment dans les Alpes, le Jura, les Vosges, et de manière plus anecdotique dans les Pyrénées et la plaine du Rhin. Elle demeure particulièrement fréquente dans les Alpes du Nord.



Port arbustif de *Salix myrsinifolia* © Patrice Prunier

¹⁸ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

Écologie

Le saule noirissant est une espèce pionnière montagnarde, héliophile et mésohygrophile, des saulaies d'altitude, ainsi que des fourrés et forêts ripicoles, telles que les aulnaies, les saulaies et les frênaies. L'espèce se subdivise en deux sous-espèces, chacune ayant des préférences écologiques légèrement différentes.

Cette espèce croit sur des substrats alluvionnaires grossiers, allant des sables aux galets. Elle se développe également sur des substrats calcaires, frais et humides, basiques à légèrement acides. Elle présente un optimum sur les sols filtrants montrant des variations d'humidité, parfois inondés.

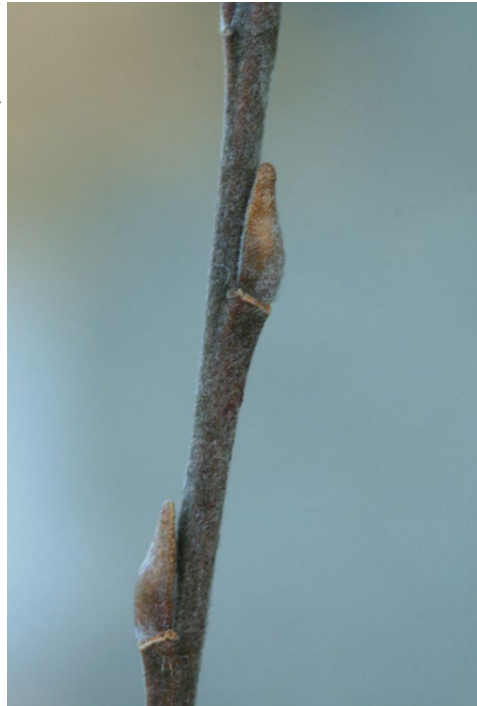
Description

Arbuste caducifolié assez bas, le saule noirissant se développe souvent en un grand buisson ouvert atteignant de 1,5 à 4 m hauteur. D'aspect tentaculaire, il forme des cépées denses au port dressé. Son tronc est de couleur gris foncé, lisse ou légèrement fissuré.

Rameaux

Les rameaux sont allongés, étalés et dressés. Ceux de l'année sont de couleur brun foncé, parfois violacés à rougeâtres à noirâtres, et

Bourgeons
pubescents de
Salix myrsinifolia
© Patrice Prunier



densément pubescents. Ils deviennent glabres, mats, ou conservent leur pilosité dans leur deuxième année. Des stries sont visibles dans le bois des rameaux matures.

Bourgeons

Les bourgeons sont étroits et allongés et ont une forme ovoïde à plan-convexe, de couleur brune à noirâtre. Plaqués contre les rameaux, ils sont généralement obtus et densément velus, avec une pilosité appliquée à hirsute.



Face inférieure glauque pruinée
et face supérieure verte foncée
des feuilles de *Salix myrsinifolia* ©
Patrice Prunier

Leur longueur est d'environ deux fois leur largeur, mesurant de 2.5 à 6.5 mm, la plupart du temps plus de 4 mm.

Feuilles

Les feuilles sont minces, généralement lancéolées à elliptiques, mesurant de 2 à 8 cm de long pour 1,5 à 3 cm de large. Elles sont de couleur vert foncé et glabres sur la face supérieure, tandis que la face inférieure est glauque à pruinuse avec des nervures velues. La pruine glauque disparaît souvent vers l'apex sur la face inférieure, créant une pointe verte « essuyée ». Les bords des feuilles sont ondulés et irrégulièrement dentelés. Les pétioles mesurent moins de 1 cm de long. Les stipules sont variables, souvent bien développées et persistantes, parfois petites et caduques, voire absentes. Elles sont pubescentes avec de petites glandes éparses et sessiles.

Une caractéristique spécifique de cette espèce est que les feuilles deviennent noires à la dessiccation ou en présence d'impacts.

Fleurs, fruits et graines

La floraison se produit simultanément avec la feuillaison, généralement d'avril à juin. Les fleurs, protégées par une écaille légèrement



Rameau brun foncé et chatons de Salix myrsinifolia © Patrice Prunier

poilue, brunâtre sur le sommet, sont regroupées en chatons courts, presque sessiles et feuillés à la base. Les chatons sont cylindriques, mesurant de 1.5 à 5 cm de long pour 1 à 2 cm de large.

Les chatons mâles présentent 2 étamines libres. Les filaments sont totalement glabres ou poilus vers leur base et peuvent mesurer jusqu'à 1 cm de long. Les anthères sont oblongues et de couleur jaune d'or. Les chatons femelles sont plus longs et plus étroits que les chatons mâles. Ils sont constitués d'une capsule glabre ou pubescente surmontée d'un style généralement distinct, long, avec des stigmates bifurqués ou divisés en quatre lobes.

Concernant le génie végétal

Comme de nombreux saules, *Salix myrsinifolia* est une espèce résistante qui présente un intérêt particulier pour la stabilisation des berges des rivières, en particulier dans les régions montagneuses. Sa croissance juvénile rapide, son système racinaire développé (rapport système souterrain/système aérien = 1,8), et sa grande capacité de régénération lui permettent de protéger rapidement les sols. Son port buissonnant ne dépasse généralement pas 4 mètres de hauteur, avec des rameaux à la fois souples et robustes qui offrent une résistance efficace. Lorsqu'il est planté en pied de berge, ces caractéristiques favorisent la dissipation de l'énergie du courant et le piégeage des sédiments fins. Cette espèce peut être utilisée sur des substrats très drainants, du pied de la berge jusqu'au sommet des berges, et ce, jusqu'à une altitude de 2300 mètres.

Le saule noirissant semble bien tolérer les sécheresses et les inondations prolongées grâce à son système racinaire qui s'adapte en fonction de l'hygrométrie du sol et la hauteur de la nappe.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise élevé au bouturage, cette espèce peut être employée sous diverses formes, notamment en boutures, branches, plançons ou ramilles. Par

conséquent, elle peut être aisément intégrée dans une grande variété d'aménagements, tels que des lits de plants et plançons, des caissons en rondins végétalisés, des couches de branches à rejets, des fascines de saule, ou encore du bouturage, etc.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Aulnaies blanches (*Alnion incanae*) et formations arbustives annexes ou marécageuses (*Salicion pentandrae*) de l'étage collinéen à l'étage subalpin ; en association avec l'aulne blanc (*Alnus incana*), le frêne commun (*Fraxinus excelsior*), le saule drapé (*Salix eleagnos*), le saule faux daphné (*Salix daphnoides*) ou le saule pourpre (*Salix purpurea*).

Salix pentandra L.

Saule à cinq étamines

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ¹⁹	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
70-90		Moyenne sauf en juvénile	Très intolérante	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1980; Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

Distribution géographique

Espèce eurasiatique, le saule à cinq étamines est présent en France de manière rare et disséminée sur l'ensemble du territoire, incluant les Ardennes, le Jura, les Alpes, le Massif central, les Cévennes et les Pyrénées. Cependant, elle est plus fréquente dans les Alpes du Nord.

Écologie

Espèce pionnière, héliophile, mésohygrophile à hygrophile, elle présente une large amplitude écologique. Elle peut coloniser divers milieux



Port en cépée dense arborée de *Salix pentandra* © Patrice Prunier

¹⁹ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

tels que les prairies humides, les saulaies buissonnantes, ainsi que les fourrés et les boisements ripicoles ou marécageux, notamment les aulnaies blanches et les saulaies marécageuses de montagne. Cette espèce est répartie sur un large gradient altitudinal, allant de 100 à 2000 mètres, couvrant les étages collinéen à subalpin.

Le saule à cinq étamines se développe sur différents types de substrats, qu'ils soient tourbeux, argileux, ou alluvionnaires avec une granulométrie variable allant des sables aux graviers. Il prospère sur des sols souvent saturés en eau, avec un pH variant de neutre à acide et une teneur en bases et éléments nutritifs variable. Espèce bimodale, elle présente un optimum de développement au sein d'aulnaies-saulaies alluviales sur des matériaux grossiers (*Alno-Salicetum pentandrae*) ou de saulaies marécageuses de montagne sur tourbe (*Salicetum pentandrocinereae*), ou elle est régulièrement structurante.

Description

Arbrisseau ou petit arbre caducifolié atteignant généralement de 3 à 12 mètres de hauteur, avec des cépées pouvant s'étendre sur plus de 15 mètres. L'écorce est de teinte grisâtre et légèrement fissurée. Les branches s'étaient davantage chez les spécimens matures, formant ainsi une couronne large et arrondie.

Rameaux

Les jeunes rameaux de l'année sont brillants comme s'ils étaient vernis, visqueux odorants et glabres. L'écorce est initialement beige à brune, devenant grise au fil du temps.

Bourgeons

Les bourgeons sont de petite taille, ovoïdes à elliptiques, pointus, avec l'apex généralement écarté du rameau. Ils sont d'une couleur orangé à brun brunâtre, luisants et plutôt visqueux.

Feuilles

*Bourgeons
luisants de
Salix
pentandra ©
Patrice
Prunier*



*Chatons de
Salix
pentandra ©
Patrice
Prunier*



À l'état jeune, les feuilles sont visqueuses et odorantes. Elles peuvent présenter une forme lancéolée, ovale-elliptique, voire obovale, mesurant de 5 à 12 cm de long sur 2 à 5 cm de large. Elles sont généralement de 2 à 4 fois plus longues que larges. La base de la feuille est arrondie ou largement cunéiforme, tandis que les bords sont finement et régulièrement dentelés-glanduleux, avec un limbe plutôt

coriace. La face supérieure de la feuille est d'un vert foncé brillant, tandis que la face inférieure est nettement plus claire et mate. Les stipules sont petites, ovales et rapidement caduques.

Fleurs, fruits et graines

La floraison a lieu en même temps que la feuillaison, généralement de mai à juillet. Les fleurs sont rassemblées en chatons allongés, portés par de longs pédoncules feuillés et protégées par une écaille verte jaunâtre velue. À maturité, elles sont denses et voyantes.

Les chatons mâles sont brièvement cylindriques, mesurant environ 2 à 5 cm de long pour 1 à 5 cm de large, et pourvus de 5 étamines libres (critère spécifique). Les chatons femelles sont souvent un peu plus

courts que les mâles. Ils sont munis d'un style court et d'une capsule glabre et luisante, protégée par un court pédicelle. Ils demeurent persistants sur les rameaux tout au long de l'hiver.

Confusion

Le saule laurier peut être confondu avec le saule à trois étamines (*Salix triandra*), caractérisé par des rameaux de l'année cannelés à leur extrémité et des fleurs mâles composées de 3 étamines. Une autre source de confusion est le saule faux daphné (*Salix daphnoides*), qui présente des feuilles non visqueuses et odorantes lorsqu'elles sont jeunes, ainsi que des bourgeons foliaires avec un apex nettement appliqué sur les rameaux.



Face supérieure brillante et face inférieure claire et mate de Salix pentandra © Patrice Prunier

Concernant le génie végétal

Le saule à cinq étamines est l'une des espèces les plus adaptées à la stabilisation des berges de cours d'eau et des talus. D'une part, ses rameaux souples et robustes lui confèrent une excellente résistance aux contraintes mécaniques. D'autre part, son fort pouvoir de régénération, sa croissance rapide lorsqu'il est jeune et son système racinaire profond garantissent une protection rapide du sol. En raison de sa capacité élevée d'évapotranspiration, il est également approprié pour drainer les berges et les talus affectés par des infiltrations d'eau. Ce qui le distingue des autres espèces de saules, c'est son feuillage luisant et sa floraison tardive, qui apportent une valeur ornementale supplémentaire aux aménagements.

Sa large amplitude écologique permet de l'implanter sur tous les types de substrats, sous réserve qu'ils soient régulièrement alimentés en eau. Il s'adapte à diverses conditions d'ensoleillement. Cette espèce peut être utilisée en pied comme en sommet de berge, jusqu'à 2000 m d'altitude. Cependant, en raison de son port potentiellement arboré, il est nécessaire d'être prudent quant à son utilisation en pied de berge, car il existe un risque de créer un point dur générateur d'érosion et du basculement dans le lit du cours d'eau qui générerait une déstabilisation complète de la berge.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise élevé au bouturage (constaté entre 70 et 90 % en fonction des conditions), cette espèce est particulièrement adaptée pour produire des boutures, des plançons, des branches ou des pieux (qu'ils soient vivants ou morts). Étant parfois abondante le long des cours d'eau, il est ainsi possible de se procurer le matériel végétal à proximité des chantiers, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales. Cette espèce peut facilement être intégrée dans une variété d'ouvrages de génie végétal, tels que les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés, les tressages et fascines de saules, ainsi que les couches de branches à rejets et les bouturages.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Forêts et fourrés marécageux (*Alnetea glutinosae*, *Salicetalia auritae*), notamment saulaies marécageuses montagnardes (*Salicetum pentandro-cinereae*) ; aulnaies-saulaies alluviales subalpines (*Alno-Salicetum pentandrae*) ; forêts ripicoles (*Alno-Ulmenalia*) ; mégaphorbiaies (*Adenostyletalia alliariae*) ; en association avec les saules appendiculé (*Salix appendiculata*), drapé (*S. elaeagnos*), faux daphné (*S. daphnoides*), noircissant (*S. myrsinifolia*) ou encore avec l'aulne blanc (*Alnus incana*), le cytise des Alpes (*Laburnum alpinum*) et le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*).

Salix purpurea L.

Saule pourpre

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ²⁰	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
> 90	1.5	Faible sauf en juvénile	Tolérante	✓	x	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973; Zuffi, 1989; Venti et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

Distribution géographique

Espèce eurasiatique présente également sur le continent américain et en Afrique du Nord. Cette espèce est commune en France sur l'ensemble du territoire, à l'exception de l'extrême ouest où elle est presque absente.

Écologie

Espèce pionnière, héliophile, mésophile à mésohygrophile, le saule pourpre est particulièrement ubiquiste ; ce qui en fait l'espèce la plus répandue parmi les saules en



Port arbustif dense de *Salix purpurea* © Patrice Prunier

²⁰ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

groupements arbustifs de faible hauteur. Il s'observe principalement dans les milieux

riverains, notamment au sein des saulaies arbustives (*Salicetalia purpureae*), où il domine parfois, et des fruticées fraîches (*Prunetalia spinosae*). Au niveau altitudinal, il est présent de l'étage collinéen jusqu'au subalpin, atteignant parfois 2300 mètres d'altitude, avec un optimum aux étages supraméditerranéen et montagnard.

Les conditions propices à son implantation peuvent varier considérablement en termes d'ensoleillement, de type de sol et d'humidité. Elle a ainsi tendance à coloniser des zones bien exposées au soleil, au sol argileux, caillouteux et/ou sableux, souvent riches en bases et en azote, généralement avec un pH neutre. Elle tolère et se développe sur des sols inondés, et est parfois mésoxérophile sur des alluvions peu rétentrices d'eau.

Description

Arbrisseau caducifolié formant des cépées denses d'une hauteur de 1 à 6 m, le port du saule pourpre peut varier, avec une tendance à former le plus souvent une touffe dense de tiges ascendantes réunies en boule caractéristique ou parfois être bas et étalé.

Rameaux

Les rameaux sont plus ou moins opposés, cylindriques, élancés, coriaces et flexibles. Les jeunes rameaux sont longs et minces, glabres et brillants, de couleur pourpre ou beige (parfois verts ou gris). Les plus anciens sont beiges à grisâtres.

Bourgeons

Les bourgeons se caractérisent par leur forme oblongue-ovoïde, plutôt allongée. Ils sont au moins deux fois plus longs que larges, pouvant atteindre jusqu'à 10 mm de longueur. Ils sont glabres et luisants, présentant souvent une

Rameaux minces de *Salix purpurea*
© Patrice Prunier



Bourgeons subopposés de *Salix purpurea* © Patrice Prunier



Chatons femelles de *Salix purpurea* © Patrice Prunier



teinte rougeâtre à noirâtre, mais peuvent parfois être pruveux ; au moins une partie des bourgeons est opposée ou subopposée.

Feuilles

Les feuilles du saule pourpre sont opposées ou subopposées ; caractère exclusif. Elles sont sessiles, obovales à lancéolées, glabres et oblongues, avec un rapport de 3 à 10. Leur longueur et leur largeur sont variables, mesurant de 3 à 10 cm de long et de 0,5 à 3 cm de large. Leur partie supérieure présente une forme élargie à marge denticulée, tandis qu'elles ont une base cunéiforme et entière. Les jeunes feuilles sont glabres, parfois initialement revêtues d'une fine pilosité caduque. Leur couleur est principalement vert foncé, parfois luisant sur le dessus, mais plutôt pâle et glauque en dessous. Les pétioles sont courts, mesurant entre 2 et 5 mm, et les stipules sont absentes.

Fleurs, fruits et graines

La floraison se déroule de mars à mai, précédant la feuillaison. Les fleurs sont regroupées en chatons latéraux cylindriques, sessiles, courbés à dressés et opposés. Les chatons sont denses, à couleur pourpre en début de floraison. Ils mesurent de 12 à 40 mm et présentent des bractées persistantes, velues, de couleur noire et rouge.

Les chatons femelles sont constitués d'ovaires pubescents, de capsules ovoïdes, sessiles ou subsessiles au style très court, mesurant de 2 à 3 mm. Les chatons mâles sont composés de fleurs avec 2 étamines entièrement soudées, ayant des anthères rouges au début de la floraison, qui deviennent ensuite jaunâtres.

Confusion

Le saule pourpre peut parfois être confondu avec le saule bleuâtre (*Salix caesia*), qui se différencie par des bourgeons moins allongés et plus globuleux, ainsi que des feuilles à marges entières souvent enroulées.

Face supérieure verte luisante et face inférieure pâle des feuilles subopposées de Salix purpurea © Patrice Prunier



Concernant le génie végétal

Le saule pourpre (*Salix purpurea*) est une espèce particulièrement adaptée au génie végétal et largement utilisée. Son fort pouvoir de régénération, associé à sa croissance juvénile rapide et son système racinaire extrêmement développé (rapport volume système racinaire/aérien = 1,5, en faveur des racines), en fait une espèce vigoureuse recherchée pour la protection rapide du sol. Grâce à son port buissonnant et à ses rameaux souples mais robustes, elle offre une excellente résistance le long des berges sans le risque de déstabilisation lié à la chute des espèces arborées. En pied de berge, elle contribue à la dissipation de l'énergie du courant, à la capture des sédiments fins, à l'effet tapis et à l'augmentation de la rugosité pour réduire le risque d'érosion. De plus, elle peut prospérer aussi bien sur le sommet des berges. Sa capacité à développer des racines adventives lui confère une résistance supplémentaire à l'ensevelissement.

Sa grande amplitude écologique permet son implantation sur divers types de substrats, y compris des matériaux grossiers et très drainants, dans différentes conditions d'ensoleillement, et même jusqu'à 2 300 m d'altitude. Elle présente une tolérance moyenne à convenable face aux inondations, mais elle est également capable de résister à des conditions de sécheresse.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise au bouturage dépassant les 90 % dans toutes les conditions et périodes de plantation, cette espèce est bien adaptée pour être utilisée sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être intégrée facilement dans divers ouvrages de génie végétal, tels que lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, tressages et fascines de saules, couches de branches à rejets, et bouturage. Si elle est présente sur le secteur, on gagnera à l'intégrer pour partie des saules utilisés sur un ouvrage en raison de garanties qu'elle apporte en terme de reprise.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies arbustives (*Salicetalia purpureae*) ; fruticées fraîches (*Prunetalia spinosae*) ; en association avec le saule noircissant (*Salix myrsinifolia*), le saule faux daphné (*Salix daphnoides*), la myricaire (*Myricaria germanica*), le saule drapé (*Salix elaeagnos*), le saule à trois étamines (*Salix triandra*), voire l'argousier (*Hippophae rhamnoides*).

Salix triandra L.

Saule à trois étamines

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ²¹	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
70-90	0,4	Elevée	Intolérante	h	x	✓	a	✓	✓	✓	✓	Schiechtl, 1973, 1980; Sauli et al., 2006; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009; Bonin et al., 2013

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

h : espèce aux rameaux fragiles et tortueux peu favorables au tressage qui nécessite l'association avec d'autres espèces

Distribution géographique

Espèce eurasiatique présente et disséminée sur le territoire français, elle est plus rare en région méditerranéenne. Elle est commune dans les Alpes du Nord, notamment aux abords des vallées préalpines.

Écologie

Espèce pionnière héliophile et mésohygrophile, le saule à trois étamines forme des saulaies arbustives le long des cours



Port arbustif de *Salix triandra* © Patrice Prunier

²¹ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

d'eau. Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur, jusqu'à 1700 m d'altitude. On le retrouve dans les fossés et les lieux humides. Régulièrement associé au saule blanc (*Salix alba*) à basse altitude, il s'efface petit à petit au profit de ce dernier dans les formations forestières. Son optimum écologique correspond aux saulaies alluviales sur matériaux fins (*Salicetum triandrae*).

Cette espèce croît sur des matériaux alluvionnaires plutôt fins, principalement des limons et des sables, généralement calcaires, neutres à basiques, plus ou moins riches en nutriments. Suivant les fluctuations de la nappe et les inondations, ces matériaux demeurent frais à humides.

Description

Arbuste caducifolié, robuste, étalé ou buissonnant, formant des cépées denses. Il peut atteindre les 10 m de haut, mais ne dépasse que rarement les 5 m. L'écorce est plutôt lisse, de couleur grisâtre foncé, s'écaillant en larges sous-tâches pour exposer une teinte brun rougeâtre à cannelle.

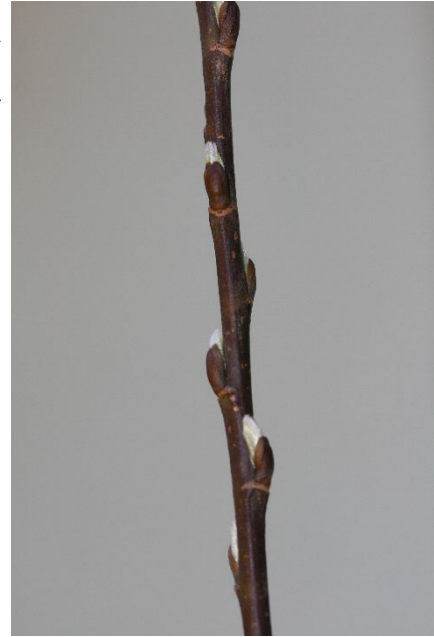
Rameaux

Au cours de la première année, les rameaux sont généralement brun chocolat à brun rougeâtre, plutôt brillants, glabres, cannelés au sommet et souvent pourvus de plaques décolorées blanchâtres. L'écorce âgée est généralement grise-verdâtre et s'exfolie nettement par plaques, laissant alors visible le tronc brun-rougeâtre à cannelle. Les rameaux sont plutôt fragiles à la base.

Bourgeons

Les bourgeons, appliqués sur les rameaux, sont comprimés dorsalement et plan-convexes. Ils sont généralement effilés vers un apex plutôt élancé. D'abord finement pubescents, ils deviennent glabres avec le temps. Ils sont 2 à 4 fois plus longs que larges, mesurant de 3 à 6 mm de long.

Bourgeons appliqués de Salix triandra © Patrice Prunier



Rameau brun rougeâtre de Salix triandra © Patrice Prunier



Chatons de Salix triandra © Patrice Prunier





Face supérieure verte luisante et face inférieure plus pâle des feuilles de *Salix triandra* © Patrice Prunier

Feuilles

Les feuilles sont de forme lancéolée, mesurant de 4 à 11 cm de long et 1 à 3 cm de large, soit 3 à 5 fois plus longues que larges. Elles sont denticulées-glanduleuses, glabres et de couleur vert foncé et luisantes sur la face supérieure, plus claires voire un peu glauques au revers avec des nervures peu visibles. Le pétiole mesure généralement moins de 2 cm de long et les stipules, longtemps persistantes, sont arrondies.

Fleurs, fruits et graines

La floraison survient avec ou légèrement avant la feuillaison, de mars à juin. Les fleurs sont protégées par une écaille jaunâtre, non barbue, et sont regroupées en chatons grêles, allongés et dressés à étalés, portés par un pédoncule feuillé. Les fleurs sont voyantes et parfumées.

Les chatons mâles, étroitement cylindriques, sont composés de fleurs, denses ou plus lâches, pourvues de 3 étamines libres. Les chatons femelles sont plus courts et plus denses que les mâles, avec des écailles similaires. Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule glabre surmontée d'un style court.

Confusion

Il est possible de confondre le saule à trois étamines avec le saule faux daphné (*Salix daphnoides*), dont les rameaux de l'année ne sont pas cannelés à leur extrémité et dont les fleurs mâles sont composées de seulement 2 étamines. Il peut également être confondu avec le saule laurier (*Salix pentandra*), dont les feuilles sont visqueuses et odorantes à l'état jeune, et dont les bourgeons foliaires ont un apex non appliqué sur les rameaux.

Concernant le génie végétal

Le saule à trois étamines est couramment utilisé en génie végétal, principalement pour la stabilisation des berges des cours d'eau de basse altitude. Cependant, il démontre également un potentiel pour une utilisation dans les rivières de montagne. Ses capacités de régénération, sa vigueur et sa croissance juvénile rapide en font un choix idéal pour la couverture et la protection rapides du sol. Sa tolérance à la submersion et son port buissonnant, dépassant rarement les 5 m de hauteur, le rendent particulièrement adapté à une utilisation en pied de berge. La fragilité de ses rameaux n'est pas un obstacle, mais plutôt un avantage, favorisant le recépage permanent sans compromettre la vigueur



Écorce desquamante de *Salix triandra* © André Evette

des plants et formant ainsi des buissons denses qui dissipent l'énergie du courant et capturent les sédiments fins. De manière générale, c'est une espèce bien adaptée aux tailles d'entretien (recépage, création de saules têtards) et à l'abroustissement, notamment par le castor.

Il convient de noter que son utilisation est limitée par certaines contraintes écologiques. Il est déconseillé de l'implanter sur des substrats grossiers et drainants, dans des conditions d'ombrage excessif (végétation arborée dense, pentes boisées ou vallées encaissées), et à des altitudes supérieures à 1500 m. En revanche, il tolère bien l'acidité du sol et peut prospérer sur des substrats siliceux tant qu'ils sont suffisamment riches en matériaux fins.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise élevé au bouturage (supérieur à 70 % suivant les conditions), cette espèce peut être utilisée sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être intégrée facilement dans divers ouvrages de génie végétal, tels que lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, fascines de saules, couches de branches à rejets et bouturage. Cependant, ses branches cassantes limitent son utilisation pour certaines techniques, notamment le tressage. Il est recommandé de l'associer à d'autres saules buissonnants ou arbustifs dotés d'un système racinaire plus profond, comme les saules pourpre (*Salix purpurea*) ou noircissant (*Salix myrsinifolia*).

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Saulaies arbustives alluviales sur matériaux fins (*Salicion triandrae*) ; en association avec le saule pourpre (*Salix purpurea*), le saule blanc (*Salix alba*) ou le saule noircissant (*Salix myrsinifolia*).

Salix viminalis L.

Saule des vanniers

Salicacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport volumes racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ²²	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
90-100	2,2	Très élevée	Très intolérante	✓	a	✓	a	✓	✓	✓	✓	Zuffi, 1989; Schiechtl & Stern, 1997; Venti et al., 2003; C. Graf et al., 2003; Niinemets & Valladares, 2006; Evette et al., 2009

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

a : espèce adaptée, sous réserve de trouver un matériel végétal de taille suffisante (longueur, diamètre et régularité) et en quantité suffisante

Distribution géographique

Espèce eurasiatique commune, particulièrement en Europe centrale, le saule des vanniers est présent en France sur l'ensemble du territoire, bien qu'il soit assez rare dans le quart sud de la France.

Écologie

Espèce pionnière, héliophile et mésohygrophile, on la retrouve sur les bords des cours d'eau, au sein des milieux riverains et



Feuilles luisantes sur le dessous de *Salix viminalis* © Virginie Favre

²² La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées. Inféodés aux milieux humides, les saules présentent naturellement une tolérance relativement basse à la sécheresse.

sur les alluvions. Son optimum écologique se situe dans les saulaies arbustives alluviales (*Salicion triandrae*) avec une répartition altitudinale limitée à l'étage collinéen, jusqu'à 500 m seulement.

Les conditions propices à son implantation nécessitent des inondations régulières. Elle colonise ainsi les substrats alluvionnaires récemment déposés, allant des galets peu rétenteurs d'eau aux sables, et jusqu'aux limons très rétenteurs d'eau. Elle prospère sur des sols riches en bases et en azote, préférant un pH neutre.

Description

Arbuste généralement à plusieurs troncs, pouvant atteindre 3 à 10 mètres de hauteur, caducifolié à l'écorce brune-grisâtre et crevassée. Les branches sont dressées formant généralement une couronne plutôt étroite ou arrondie.

Rameaux

Les rameaux sont souvent allongés, longs et droits, assez effilés, très durs, mais restent flexibles. Les jeunes rameaux sont d'abord densément cendrés et pubescents avant de devenir lisses et plutôt brillants jaunâtres, brun ou olive avec le temps.

Bourgeons

Les bourgeons sont ovoïdes à aigus, allant de 3 à 7 mm de long et 2 à 5 mm de large. Ils sont d'abord densément ou brièvement pubescents avant de devenir glabres, de couleur jaunâtre ou brun rougeâtre.

Feuilles

Les feuilles sont alternes, de forme linéaire ou étroitement lancéolée. Elles mesurent de 10 à 15 cm de longueur et 0,5 à 1,5 cm de large, se terminant en pointe. Elles sont ondulées, veinées, de couleur vert foncé, glabres et mates sur le dessus, tandis qu'elles sont luisantes, argentées et soyeuses sur le dessous. Une pilosité dense, courte et apprimée est visible sur le dessous. Les marges sont entières,

Rameau brun
de *Salix*
viminalis ©
Virginie Favre



Bourgeons
pubescents de
Salix viminalis
© Virginie
Favre



étroitement recourbées ou révolutes, souvent visiblement ondulées. Le pétiole est assez court, dépassant rarement 1 cm, et les stipules sont linéaires, caduques, et bien souvent absentes sur les pousses.

Fleurs, fruits et graines

La floraison a lieu avant la feuillaison, de mars à mai. Les chatons, disposés de manière alterne, sont sessiles ou subsessiles et généralement regroupés vers l'extrémité des rameaux. Ils sont dressés ou légèrement

recourbés, étroitement ovoïdes ou cylindriques, mesurant de 1,5 cm à 3 cm de long.

Les fleurs mâles sont caractérisées par la présence de 2 étamines libres, avec des anthères jaunes. Les fleurs femelles présentent des styles longs, des capsules tomenteuses et soyeuses, subsessiles à sessiles, mesurant de 3 à 6 mm de long.



Chatons mâles de *Salix viminalis* © Patrice Prunier

Confusion

L'état végétatif rend parfois difficile la distinction entre certaines espèces. *Salix viminalis* peut parfois être confondu avec *Salix eleagnos*, qui se distingue par des feuilles aux bords fortement enroulés et qui présentent une face inférieure blanche et tomenteuse, ainsi qu'avec le saule blanc (*Salix alba*), qui possède des feuilles et des rameaux recouverts de poils appliqués.

Concernant le génie végétal

Le saule des vanniers (*Salix viminalis*) est une espèce couramment utilisée pour le génie végétal. Son pouvoir de régénération avec un bon taux de reprise associé à une vitesse de croissance particulièrement élevée et son système racinaire développé en fait une espèce utile pour la protection rapide du sol. Avec des cépées ne dépassant pas 10 mètres de hauteur et des rameaux nombreux et souples, elle offre une excellente résistance le long des berges sans le risque de déstabilisation lié aux espèces arborées. En pied de berge, elle contribue à la dissipation de l'énergie du courant, à la capture des sédiments fins, l'augmentation de la rugosité et à la protection du sol par effet tapis pour réduire le risque d'érosion. De plus, elle peut prospérer aussi bien sur le sommet des berges.

Son utilisation est toutefois contrainte par ses préférences écologiques. En effet, sur des substrats alluvionnaires filtrants : galets, sables, elle nécessite une alimentation en eau régulière car elle présente une faible tolérance à la sécheresse.

Ses rameaux allongés, longs et assez droits, résistants tout en restant flexibles et son taux de reprise particulièrement élevé rendent cette espèce particulièrement bien adaptée pour être utilisée sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être intégrée facilement dans divers ouvrages de génie végétal, tels que lits de plants et plançons, pour le tressage et la confection de fascines de saules, couches de branches à rejets, et bouturage.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Salicetum triandrae (*Salicetum triandro-viminalis*) qui peut s'enrichir en saule des vanniers à basse altitude ; saulaies alluviales (*Salicion albae*)

Tamarix gallica L.

Tamaris de France

Tamaricacées

Propriétés et utilisation en génie végétal, adapté de Bonin et al. 2013

Taux de reprise au bouturage (%)	Rapport biomasses racines/tiges	Vitesse de croissance	Résistance à la sécheresse ²³	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation		Références
				Fascines & tressage		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons & caissons végétalisés		Boutures	Plants	
				Branches	Pieux	Branches	Pieux	Branches	Plants			
80-100	3	Elevée particulièrement en juvénile	Très bonne	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	Arizpe et al., 2008; Lavaine, 2013; Lavaine et al., 2015

X : espèce non adaptée

✓ : espèce adaptée en toutes conditions

Distribution géographique

Espèce européenne ouest-méditerranéenne, elle est présente de manière localisée sur le territoire français : le littoral ouest, le littoral méditerranéen, et en Corse où elle est spontanée. On la trouve également sur les rives du Rhône jusqu'à Orange, dans les parties méridionales de la Drôme et de l'Ardèche, ainsi que dans les Causses où elle est non spontanée, ainsi qu'aux environs de Carcassonne.



Port dressé de *Tamarix gallica* © Patrice Prunier

Écologie

Espèce héliophile présente dans les formations alluviales, mais également dans des mares littorales plus ou moins salées, le tamaris de France a une aire de répartition, marquée par

une préférence pour le littoral, mais atteint localement jusqu'à 400 mètres d'altitude.

Elle croit sur des sols saturés en cations, au pH basique à neutre, limoneux à sableux fins souvent riches en argiles et plus ou moins salés.

²³ La résistance à la sécheresse indiquée représente une tolérance relative comparée aux différentes espèces de saules étudiées.

Elle affectionne les sols ayant une bonne réserve en eau, avec possibilité d'assèchement, ainsi que les stations présentant un bilan hydrique favorable. Son caractère est mésohygrophile, ce qui lui permet de supporter des phases de sécheresse.

Description

Arbuste caducifolié pouvant atteindre 2 à 10 mètres, d'aspect plumeux, son écorce est brune à pourpre foncée. Il présente un port dressé avec de nombreux rameaux.

Rameaux

Les rameaux sont grêles, effilés et flexibles. Ils ont une écorce lisse de couleur rouge ou gris-vert, les jeunes rameaux pouvant présenter une teinte plus verte.

Boutons

Les boutons floraux sont globuleux, avec une couleur variant du rose pâle au rouge vif selon le stade de développement. Ils sont recouverts de petites écailles, leur donnant une apparence légèrement veloutée.

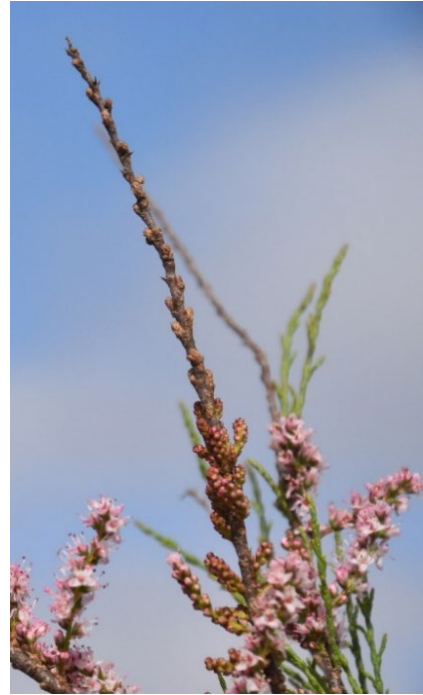
Feuilles

Les feuilles, légèrement scarieuses sur les bords, sont entières et imbriquées. Elles sont glauques, très glabres, amplexicaules, aiguës, et non transparentes au bord et au sommet. De couleur verte, elles ont une forme ovale-lancéolée, légèrement rétrécie à la base. Les feuilles des rameaux de croissance sont ponctuées de 6 à 12 gros pores dorsaux, excréteurs de sel.

Fleurs, fruits et graines

Les fleurs sont petites et globuleuses dans le bouton, regroupées en épis sur les rameaux de l'année, formant des grappes grêles et cylindriques, légèrement lâches. Les pétales, ovales-lancéolés, mesurent de 1,5 à 2 mm de long et sont légèrement rosés, avec des étamines saillantes. Les capsules sont ovoïdes,

Boutons globuleux de Tamarix gallica © Patrice Prunier



Fleurs en grappes de Tamarix gallica © Patrice Prunier

pyramidales, atténuées progressivement de la base au sommet. Les bractées, ovales acuminées, ont une largeur inférieure à 2 mm et ne dépassent pas le milieu du calice.

Confusion

Le tamaris de France (*Tamarix gallica*) peut être facilement confondu avec *Tamarix africana*, qui se distingue par ses fleurs plus petites apparaissant simultanément avec les feuilles, en épis lâches, et ses feuilles glauques dépourvues de bordure transparente. Il peut également être confondu avec d'autres espèces de tamaris plantées.

Concernant le génie végétal

Plusieurs études ont souligné l'intérêt du tamaris de France (*Tamarix gallica*) dans les projets de génie végétal, tant dans des conditions sèches que plus humides. Cette espèce présente des caractéristiques similaires à celles des saules, ce qui la rend idéale pour la stabilisation des berges des cours d'eau. Naturellement présente sur les cours d'eau méditerranéens, elle est susceptible de former des colonies denses à proximité immédiate du lit mineur. Son taux de reprise élevé, combiné à une croissance racinaire significative, permet d'obtenir rapidement un ancrage solide. Les racines fines contribuent efficacement à la stabilisation des sols superficiels, tandis que ses rameaux souples et denses la rendent résistante aux contraintes érosives en bordure des cours d'eau.

La remarquable capacité de résistance à la sécheresse du tamaris de France en fait un choix adapté pour les cours d'eau sujets à des périodes fréquentes de sécheresse, comme c'est le cas des cours d'eau méditerranéens. Cette espèce peut prospérer aussi bien au pied qu'au sommet des berges, résistant aussi bien aux inondations qu'aux sécheresses. Ses rameaux denses et nombreux lui permettent de dissiper l'énergie du courant tout en capturant les sédiments fins. Son aire d'utilisation est cependant limitée à son aire de distribution, situé en dessous de 400 m d'altitude.

En raison de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise au bouturage dépassant les 80 %, le tamaris de France se prête parfaitement à une utilisation sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Il peut ainsi être intégré aisément dans divers ouvrages de génie végétal, tels que les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés, les tressages et fascines de saules, les couches de branches à rejets, ainsi que le bouturage.

Formations végétales, phytosociologie et espèces compagnes

Milieux littoraux ; fourrés alluviaux méditerranéens en bordures de rivières à régime contrasté (*Nerio-Tamaricetea*) et ou fourrés alluviaux tempérés le long des grands cours d'eau (*Salicetea purpureae*).

Annexe 2

Valeurs d'Ellenberg

	Lumière	Température	Continentalité	Humidité atmosphérique	Humidité édaphique	pH	Niveau trophique	Salinité	Texture	Matière organique
<i>Myricaria germanica</i>	8	3	7	8	8	8	3	0	5	1
<i>Populus nigra</i>	8	7	4	8	7	7	7	0	2	8
<i>Salix alba</i>	8	5	5	8	8	7	7	0	6	8
<i>Salix appendiculata</i>	7	3	6	6	5	7	6	0	2	4
<i>Salix atrocinerea</i>	7	6	3	5	6	5	5	0	2	4
<i>Salix aurita</i>	7	5	3	9	8	3	3	0	1	9
<i>Salix caesia</i>	7	3	7	8	7	4	3	0	1	8
<i>Salix cinerea</i>	5	5	5	8	9	5	4	0	1	9
<i>Salix daphnoides</i>	7	3	7	8	8	8	4	0	5	1
<i>Salix eleagnos</i>	8	3	4	8	8	8	4	0	6	1
<i>Salix foetida</i>	8	3	5	8	7	4	3	0	1	8
<i>Salix fragilis</i>	8	5	5	8	8	7	7	0	6	8
<i>Salix hastata</i>	7	3	5	8	6	7	4	0	3	4
<i>Salix myrsinifolia</i>	7	3	6	8	7	7	5	0	3	4
<i>Salix pentandra</i>	7	5	6	9	8	5	4	0	1	9
<i>Salix purpurea</i>	8	5	4	8	8	7	5	0	4	1
<i>Salix triandra</i>	7	5	5	8	8	7	6	0	2	8
<i>Salix viminalis</i>	8	5	5	8	8	7	6	0	2	8
<i>Tamarix gallica</i>	8	7	2	6	7	7	5	1	5	2