

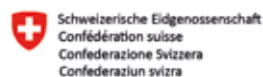
Génie Végétal en rivière de montagne

Connaissances et retours d'expériences
sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales :
végétalisation de berges et ouvrages bois



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



Présentation des auteurs

Auteurs

Bonin Ludovic

Assistant de recherche, groupe Écologie végétale appliquée à l'aménagement et la conservation (EVA) de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (hepia)¹.

Evette André

Ingénieur-chercheur, Unité Écosystèmes montagnards (EMGR) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture de Grenoble (Irstea)².

Frossard Pierre-André

Professeur HES, responsable du groupe Écologie végétale appliquée à l'aménagement et la conservation (EVA) de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (hepia)¹.

Prunier Patrice

Professeur HES, groupe Écologie végétale appliquée à l'aménagement et la conservation (EVA), responsable de la filière Gestion de la Nature (GN) de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (hepia)¹.

Roman Damien

Ingénieur, chef de projets complexes à l'Office national des forêts (ONF)³.

Valé Nicolas

Chargé de mission à l'Association Rivière Rhône Alpes (ARRA)⁴.

Co-auteurs

Barré Jean-Baptiste

Ingénieur, chargé de mission, Unité Écosystèmes montagnards (EMGR) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture de Grenoble (Irstea)².

Cavaillé Paul

Doctorant, Unité Écosystèmes montagnards (EMGR) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture de Grenoble (Irstea)².

Espinasse Fabien

Ingénieur stagiaire, Unité Écosystèmes montagnards (EMGR) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture de Grenoble (Irstea)².

Liébault Frédéric

Chercheur, Unité Érosion torrentielle, neige et avalanches (ETGR) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture de Grenoble (Irstea)².

Mériaux Patrice

Ingénieur-chercheur, Unité Ouvrages hydrauliques et hydrologie (OHAX) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture d'Aix-en-Provence (Irstea)⁵.

Vennetier Michel

Ingénieur-chercheur, Unité Écosystèmes méditerranéens et risques (UR EMAX) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture d'Aix-en-Provence (Irstea)⁵.

Zanetti Caroline

Ingénieur de Recherche, Unité Ouvrages hydrauliques et hydrologie (OHAX) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture d'Aix-en-Provence (Irstea)⁵ / Fondatrice & Présidente de ARBEAUSOLutions⁶.

1 **hepia - site de Lullier**

Route de Presinge 150
1254 Jussy Genève
<http://hepia.hesge.ch/>

2 **Irstea Grenoble**

2, rue de la Papeterie - BP 76
38402 Saint-Martin-d'Hères
<http://www.irstea.fr/institut/nos-centres/grenoble>

3 **ONF - Agence départementale de l'Isère**

Hôtel des administrations
9, quai Créqui
38000 Grenoble
<http://www.onf.fr/>

4 **ARRA**

7, rue Alphonse Terray
38000 Grenoble
<http://www.rivierhonealpes.org/>

5 **Irstea Aix-en-Provence**

3275, route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix-en-Provence
<http://www.irstea.fr/institut/nos-centres/aix-en-provence>

6 **ARBEAUSOLutions**

Pépinière d'Entreprises Innovantes - Parc du Pontet
100, route des Houillères
13590 Meyreuil - Le Plan
<http://www.arbeausolutions.fr>

Remerciements

Relecteurs

Karine Adrien (Région Rhône-Alpes), Luisa Alzate (Région Rhône-Alpes), Franck Baz (Syndicat mixte d'aménagement de l'Arve et de ses abords - SM3A), Alain Bédécarrats (Irstea), Daniel Béguin (hepia), Laurent Bourdin (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse), Franck Bourrier (Irstea), Philippe Caillebotte (Centre de formation professionnelle forestière de Châteauneuf-du-Rhône), Hervé Caltran (Grand Lyon), Serge Canapa (Service des Eaux, Sols, Assainissement du canton de Vaud - SESA), Maxime Chateauvieux (Syndicat mixte des affluents du Sud-Ouest lémanique - SYMASOL), Nathan Daumergue (Irstea), Gérard Degoutte (Irstea), Fanny Dommanget (Irstea), Cécile Étienne (Région Rhône-Alpes), Isabelle Dunand (Office fédéral de l'Environnement - OFEV), Stéphanie Gaucherand (Irstea), Sophie Labonne (Irstea), Bernard Lachat (Biotec SA), Mathias Louis (Région Rhône-Alpes), Adrian Möhl (Info Flora), Grégory Paccaud (Service conseil Zones alluviales - SCZA), Anne-Cécile Prat (Région Rhône-Alpes), Emmanuel Renou (SM3A), Christian Roulier (SCZA), Nicole Sardat (Irstea).

Test de la clé des saules

Beat Bäumlér, Annick Burkhard-Prunier, Matthieu Chevalier (hepia), Jonas Duvoisin (hepia), Laëtitia Faivre, Fanny Greulich (hepia), Xavier Sartoretti (hepia), Société Mycologique et Botanique de la Région Chambérienne (SMBRC), étudiants de la filière Gestion de la Nature (hepia).

Autres contributeurs

Lionel Ansermet, Jean-Pierre Argoud (Conseil général de Savoie), Mathieu Baumann, Franck Baz (SM3A), Matthieu Bidat, Pierre Bouillon (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Bureau des investissements forestiers), Béatrice Cave (ONF), Matthieu Chevalier (hepia), Anne Citterio (Syndicat du Pays de Maurienne), Nathan Daumergue (Irstea), Fanny Dommanget (Irstea), Léon Ducasse (Irstea), Jonas Duvoisin (hepia), Cécile Étienne (Région Rhône-Alpes), Virginie Favre (hepia), Yvan Francey (hepia), Fanny Greulich (hepia), Sylvain Greutert, Georges Guiter (ONF), Christoph Köhler, Patrick Landolt (hepia), Camille Lannes (ARRA), Pauline Leduc (Irstea), Caroline Lebouteiller (Irstea), Tiphaine Leuzinger (hepia), Yves Leuzinger (hepia), Alexandre Matringe (ONF), James Medico (Service des forêts et du paysage du canton du Valais), Éric Mermin (Irstea), Jane O'Rourke (hepia), Laurent Peyras (Irstea), Johann Peter Rauch (Universität für Bodenkultur Wien - BOKU), Pierre Raymond (Terra Erosion Control), Alain Recking (Irstea), Nicole Sardat (Irstea), Xavier Sartoretti (hepia), Michel Straëbler (Section Fourragère du Groupement national interprofessionnel des Semences et plants - GNIS), Romain Tagand (hepia), Jérôme Wassef (hepia).

Préface

Les cours d'eau n'ont pas de frontière, ils défient depuis toujours le territoire et les hommes qui l'occupent. Ils creusent, élargissent et modifient leur espace vital, montrent force et agressivité lors des crues. Les corrections infligées à ces impertinents par les enrochements et ouvrages bétonnés ont depuis longtemps montré leurs limites. « Laissons faire », disent les plus audacieux ! « Amadouons-les », disent les ingénieurs modernes ! Utilisons le « génie des végétaux » !

Depuis plusieurs années, de nombreux ouvrages sont venus soutenir les efforts de tous ceux qui refusent la fatalité, tant de la « furie » des cours d'eau que du « corsetage » de leur lit. Pourtant, si le génie végétal, par ses réalisations successives, s'est forgé une place parmi les techniques de construction et de restauration des écosystèmes, il manque d'expérimentations suivies scientifiquement dans des systèmes contraints. Il appartient désormais à ses promoteurs de trouver les ressources pour des études systématiques dans des situations particulières, voir extrêmes, à l'instar du projet Géni'Alp, dont ce livre constitue la synthèse. C'est à cette condition que le génie végétal pourra exprimer tout son potentiel d'utilisation comme outil technique, mais également dans la préservation de la qualité biologique et paysagère des hydrosystèmes.

À travers les frontières et grâce à leurs compétences, les auteurs apportent une contribution significative au génie biologique. Synthèse d'expériences de terrain et suivis de projets novateurs se marient avec une approche très pragmatique de cette science des végétaux et de l'ingénierie.

Les scientifiques apportent ici une nouvelle pierre à l'édifice en prenant comme champ d'expérience les cours d'eau de montagne. Les fortes pentes, les cycles rapides et les conditions climatiques difficiles laissent planer des doutes sur les possibilités d'utilisation du génie biologique dans un contexte montagneux. En combinant des méthodes constructives, en permettant d'identifier et de sélectionner avec rigueur les végétaux utilisés, les auteurs posent les bases nécessaires pour convaincre peu à peu les maîtres d'œuvre que le génie biologique peut aussi supplanter les endiguements classiques dans ces régions. Ainsi, les expériences en cours sont documentées et décrites. Les retours d'expériences attendus sur les chantiers réalisés dans le cadre du projet permettront de dresser un bilan formateur !

L'ouvrage s'adresse à un large public. Il rassurera les financeurs lors de la conception des projets (ces méthodes sont suivies et documentées), il donnera des pistes et des références à tous les projeteurs et il pourra alimenter de manière importante les formations dans nos hautes écoles. C'est ainsi un grand plaisir que de vous offrir, au nom de tous les auteurs, une base de réflexion solide pour vos futurs projets ou vos études. Plaisir aussi de remercier toutes les institutions qui ont financé ce projet ambitieux, et fierté de voir nos professeurs et collaborateurs, associés à d'autres spécialistes, oser un grand pas vers une végétalisation intégrant la diversité de nos cours d'eau de montagne, sans concession à la protection de la population et de ses infrastructures.

À vous de découvrir et de savourer ces pages, et d'appliquer autant que possible et avec audace vos compétences ainsi complétées. Aux auteurs de suivre cette expérience pour en tirer le maximum d'enseignement.

Yves Leuzinger
Directeur
hepia Genève

Avant-propos

Riche d'un patrimoine aquatique exceptionnel, Rhône-Alpes compte sur son territoire les plus grands lacs naturels de France, deux de ses principaux fleuves et un ensemble de rivières variées, mais fragiles sur le plan écologique.

Afin de préserver cette richesse, la Région s'est fortement impliquée, depuis plus de vingt ans, dans la mise en œuvre de programmes portés par les acteurs locaux pour gérer, quantitativement et qualitativement, cette ressource.

Plus récemment, les questions de biodiversité ont intégré le champ de compétence des Régions : Réserves naturelles régionales et Schéma régional de cohérence écologique fondent aujourd'hui notre action dans ce domaine, avant peut-être, demain, de nouvelles responsabilités dans le cadre d'une nouvelle loi de décentralisation.

Face à ces évolutions, nous ne sommes pas restés inactifs et, depuis 2005, toutes les évolutions de nos dispositifs ont orienté notre action vers plus de naturalité et moins d'interventions lourdes.

Dés lors, quelle autre technique que celle du génie végétal pouvait symboliser le mieux le rapprochement des objectifs des politiques de l'eau et du patrimoine naturel ?

Notre responsabilité, en tant qu'institution régionale, est d'outiller les acteurs locaux pour faire face aux défis qui s'offrent à eux, en tant que gestionnaires de ressources naturelles.

C'est à quoi s'est attaché le projet Géni'Alp, dont l'ouvrage que vous tenez entre les mains est issu.

Parce qu'il s'adresse à un public varié, parce qu'il traite de tous les aspects du génie végétal — technique, scientifique, pratique —, je forme le vœu qu'il participe au développement des techniques douces, au bénéfice des écosystèmes et de leurs services rendus quotidiennement : régulation des crues, atténuations des pollutions, bénéfices esthétiques...

Bonne lecture à tous et merci à toute l'équipe du projet pour le travail accompli, dont un des bénéficiaires sera sans aucun doute le renforcement des liens entre acteurs suisses et français, fédérés au sein d'une entité biogéographique qui ne connaît pas les frontières administratives.

Alain Chabrolle
Région Rhône-Alpes
Vice-président délégué à la Santé
et à l'Environnement

Sommaire

Préambule	13
Géni'Alp : les raisons d'un projet franco-suisse pour le développement des techniques végétales	15
Objectifs et organisation de l'ouvrage	16
Partie I	19
1. Introduction	20
1.1. Contexte et enjeux en présence	21
1.2. Politiques publiques de gestion des cours d'eau en France et en Suisse : des regards proches	23
2. Fonctionnement des cours d'eau de montagne	29
2.1. Principes de fonctionnement	29
2.2. La biodiversité des cours d'eau et de leurs milieux annexes	38
3. Génie végétal en montagne	43
3.1. Définition et principes	43
3.2. Le génie végétal face au génie civil : avantages, limites et coûts	45
4. Pourquoi, quand et comment protéger ?	48
4.1. Les enjeux socio-économiques et la protection face au risque « érosion »	49
4.2. La définition d'une stratégie adaptée face à l'érosion : une nécessaire approche méthodologique	57
5. Conclusion : du bon usage du génie végétal	61
Partie II	63
1. Introduction	64
1.1. Objectifs généraux de cette deuxième partie	64
1.2. Présentation du plan de la deuxième partie	64
2. Le génie végétal en rivière de montagne : histoire et spécificités	65
2.1. Leçons de l'histoire	65
2.2. Spécificités du génie végétal en montagne	67
3. Approche mécanique	70
3.1. Contraintes mécaniques sur les rivières de montagne	70
3.2. Résistance mécanique des techniques de génie végétal sur les cours d'eau de montagne	75
4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants	83
4.1. Techniques végétales et techniques mixtes en cours d'eau de montagne	83
4.2. Techniques purement végétales sur des cours d'eau de pente supérieure à 1 %, mais hors contexte montagnard	110
4.3. Enrochements végétalisés	116
5. Ouvrages transversaux en bois	121
5.1. Seuils bois	121
5.2. Barrages en bois	128
6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles	138
6.1. Analyse contextuelle et présentation des objectifs	138
6.2. Analyse de la diversité végétale	138
6.3. Les espèces exotiques envahissantes	141
6.4. Analyse de la diversité de la macrofaune benthique	143
6.5. Analyse de la diversité entomologique	143
6.6. Conclusion	145

Partie III	147
1. Introduction	148
1.1. Présentation de la partie III	148
1.2. Territoire concerné	148
2. Modèles naturels	151
2.1 Communautés riveraines et alluviales montagnardes	152
2.2 Formations arbustives et fourrés de l'étage subalpin	157
3. Critères de choix des végétaux	161
3.1. Principes de base	161
3.2. Critères de choix	161
3.3. En synthèse	168
4. Description des espèces	169
4.1. Sélection des végétaux présentés	169
4.2. Comment lire une fiche espèce ?	171
4.3. Présentation des 50 espèces	173
4.4. Synthèse : potentiel d'utilisation de différentes espèces ligneuses	274
5. Autres espèces utilisables	276
5.1. Des espèces herbacées à fort potentiel	276
5.2. Pétasites, tussilage et adénostyles : des composées à larges feuilles	277
5.3. La calamagrostide faux roseau : une graminée typiquement alluviale	279
5.4. Les épilobes : des onagracées essentiellement rhizomateuses	280
5.5. Les valérianes	281
5.6. Les grandes ombellifères	283
5.7. Deux trèfles pionniers	284
5.8. Quelques assemblages possibles	284
6. Clé d'identification des saules en période de repos végétatif	285
6.1. Introduction	285
6.2. Clé des saules en période de repos végétatif	289
Conclusion et annexes	301
Conclusion générale	303
Bibliographie	305
Lexique botanique	309
Index des espèces traitées dans la partie III	313
Index des noms latins	313
Index des noms français	314
Index des noms de milieux	315
Crédits photos et illustrations	317

Préambule

Cher lecteur,

Le présent ouvrage est le résultat d'un important travail commun mené dans le cadre du **projet franco-suisse Géni'Alp (Génie Végétal en rivière de montagne)** dédié à la promotion et à la mise en œuvre de **techniques végétales pour la stabilisation des berges de cours d'eau de montagne**.

Le génie végétal est un ensemble de techniques de construction utilisant des végétaux vivants. Fondées sur l'observation et l'imitation des modèles naturels, elles répondent à des problématiques d'aménagement du territoire et de protection des biens et des personnes. Il s'agit ainsi de techniques alternatives ou complémentaires aux techniques traditionnelles de génie civil.

Cet ouvrage technique s'adresse à un public averti, formé aux différentes problématiques de gestion globale de l'eau et des milieux aquatiques, de l'aménagement du territoire et des milieux naturels. En qualité de technicien de rivière, gestionnaire de milieux aquatiques, agent de collectivité locale ou de l'État, maître d'œuvre, chercheur ou étudiant... **les attentes et le niveau de lecture ne seront pas les mêmes...** L'ambition des auteurs est que chacun puisse néanmoins trouver dans cet ouvrage des informations techniques adaptées à son métier ou à sa formation. **Chaque partie peut ainsi être utilisée indépendamment.**

Cet ouvrage n'a pas vocation à servir de « livre de recettes » ou de « boîte à outils » pour une bonne gestion des cours d'eau ou la protection contre l'érosion. Il ne se substitue en aucun cas aux études globales à l'échelle d'un bassin versant, préalables indispensables à tout aménagement. Il ne fournit pas non plus de solutions toutes faites aux problématiques de gestion des milieux aquatiques ou d'aménagement du territoire, mais **synthétise les connaissances actuelles sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales en rivières de montagne.**

Les « **rivières de montagne** » ont ici été appréhendées comme des cours d'eau s'écoulant à une altitude supérieure à 800 m et/ou présentant une pente supérieure à 1 %, avec un fort transport solide et un régime hydrologique glaciaire, nival ou pluvio-nival.

Ces cours d'eau présentent de nombreuses spécificités qui rendent les interventions souvent difficiles ou tout du moins plus complexes qu'en plaine (pente, enneigement, régime hydraulique, etc.). L'utilisation de techniques de génie végétal y est ainsi moins développée par manque de connaissances techniques et d'expériences suffisantes pour la réalisation d'ouvrages résistant à des contraintes tractrices élevées.

En prélude à la présentation de l'ouvrage, il convient néanmoins de décrire le contexte, les objectifs, l'échelle de travail et les actions du projet Géni'Alp.

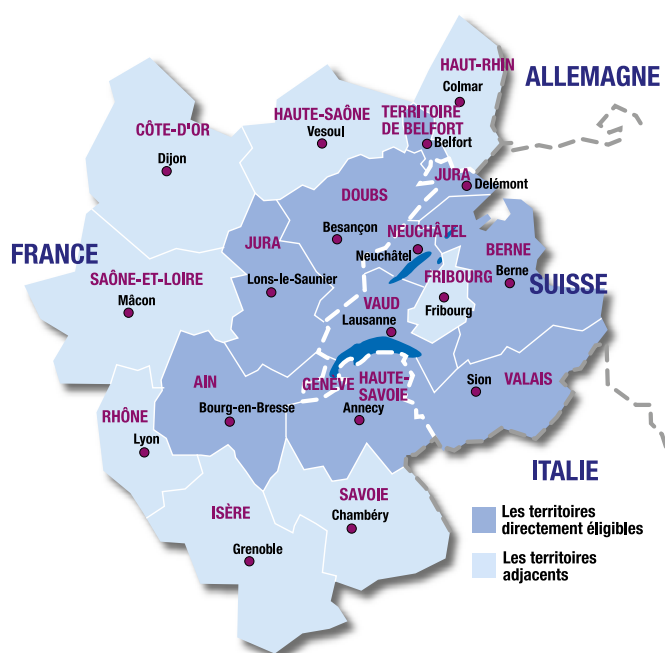


Fig. 1 - Espace transfrontalier franco-suisse dans le cadre du programme de coopération transfrontalière Interreg IVA France-Suisse.

Géni'Alp : les raisons d'un projet franco-suisse pour le développement des techniques végétales

Des enjeux forts en vue d'une gestion équilibrée des cours d'eau

Depuis longtemps utilisées pour la protection de berges en rivière de plaine, les techniques de génie végétal ne sont que très rarement utilisées sur les cours d'eau de montagne français et suisses en dépit de leurs fortes potentialités.

À la lueur des travaux réalisés par différents acteurs de l'Arc alpin (en Italie et en Autriche notamment), gestionnaires et chercheurs étrangers disposent d'un retour d'expériences de plusieurs dizaines d'années sur des ouvrages utilisant le génie végétal en milieu torrentiel (Schiechl et Stern 1996 – fig. 2).



Fig. 2 - Ouvrage de protection de berge utilisant la technique des couches de branches à rejets sur la rivière Passer (Sud Tyrol - Italie), 20 ans après réalisation.

Face à ce constat, le projet Géni'Alp cherche à répondre à plusieurs problématiques :

- Face aux enjeux liés à la gestion globale des milieux aquatiques, **quelle stratégie d'intervention définir face à l'érosion** des berges des rivières de montagne ?
- En s'appuyant sur l'expérience et le savoir-faire des acteurs européens, **quelles techniques de végétalisation de berges développer** sur les cours d'eau montagnards franco-suisse ?
- **Quels modèles naturels prendre pour référence et quelles espèces utiliser** lors de la mise en œuvre ?
- **Quels sont les exemples de projets de protection de berges contre l'érosion** alliant efficacité technique, aspect paysager et préservation de la biodiversité ?
- Enfin, dans un souci d'atteinte du bon état ou du bon potentiel écologique, **quelles sont les conditions d'accueil de la biodiversité sur les différents types d'ouvrages ?**

Géni'Alp : des objectifs ambitieux

Afin de répondre à ces questionnements, tout en **conciliant sécurité des biens et des personnes et biodiversité en rivière de montagne**, les partenaires du projet Géni'Alp ont pour ambition de **développer et de promouvoir les techniques végétales auprès des gestionnaires et acteurs locaux** par :

- la sensibilisation et la formation afin de **favoriser une évolution des pratiques** ;
- la **mise à disposition d'éléments de connaissance et d'expériences concrètes**.

Attention : il ne s'agit en aucun cas de promouvoir l'intervention systématique sur les cours d'eau. Il s'agit au contraire d'inclure le génie végétal et ses potentialités au sein d'une réflexion globale visant à restaurer un bon état écologique et à concilier la préservation des intérêts humains et environnementaux.

Géni'Alp : une échelle de travail cohérente et homogène

Le projet Géni'Alp s'intègre dans le cadre du programme de coopération transfrontalière franco-suisse (Interreg IVA France-Suisse – fig. 1). Le choix de cette échelle de travail a été orienté par l'existence de caractéristiques relativement homogènes au sein de cet espace en ce qui concerne :

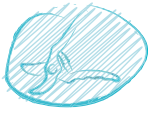
- les conditions bioclimatiques spécifiques aux Alpes du Nord occidentales qui diffèrent de celles des Alpes orientales et des Alpes du Sud ;
- les caractéristiques morphodynamiques des cours d'eau ;
- le faible niveau d'utilisation des techniques de génie végétal.

L'approche franco-suisse a permis de **réunir des acteurs importants et complémentaires des deux pays** et de faire collaborer à la fois partenaires techniques et financiers, organismes de recherche en environnement et collectivités locales chargées de la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau, pour répondre à des objectifs liés à l'amélioration globale de l'état des milieux aquatiques.

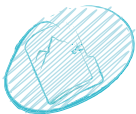
À travers des retours d'expériences à l'échelle des Alpes sur les techniques utilisées pour la protection des berges et la mise en place d'ouvrages innovants pour ce territoire, ils se sont faits porte-parole du développement de techniques douces comme alternatives ou compléments aux techniques de génie civil pour la maîtrise de l'érosion en rivière de montagne.

Géni'Alp : des actions diversifiées et complémentaires

Géni'Alp est constitué de trois actions communes :



la mise en place de **plusieurs chantiers pilotes au caractère innovant** sur le territoire franco-suisse (fig. 3) et d'un suivi de la biodiversité des ouvrages de génie civil et de génie végétal ;



la rédaction du présent ouvrage technique à l'usage de l'ensemble des acteurs de la gestion des milieux aquatiques et de l'eau ;



l'organisation d'**événements de sensibilisation, d'information et de formation** complétés par l'édition de **supports de communication** (fig. 4).



Fig. 3 - Inauguration du chantier pilote Géni'Alp sur le Bens (Isère - France).



Fig. 4 - Maquette pédagogique : lits de plants et plançons et enrochement de pied.

Objectifs et organisation de l'ouvrage

L'un des freins au développement d'ouvrages de protection utilisant les techniques végétales sur les rivières de montagne est **l'absence de documents de référence** permettant à la fois de lever les obstacles tant sur le plan de la gouvernance qu'au niveau des techniques de réalisation et des espèces utilisées. En effet, si les vingt dernières années ont vu un fort développement de guides généraux applicables aux rivières de plaine, aucun recueil spécifique aux rivières de montagne n'a été publié.

Cet ouvrage a pour but d'informer les collectivités et acteurs de l'eau en général de **l'existence d'alternatives à la protection des berges** (espace de mobilité et non-intervention) **et, lorsque celle-ci s'avère indispensable, de la possibilité d'utiliser d'autres techniques que celles du génie civil, même en rivière de montagne.**

Le présent ouvrage s'organise en trois grandes parties, utilisables indépendamment les unes des autres.

I. Principes d'aménagement des cours d'eau : fonctionnement, spécificités du génie végétal, politiques et stratégies d'intervention

La première partie de cet ouvrage introduit une réflexion globale sur la gestion intégrée des cours d'eau visant à concilier intérêts humains et enjeux environnementaux de bon fonctionnement hydromorphologique (fig. 5).



Fig. 5 - Zone alluviale d'altitude sur la Navisence, en Anniviers, dans les Alpes valaisannes (1 900 m - Valais - Suisse).

Elle est composée de cinq chapitres apportant des éléments de réponse et de diagnostic aux questionnements suivants :

- ➔ **Quels sont les cadres réglementaires d'intervention sur les cours d'eau français et suisses ainsi que les différences de vision entre ces deux territoires ?** Les grandes orientations politiques françaises

et suisses vis-à-vis de la problématique de protection de berges en rivière, ainsi que des exigences de bon fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau et d'atteinte du bon état écologique, seront analysées dans ce chapitre ;

- **Comment prendre en compte de manière efficace les fonctionnalités écologiques et les problématiques liées au transport solide ?** Le deuxième chapitre présentera notamment le fonctionnement des cours d'eau et les spécificités des rivières de montagne ;
- **Le génie végétal constitue-t-il une alternative crédible au génie civil (avantages, inconvénients, coûts) ?** La notion de génie végétal ainsi que des éléments de comparaison entre techniques végétales et techniques classiques de génie civil seront présentées ;
- **Comment prendre en compte les enjeux humains, politiques et environnementaux dans le cadre d'une réflexion globale de protection des berges ? Dans quels cas une berge menacée par l'érosion doit-elle être protégée ?** Ce chapitre s'attachera à fournir des éléments de diagnostic et de réflexion en vue de la définition d'une stratégie cohérente face à une érosion de berge ;
- **Comment faire bon usage des potentialités des techniques de génie végétal ?** Il s'agira ici de synthétiser les éléments à prendre en compte pour faire bon usage du génie végétal et de la protection de berges.

Cette partie s'appuie pour une large part sur des données bibliographiques, sur les observations des auteurs et de spécialistes ainsi que sur des éléments issus des chantiers pilotes. **Certains points traités dans les prochains chapitres sont précisés dans les parties II et III.**

La première partie s'adresse à l'ensemble des acteurs de la gestion des milieux aquatiques et de l'aménagement du territoire et plus spécifiquement aux techniciens, qu'ils soient en position de maître d'ouvrage ou de maître d'œuvre. Il s'agit d'une base de connaissances permettant de définir une stratégie d'intervention face au phénomène d'érosion et une argumentation à destination des élus de sa collectivité.

II. Recueil d'expériences techniques : végétalisation de berges et ouvrages bois utilisables en rivière de montagne et influence sur la biodiversité

La deuxième partie est exclusivement dédiée aux techniques de végétalisation de berges (limites d'application et modalités de mise en œuvre), ainsi qu'à leur influence vis-à-vis de la biodiversité.

Par manque de connaissances techniques et de retours d'expériences, les techniques végétales sont très peu utilisées sur les cours d'eau de montagne. Pourtant, certaines d'entre elles ont fait leurs preuves depuis plusieurs années dans des milieux à fortes contraintes dans d'autres pays de l'Arc alpin.

Plusieurs techniques de végétalisation de berge ont donc été mises en œuvre dans le cadre du projet Génie'Alp, à l'exemple des couches de branches à rejets, des lits de plants et plançons et des caissons végétalisés (fig. 6). De nombreuses connaissances ont ainsi été acquises et produites en matière de dimensionnement, de réalisation de ces techniques et autour de leur apport en termes de biodiversité.



Fig. 6 - Caisson végétalisé en rivière de montagne sur le Bens (Isère - France).

L'objectif de cette deuxième partie est ainsi de **mutualiser ces connaissances techniques et de fournir les éléments de base utiles pour la végétalisation de berges en rivière de montagne.**

Les différents aspects des techniques végétales et des ouvrages bois applicables aux milieux à fortes contraintes sont ainsi développés à travers cinq chapitres :

- Histoire et spécificités des techniques végétales en rivière de montagne ;
- Approche mécanique des contraintes sur les berges de rivières de montagne et résistance mécanique des ouvrages ;
- Exemples de réalisations avec différentes techniques de protection de berge employant des végétaux vivants ;
- Réalisation d'ouvrages bois transversaux pour la stabilisation du fond du lit et des berges ;
- Apports en termes de biodiversité au sein d'ouvrages de génie végétal et comparatif entre berges naturelles et berges aménagées en génie végétal et génie civil.

Cette partie s'appuie sur la bibliographie anglophone, italophone et germanophone, sur les ouvrages de référence francophones et sur des exemples concrets.

Les ouvrages de protection de berge utilisant des végétaux sont peu nombreux en altitude. La majorité des exemples traités ici concerne des rivières de montagne. Toutefois, certains exemples concernent des cours d'eau non spécifiquement montagnards, mais présentant des pentes supérieures à 1 %. Ces derniers ouvrages illustrent des techniques purement végétales potentiellement utilisables en rivière de montagne.

L'essentiel des retours d'expériences présentés dans cette partie est issu des chantiers pilotes mis en œuvre dans le cadre du projet Géni'Alp en France et en Suisse. Par ailleurs, à travers un voyage d'étude à l'étranger, les partenaires techniques du projet ont également recueilli d'autres exemples intéressants de réalisations.

La deuxième partie s'adresse à un public de praticiens, constitué de techniciens (au sens large) de collectivités gestionnaires de milieux aquatiques, de maîtres d'œuvre, d'agents d'entreprises de travaux et d'étudiants. Elle apportera des éléments utiles au technicien averti, ou encore à l'ingénieur et au chercheur, par des retours d'expériences précis, des éléments techniques de dimensionnement et de calcul adaptés aux rivières de montagne.

III. Guide d'utilisation des espèces végétales

La troisième partie de cet ouvrage traite des espèces végétales, de leurs caractères diagnostics, de leur écologie et de leurs aptitudes biotechniques.

Outre la précision de sa réalisation, la réussite d'un ouvrage de génie végétal est en effet fortement conditionnée par la bonne adaptation des végétaux utilisés aux conditions stationnelles, ainsi qu'à l'adéquation entre leurs particularités biotechniques et les objectifs techniques, biologiques ou paysagers fixés.

L'approvisionnement en matériel végétal est par ailleurs régulièrement réalisé en milieu naturel lors de la phase de repos physiologique, à une période où les organes permettant une reconnaissance facilitée (feuilles, fleurs) sont absents. Parmi les végétaux utilisables, les saules (*Salix spp.*) offrent les potentialités les plus importantes pour le génie végétal (fig. 7). Or, il s'agit d'un des groupes dont le diagnostic spécifique est parmi les plus complexes. À ce jour, il existe d'ailleurs peu d'outils illustrés aidant à leur détermination en phase de repos végétatif. Face à cette lacune, l'élaboration d'un outil facilitant la sélection des espèces adaptées à la réussite d'un projet était nécessaire.



Fig. 7 - Chatons mâles de saule pourpre (*Salix purpurea*).

La troisième partie de cet ouvrage a donc pour **objectif** d'apporter aux professionnels et aux étudiants des **clés de choix et de détermination des espèces ligneuses et herbacées utilisables** pour la végétalisation de berges en rivière de montagne.

Elle présente dans le détail les éléments fondamentaux à prendre en compte :

- une description des différents **groupements végétaux** pouvant servir de **modèles naturels** sur lesquels il sera possible de s'appuyer lors de l'élaboration d'un projet ;
- une présentation de **50 espèces** (herbacées et ligneuses) **utilisables** pour la stabilisation des berges, ainsi qu'**une vingtaine d'autres potentiellement intéressantes à cet effet** ;
- une **clé illustrée d'identification des saules en période hivernale**.

Cette partie s'appuie pour une large part sur des données bibliographiques, l'acquisition de données biométriques et les observations des auteurs.

Elle s'adresse plus spécifiquement aux praticiens, aux étudiants dans le domaine de l'aménagement et de l'ingénierie, et aux biologistes en général. Elle sera notamment utile au maître d'œuvre à la recherche de conseils pour la reconnaissance et l'utilisation des différentes espèces ligneuses et herbacées dans son projet, ou à l'étudiant qui y trouvera les informations nécessaires à sa formation.

Partie I



Principes d'aménagement des cours d'eau

1. **Introduction**
2. **Fonctionnement des cours d'eau de montagne**
3. **Génie végétal en montagne**
4. **Pourquoi, quand et comment protéger ?**
5. **Conclusion : du bon usage du génie végétal**

Nicolas Valé, André Evette, Frédéric Liébault, Caroline Zanetti, Fabien Espinasse,
Jean-Baptiste Barré, Patrice Mériaux, Michel Vennetier, Paul Cavallé, Camille Lannes

Génie Végétal en rivière de montagne

1. Introduction

L'atteinte du bon état écologique, objectif fixé par la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000, nécessite une gestion globale de l'eau et des milieux aquatiques à l'échelle d'un territoire cohérent : **le bassin versant**. Une gestion globale, cohérente et concertée consiste à rechercher la conciliation entre l'ensemble des enjeux du territoire.

L'évaluation de la qualité des cours d'eau français (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – MEDDTL 2005) fait ressortir que près de 50 % des masses d'eau de surface du territoire métropolitain risquent de ne pas atteindre le bon état écologique en 2015 en raison, notamment, d'un mauvais fonctionnement hydromorphologique. Le rapport annuel 2010 de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse (AERM&C) fait en effet ressortir que « la dégradation morphologique des cours d'eau » constitue l'un des deux principaux enjeux de l'état des eaux (AERM&C 2011).

Définition du bon état écologique :

L'état écologique d'une masse d'eau de surface résulte de l'appréciation de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés à cette masse d'eau. Il est déterminé à l'aide d'éléments de qualité : biologiques (espèces végétales et animales) et physico-chimiques, appréciés par des indicateurs (par exemple les indices invertébrés ou poissons en cours d'eau). Pour chaque type de masse d'eau (par exemple : petit cours d'eau de montagne, lac peu profond de plaine, côte vaseuse, etc.), il se caractérise par un écart aux « conditions de référence » de ce type, qui est désigné par l'une des cinq classes suivantes : très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais. Les conditions de référence d'un type de masse d'eau sont les conditions représentatives d'une eau de surface de ce type, pas ou très peu influencée par l'activité humaine.

En Suisse, on considère qu'environ 48 % des cours d'eau sont dans un mauvais état et que 22 % du réseau hydrographique est fortement modifié par les interventions humaines (Office fédéral de l'environnement – OFEV 2011). Ces chiffres atteignent près de 80 % en zone habitée (Institut fédéral suisse de recherche sur les sciences et technologies de l'eau – EAWAG 2010). L'OFEV estime ainsi nécessaire d'engager une politique de revitalisation pour près de 11 000 km de cours d'eau en Suisse.

Au sortir de près d'un siècle de dégradations physiques diverses issues des activités humaines, les cours d'eau français, suisses et, plus largement, européens subissent des dysfonctionnements graves et parfois irréversibles (incision généralisée des lits fluviaux, dégradation de la qualité des eaux, disparition d'habitats et d'espèces, etc.) qui impactent en retour les activités humaines (diminution des ressources en eau disponibles, déchaussement d'ouvrages d'art, etc.).

Avec les travaux de chenalisation des cours d'eau, d'extraction dans le lit mineur ou encore de blocage de la dynamique latérale du lit, le déficit sédimentaire de la plupart des cours d'eau français et suisses est indéniable et inquiétant. Dans ce cadre, il s'avère aujourd'hui indispensable de rétablir un transport de matériaux solides en quantité suffisante au sein de nos fleuves et rivières.

Il est par conséquent nécessaire, dans la mesure du possible, de conserver des zones de mobilité pour les cours d'eau au sein du corridor fluvial afin d'assurer la remobilisation du stock sédimentaire en place et de restaurer un « bon fonctionnement » de nos rivières, tant sur le plan géomorphologique qu'écologique.

Toutefois, compte tenu des différents enjeux socio-économiques en présence, il est également important de protéger certains secteurs contre l'érosion.

1.1. Contexte et enjeux en présence

1.1.1. Protection des biens et des personnes ou préservation de l'espace de mobilité des cours d'eau ?

Le transport solide constitue un élément fondamental de l'équilibre de l'hydrosystème fluvial et participe largement au bon état des cours d'eau. Lorsque la quantité de matériaux solides charriée par le cours d'eau est inférieure à sa capacité de charriage, celui-ci a tendance à éroder les berges afin de se réapprovisionner en charge solide (fig. 1).

À défaut (protection de berges trop importante, absence de zones d'apports suffisants, etc.), le cours d'eau érode le fond de son lit. Il en résulte alors un enfoncement du lit mineur dont les conséquences sont particulièrement préoccupantes :

- accroissement de l'érosion des berges ;
- déchaussement d'ouvrages de franchissement (ponts, passerelles, etc. – fig. 2) ou de protection (digues notamment) ;
- diminution de la ressource en eau disponible ;
- perte de la dynamique alluviale entraînant la modification des peuplements végétaux riverains ;
- perte de biodiversité par déconnexion des milieux annexes au cours d'eau (connectivité) et création de discontinuités longitudinales.

L'incision généralisée des cours d'eau européens, observée depuis plusieurs décennies, nuit fortement au bon fonctionnement de l'hydrosystème et à la qualité des milieux aquatiques. La ressource en eau et la biodiversité s'en trouvent particulièrement affectées. Il convient donc de **faciliter la reconquête d'un espace de mobilité des cours d'eau** (ou de bon fonctionnement) **afin de favoriser l'apport de charge solide et, indirectement, atteindre le « bon état écologique ».**

Au-delà de ce cadre général, il convient **d'aborder cette problématique de manière globale** et de **mettre en parallèle les avantages et inconvénients de la restauration d'un cours d'eau et de son espace de mobilité, avec les coûts engendrés directement et indirectement.** Il est ainsi parfois préférable de sauvegarder certains enjeux socio-économiques en place qui présentent une importance particulière (captages d'eau potable, voies de communication principales, zones urbanisées, etc.) et dont le déplacement coûterait bien davantage que les bénéfices socio-économiques obtenus par la restauration de l'espace de mobilité du cours d'eau sur le secteur. **Il s'agit donc de préserver la sécurité des biens et des personnes face au risque d'érosion des berges de cours d'eau par la protection de certains secteurs contre l'érosion.**

La maîtrise de l'érosion constitue donc un défi majeur pour les pouvoirs publics ; défi qu'il convient d'inclure dans une logique globale d'aménagement du territoire afin de concilier de manière cohérente et coordonnée « protection des biens et des personnes » et « préservation de l'espace de mobilité des cours d'eau » (fig. 3).



Fig. 1 - Érosion de berge sur le Haut Giffre (Haute-Savoie - France).



Fig. 2 - Déchaussement d'ouvrage latéral dû à l'incision du cours d'eau à la confluence du Claret avec l'Arc (Savoie - France).



Fig. 3 - Érosion de berge menaçant plusieurs enjeux socio-économiques sur la Dora di Bardonecchia (Piémont - Italie) : route, chemin de fer, réseau électrique.

1.1.2. La maîtrise de l'érosion en rivière de montagne : constat sur les techniques utilisées

Les rivières de montagne, situées entre les hauts bassins versants torrentiels et la plaine, présentent des contraintes spécifiques du fait de leur situation en fond de vallée et de l'urbanisation croissante des bassins versants alpins (fig. 4). L'espace disponible pour la conservation ou la restauration d'un espace de mobilité du cours d'eau est ainsi souvent limité, faute notamment d'une réelle politique de maîtrise foncière des zones alluviales. Les cours d'eau alpins français sont par ailleurs identifiés comme faisant l'objet d'importantes pressions hydromorphologiques risquant d'empêcher l'atteinte du bon état (AERM&C 2011). Il en va de même pour les rivières suisses.



Fig. 4 - L'Arc en vallée de la Maurienne : une rivière très contrainte (Savoie - France).

En raison de leurs spécificités (régimes hydrauliques parfois torrentiels, fortes pentes, vitesses d'écoulement importantes, forte dynamique, lit mobile, etc.), les cours d'eau alpins sont particulièrement concernés par les phénomènes érosifs. De plus, les caractéristiques des zones de montagne induisent souvent une augmentation des coûts d'intervention et d'entretien par rapport aux territoires de plaine.

Dans le cadre des opérations de **protection de berges**, le choix des techniques à utiliser repose souvent sur des critères empiriques liés à l'expérience des gestionnaires, aux usages ou encore à des considérations politiques locales. Ainsi, les zones exposées aux phénomènes d'érosion font fréquemment l'objet d'interventions recourant à des techniques lourdes (enrochement, recalibrage, bétonnage, endiguement – fig. 5) alors qu'il existe souvent des alternatives plus douces, plus respectueuses sur le plan environnemental et paysager, et parfois moins coûteuses : les **techniques de génie végétal** (fig. 6).



Fig. 5 - Enrochement de berge en rivière de montagne.

D'une manière générale, les techniques de génie végétal appliquées à la protection des berges sont souvent considérées par les maîtres d'ouvrage publics et maîtres d'œuvre français et suisses comme inefficaces sur des cours d'eau dynamiques comme ceux du massif alpin. Or, les niveaux de recours à ces techniques et les types d'ouvrages réalisés sont variables suivant les pays et les régions de l'Arc alpin. En France comme en Suisse, les différentes options d'aménagement apparaissent souvent relever des habitudes locales plutôt que d'un choix raisonné croisant les enjeux sécuritaires, les contraintes physiques, les aspects environnementaux et les coûts associés.



Fig. 6 - Exemple de technique végétale appliquée aux berges de rivières de montagne (Sud Tyrol - Italie).

1.1.3. La végétation riveraine des cours d'eau : un corridor biologique pour la conservation de la biodiversité

Rapportée à leur surface, la contribution des milieux aquatiques à la biodiversité globale est nettement supérieure à celle des écosystèmes terrestres (EAWAG 2010). Or, l'OFEV estime, par exemple, qu'en Suisse, 90 % des zones alluviales ont disparu au cours des dernières décennies. En France, l'évolution des zones humides fut jugée

alarmante au cours de la période 1960-1980 (Bernard 1994). Au cours de la période 1990-2000, « *si on observe un ralentissement de la perte des surfaces, la dégradation des milieux est toujours importante comparée aux années 1960-1980* » (Fouque et al. 2006).

L'érosion de la biodiversité constitue aujourd'hui une problématique centrale des politiques environnementales, qui a incité la mise en œuvre de politiques publiques de préservation, notamment par la conservation, la restauration et la création de continuités écologiques.

Il s'agit de permettre la préservation de conditions favorables au maintien des espèces animales et végétales par la conservation de réservoirs (zones de vie des espèces, propices à l'abri, au nourrissage et à la reproduction) et de voies de déplacement entre ces réservoirs, appelées « corridors ». C'est ainsi qu'est apparue, au cours des dernières années, la **notion de trame verte et bleue**, axée sur la circulation des espèces. Elle complète les dispositifs conservatoires que sont les réserves naturelles notamment.

En France, cette notion est traduite à l'échelle régionale par les Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE). Côté helvétique, la Conception paysage suisse (CPS) engage les acteurs à l'échelle nationale, tandis que les cantons énoncent des orientations précises par l'intermédiaire des plans directeurs cantonaux.

Les berges de cours d'eau constituent des zones d'interface entre milieux terrestre et aquatique et présentent une très grande richesse biologique. Les ripisylves jouent quant à elles un rôle écologique majeur de par leurs fonctions de zone d'abri, de nourrissage, d'ombrage, d'autoépuration ou encore de ralentissement des crues. **Les berges et leurs milieux associés jouent également un rôle majeur de corridor biologique qu'il convient de préserver.**

De manière générale, les milieux montagnards et alpins sont parmi les mieux conservés. Dans certaines vallées alpines fortement anthropisées, les ripisylves constituent parfois les derniers corridors disponibles pour la faune et présentent à ce titre une importance particulière.

Les ouvrages de génie civil (enrochements, murs en béton) constituent autant de coupures du corridor qui perd alors une part importante de sa fonctionnalité écologique (fig. 7). L'utilisation de techniques de génie végétal peut ainsi jouer un rôle important en termes de préservation des corridors biologiques et de la biodiversité (chap. II.2.2 et II.6) dans le cas où la restauration de la dynamique alluviale n'est pas envisageable.



Fig. 7 - Rupture de la continuité du corridor écologique.

1.2. Politiques publiques de gestion des cours d'eau en France et en Suisse : des regards proches

Une gestion efficace et cohérente des cours d'eau et des milieux aquatiques nécessite la mise en place de politiques publiques concertées et incitatives visant à coordonner l'ensemble des acteurs concernés (riverains, agriculteurs, industriels, collectivités locales, etc.) en faveur d'une préservation de milieux et de ressources à la fois fragiles et précieux. Pour cela, l'Union européenne et la Confédération helvétique se sont dotées d'instruments législatifs et réglementaires permettant d'assurer une gestion cohérente et concertée de leurs milieux aquatiques. Certains de leurs objectifs diffèrent mais tendent de plus en plus à se rapprocher.

1.2.1. Des cadres réglementaires et législatifs très différents...

Largement inspirée du système français de gestion de l'eau et des milieux aquatiques mis en place depuis les années 1970, la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE), adoptée en 2000, définit le contexte législatif de la politique publique de l'eau de l'Union européenne. Elle fixe un cadre communautaire global qui s'impose au-delà des législations nationales préexistantes et impose aux États membres des efforts importants pour un objectif ambitieux : **atteindre le « bon état des milieux aquatiques » en 2015.**

Les milieux sont divisés par « masses d'eau souterraines et superficielles » qui doivent répondre d'un bon état chimique, écologique et quantitatif. L'objectif « 2015 » est contraignant, mais des dérogations peuvent toutefois être accordées pour certaines masses d'eau afin de reporter l'échéance à 2021, voire 2027 dans les cas les plus problématiques. L'État français est ainsi soumis à des objectifs de résultats qui déterminent largement sa politique et qui sont traduits par l'intermédiaire de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA : loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 – fig. 8).

En Suisse, la protection de l'eau à l'échelle de la Confédération est inscrite dans la Constitution (art. 74 et, plus précisément, art. 76) qui énonce la base de la législation sur la protection de l'eau (SWGK : Schweizer Wasser- und Gewässerschutzgesetzgebung). La base juridique en matière de gestion de la ressource et des milieux aquatiques diffère néanmoins de la France et de l'Europe par **l'absence de législation unique dans ce domaine**. Au lieu de cela, un ensemble de **lois sectorielles, spécifiques à chaque domaine mais interdépendantes et combinables**, ont été édictées sur la base de la Constitution fédérale. Ces lois sectorielles, dont notamment les lois pour la pêche (LFSP), la protection contre les crues et l'aménagement des cours d'eau (LACE), l'utilisation des forces hydrauliques (LFH) ou encore la protection des eaux (LEaux), constituent le fondement de la politique de gestion de l'eau et des milieux aquatiques en Suisse. La loi sur la protection de la nature et du paysage (LPN, art. 18) vise quant à elle la protection d'espèces animales et végétales et réglemente notamment les zones alluviales et les ripisylves en tant qu'espaces vitaux et espaces de déplacement des espèces.

L'organisation de la gestion intégrée de l'eau en Suisse varie largement selon le canton considéré. Des planifications sectorielles peuvent être mises en œuvre à différentes échelles (régionale, cantonale, bassin versant). Les thématiques choisies diffèrent selon les cantons. Il n'existe donc pas d'organisation générale appliquée à l'échelle nationale, hormis dans certains cas particuliers,

tels que la renaturation des eaux (fig. 8). **Les cantons sont en effet tenus de planifier et de mettre en œuvre des mesures visant à préserver ou à restaurer l'état naturel des cours d'eau à travers des plans sectoriels de renaturation** (revitalisation, assainissement et utilisation de la force hydraulique). Ceux-ci doivent être mis en place à l'échelle cantonale selon la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) et être soumis à la Confédération d'ici fin 2013 pour adoption avant fin 2014.

Tous les plans sectoriels ne sont pas intégrés dans les plans directeurs cantonaux. Hormis les plans sectoriels prévus spécifiquement par la LEaux dans le cadre de la thématique de renaturation des eaux, il ne s'agit pas d'une exigence pour les autres plans sectoriels (fig. 8). La pratique, là aussi, diffère d'un canton à l'autre.

S'insérant dans le cadre fixé au niveau national, les lois cantonales viennent spécifier et compléter certaines thématiques, d'une manière qui varie d'un canton à l'autre. Ainsi, elles sont **parfois subdivisées en thématiques plus précises**, comme, par exemple, dans le canton de Vaud, les lois cantonales sur l'aménagement des cours d'eau, sur la distribution de l'eau ou sur la police des eaux du canton.

Bien que ne faisant pas partie de l'Union européenne, la Suisse joue un rôle majeur dans la gestion des cours d'eau en Europe, du fait notamment de sa situation géographique à la source de deux grands fleuves, le Rhône

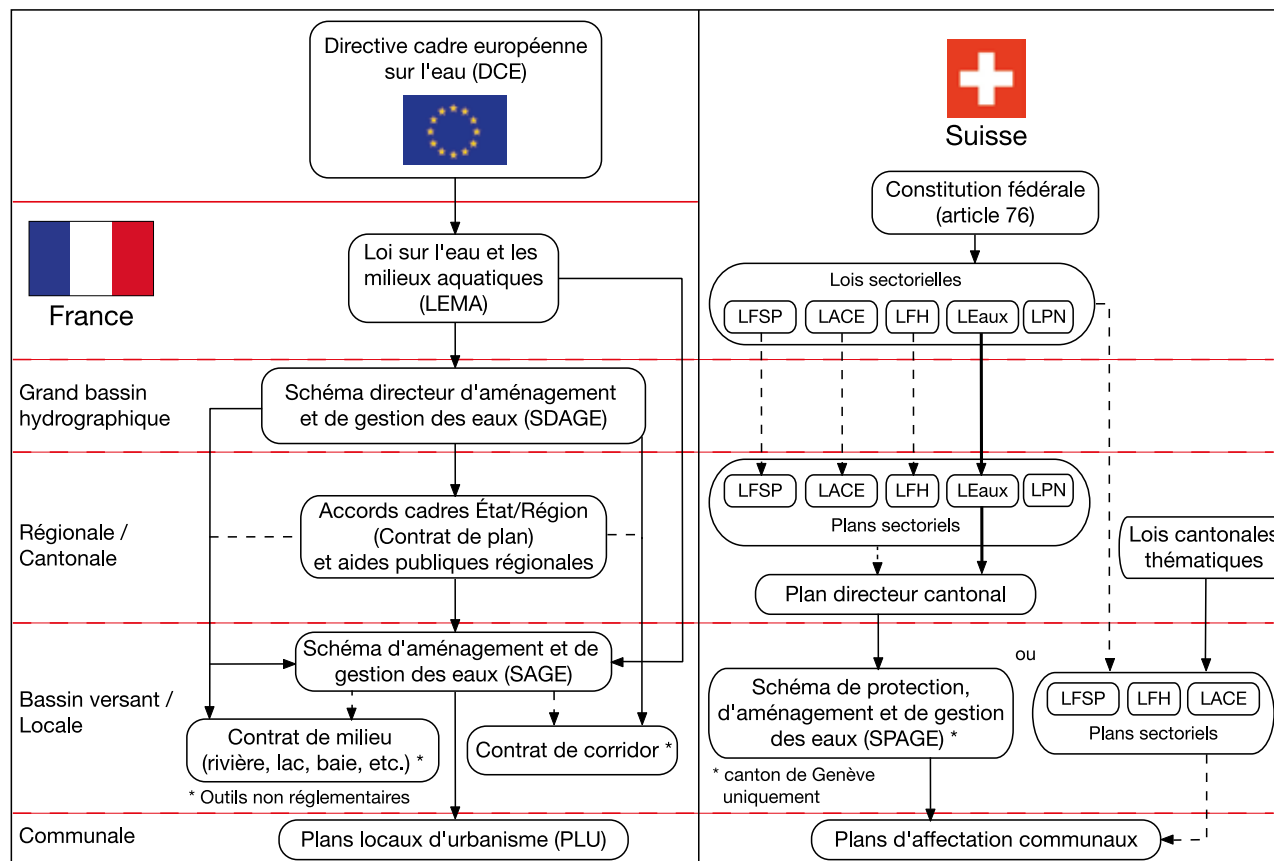


Fig. 8 - Organigramme hiérarchique des réglementations et outils non réglementaires français et suisses intervenant à différentes échelles sur la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau : tentative de comparaison.

et le Rhin. **Plusieurs conventions transfrontalières ont été mises en place afin d'assurer un juste équilibre dans le partage des eaux**, à l'exemple, entre autres, de la convention franco-suisse instaurée en 1962 pour le maintien et la restauration d'une qualité écologique de l'eau et des milieux aquatiques du Léman (Commission internationale pour la protection des eaux du Léman – CIPEL).

Certaines orientations politiques actuelles telles que la récente révision de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), entrée en vigueur le 1^{er} juin 2011, tendent à rapprocher la législation suisse de la DCE.

1.2.2. Une échelle de gestion commune, le bassin versant, pourtant géré de manière différente...

La notion de bassin versant constitue l'échelle de référence de la gestion des cours d'eau de part et d'autre de la frontière. Elle n'est pas calquée sur les frontières administratives et politiques mais constitue l'unité géographique et territoriale la plus cohérente et la plus pertinente pour une gestion efficace des milieux aquatiques et de l'eau (fig. 9).

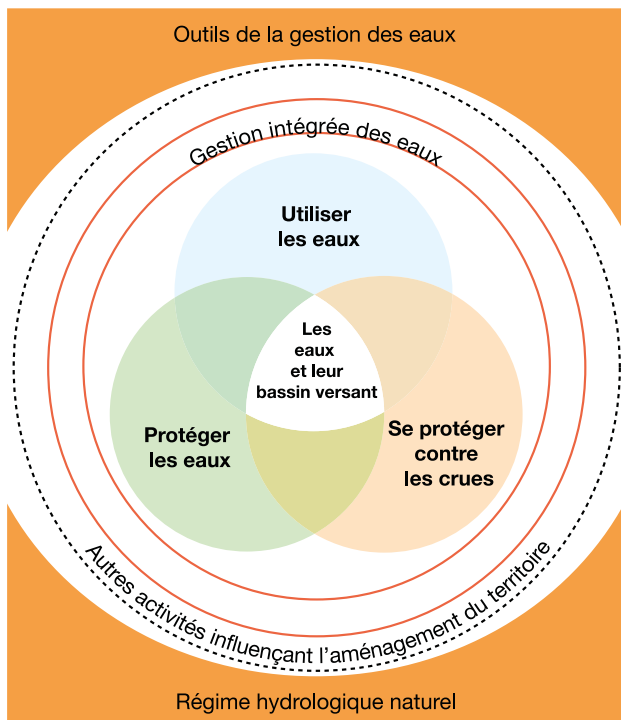


Fig. 9 - Schéma conceptuel de la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau (d'après OFEV 2012).

Néanmoins, bien que reconnu comme tel en Suisse, **le bassin versant n'est pas géré par une structure spécifique et unique**. L'autorité cantonale est responsable de la coordination et de l'exécution des mesures définies par la législation fédérale (OEaux, art. 46) en termes de renaturation des eaux. Elle peut le faire, à l'exemple de l'État de Genève, par l'intermédiaire du Schéma de protection,

d'aménagement et de gestion des eaux (SPAGE), inscrit au plan directeur cantonal (fig. 8).

L'absence de structures de bassin ayant des compétences de gestion des milieux aquatiques à l'échelle du bassin versant, sur le modèle des « Agences de l'eau » ou des « syndicats de rivière » français, rend nécessaire une coordination d'autant plus efficace entre les différents acteurs d'un même territoire par des services cantonaux forts. **Contrairement à la France, où les intercommunalités (syndicats, communautés de communes, etc.) prennent en charge le rôle exécutif par l'intermédiaire d'une maîtrise d'ouvrage d'études et de travaux, ce sont principalement les communes qui possèdent le plus souvent cette compétence.** Celle-ci leur est en effet en grande partie déléguée par le canton, les différents services de ce dernier intervenant en appui. Là encore, la situation est variable d'un canton à l'autre.

À l'échelon supérieur, la Confédération helvétique, à travers l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), est chargée du financement des mesures et actions ainsi que de la législation sur la gestion de l'eau applicable par les cantons. Elle propose par ailleurs à ces derniers une aide à l'exécution pour la renaturation des cours d'eau.

Ainsi, si la mise en œuvre de la DCE en France s'effectue dans le cadre d'une approche systémique au sein des grands bassins hydrographiques (Rhône-Méditerranée ou Loire-Bretagne, par exemple) et appelle à une coopération et une coordination à travers et au-delà des frontières administratives (communales, départementales, etc.), dans le cadre de la législation suisse sur la protection de l'eau (SWGG), la coordination des actions ne s'effectue pas toujours dans le cadre requis de la coopération inter-cantonale (d'après OFEV 2007).

Au niveau français, l'État est garant de l'application et du respect des règles édictées par la LEMA par l'intermédiaire de ses **services déconcentrés** à l'échelle régionale (Direction régionale de l'environnement, de l'agriculture et du logement : DREAL) et départementale (Direction départementale des territoires : DDT). Les six **Agences de l'eau**, établissements publics administratifs de l'État sous la tutelle du ministère chargé de l'Environnement, subventionnent les intercommunalités pour la réalisation de travaux en faveur de l'amélioration de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. Au niveau régional, les politiques de l'eau des différents conseils régionaux varient largement. La Région Rhône-Alpes mène depuis de nombreuses années une politique de financement des opérations de gestion des milieux aquatiques dans le cadre des contrats de rivière, ce qui explique que 95 % de son territoire soit couvert par ce type de procédures.

La France a mis en place un mode de gestion s'appuyant sur deux outils fondamentaux : le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et le Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), institués par la loi sur l'eau de 1992 (fig. 8). Le tableau ci-après propose quelques éléments de comparaison avec le SPAGE, outil développé par le canton de Genève (tab. 1).

1.2.3. Mise en regard des outils français et suisses pour la gestion de l'eau

Les politiques française et suisse de gestion des milieux aquatiques se rapprochent à différents égards, dont l'échelle de gestion globale et cohérente (le bassin versant) et la mise en place d'une gestion différenciée par tronçons. De même, les deux États encouragent la dynamique naturelle des cours d'eau par différentes mesures en faveur de la restauration d'un espace de mobilité.

1.2.3.1. Des outils aux objectifs différents mais en voie de rapprochement

Elles se différencient néanmoins par les outils mis en place et par leurs objectifs. **Les SDAGE et SAGE français mettent en avant la préservation de la qualité des milieux et une gestion équilibrée de la ressource en eau depuis de nombreuses années**, ce qui dénote une volonté de donner la priorité à la protection de l'environnement. Cette volonté fut en revanche moins explicite, jusqu'au début de l'année 2011, dans **l'outil SPAGE, pour lequel les objectifs premiers de gestion des cours d'eau sont clairement orientés à des fins de protection des biens et des personnes contre les crues**.

Début 2011, des modifications apportées aux lois sur la protection des eaux, sur l'aménagement des cours d'eau, sur l'énergie et sur le droit foncier rural sont entrées en vigueur. Ces **nouvelles dispositions fédérales démontrent une volonté d'aménager les cours d'eau en vue de revenir à un niveau proche de l'état naturel** (revitalisations, espace réservé aux eaux). Dans son rapport sur l'environnement, l'OFEV (2011) estime que ces **nouvelles dispositions encouragent la revitalisation des cours d'eau** dans le but de rétablir leurs fonctions naturelles, de renforcer leur rôle social et de réduire les effets négatifs sur l'environnement causés par l'utilisation de la force hydraulique (régime d'éclusées, obstacle à la migration des poissons et perturbation du régime de charriage).

Il s'agit ainsi de deux visions qui ne sont pas incompatibles mais qui ont néanmoins longtemps relevé de paradigmes et de problématiques différentes. Elles tendent pourtant à se rapprocher depuis quelques années.

1.2.3.2. Une approche participative historiquement moins développée en Suisse...

Par ailleurs, **la loi française**, fortement liée à la DCE, **impose la consultation du public et de l'ensemble des**

Tab. 1 - Comparatif des principaux outils de gestion en France et en Suisse

	France		Suisse
	SAGE	SDAGE	SPAGE
Loi d'instauration	Loi sur l'eau du 3 janvier 1992	Loi sur l'eau du 3 janvier 1992	Légitimité dans la loi sur les eaux du 5 juillet 1961 et règlement d'exécution du 15 mars 2006
Objectifs	Utilisation, mise en valeur, protection qualitative et quantitative de la ressource en eau	Gestion équilibrée de la ressource en eau avec développement économique et respect de l'environnement, objectifs de la DCE	Protection des eaux et de leurs rives contre toute atteinte nuisible à leurs fonctions et en vue de la protection des personnes et des biens contre les risques de crue
Phases / Déroulement	État des lieux-diagnostic, tendances et scénarios, choix stratégiques, produits du SAGE et validation finale, arrêté préfectoral	Consultation du public, des acteurs et des Assemblées, caractérisation et définition du programme de mesures, examen, approbation, arrêté préfectoral	Diagnostic, plan d'action, mise en œuvre, suivi
Date du 1 ^{er} outil mis en place	1997 - SAGE Drôme	1996-2009 - SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse	Adoption en Conseil d'État le 24 mars 2010 du SPAGE du BV Aire-Drize (canton de Genève)
Initiative	Locale (collectivités territoriales, élus locaux)	Obligatoire sur chacun des 6 bassins hydrographiques	Collaboration avec tous les services concernés
Gestionnaire	Commission locale de l'eau (CLE)	Comité de Bassin (40 % d'élus, 40 % d'usagers de l'eau, 20 % de représentants de l'État)	Canton / Service de la planification de l'eau (SPDE)
Unité de référence	« Échelle locale cohérente » - bassin versant	Grand bassin hydrographique	Bassin versant, échelle locale
Portée juridique	Opposable au tiers (arrêté préfectoral)	Opposable à l'administration (État, collectivités territoriales, établissements publics) et non aux tiers	Aucune (prise en compte dans les plans cantonaux)
Durée	Révision tous les 10 ans	Révision tous les 6 ans	Révision tous les 6 ans

acteurs du territoire lors de l'élaboration du SDAGE et des SAGE à travers les Comités de bassin et les Commissions locales de l'eau (CLE), composés d'élus, d'usagers de l'eau (agriculteurs, industriels, particuliers, etc.) et de représentants de l'État. **La politique de gestion des milieux aquatiques était ainsi davantage participative du côté français que du côté suisse qui donnait davantage de prérogatives à la Confédération et aux services cantonaux.**

De son côté, en effet, la Confédération helvétique n'imposait aucune démarche participative. Encouragée ces dernières années par un taux de subventionnement supplémentaire, la gestion participative se développe aujourd'hui en Suisse avec l'instauration de la nouvelle politique fédérale de subventionnement pour la revitalisation des eaux. Celle-ci **impose désormais une approche participative dans tout projet de revitalisation.**

1.2.3.3. ... mais des cours d'eau mieux pris en compte par les outils d'aménagement du territoire

L'un des grands avantages de la politique de gestion suisse est l'intégration de la dimension « cours d'eau et milieux aquatiques » dans sa politique d'aménagement du territoire, au moyen d'outils plus larges et complémentaires au SPAGE, et qui tiennent compte de la protection de la nature et du paysage autant que des besoins de la collectivité et de l'économie.

La Confédération fixe les principes généraux pour les autorités cantonales. Celles-ci doivent définir l'espace réservé aux eaux sur l'ensemble de leurs cours d'eau pour les inscrire dans :

- le **plan directeur cantonal**, instrument central de planification de l'aménagement du territoire, qui propose une gestion locale ;
- les **plans d'affectation communaux** (équivalents des Plans locaux d'urbanisme français : PLU) qui fixent les utilisations admissibles du sol et garantissent un espace réservé aux eaux à l'échelle parcellaire (fig. 8).

La revitalisation des cours d'eau constitue un enjeu fort de la politique suisse. Cette préoccupation se traduit par la réalisation de planifications cantonales de revitalisation qui priorisent et définissent globalement les actions de restauration sur une période de 20 ans (mise à jour tous les 12 ans), ceci sur une durée totale de 80 ans. Une procédure clairement établie garantit que les revitalisations seront faites là où elles auront le plus d'effets.

La Suisse se distingue ainsi largement de la France qui peine à intégrer efficacement ces aspects dans ses outils d'aménagement du territoire tels que les Schémas de cohérence territoriale (SCOT).

1.2.4. Deux priorités : restauration des milieux aquatiques et espace de bon fonctionnement des cours d'eau

À l'état naturel, l'hydrosystème est composé d'une mosaïque de milieux abritant une grande diversité animale et végétale. Or, des milieux aquatiques fonctionnels et proches de cet état naturel rendent des services importants à la société, que ce soit en matière de lutte contre les inondations (rôle tampon lors de crue), d'épuration des eaux par filtration, de conservation de la biodiversité ou encore d'attractivité paysagère.

Le préalable indispensable au bon fonctionnement des cours d'eau est le maintien ou la restauration d'un transport solide suffisant. Pour cela, la présence de zones d'alimentation sur les versants et de terrains érodables permettant la remobilisation de la charge solide stockée dans le lit majeur doit être préservée. Ainsi, « *pour garantir l'équilibre géodynamique des cours d'eau à dynamique active, éviter leur incision et préserver ainsi les divers usages qui leur sont associés, [...] il est nécessaire d'accepter que les rivières érodent régulièrement une partie de leur lit majeur* » (Malavoi et al. 2011).

En France comme en Suisse, ce principe est de mieux en mieux assimilé dans les politiques publiques. Ainsi, **la restauration des cours d'eau et le maintien d'un espace de mobilité** (également appelé espace de bon fonctionnement ou encore espace de liberté) **constituent aujourd'hui des axes forts de la politique de l'eau des deux pays.**

À titre d'exemple, **la loi française offre la possibilité d'instituer une servitude d'utilité publique** en vue de « *créer ou restaurer des zones de mobilité du lit mineur d'un cours d'eau [...] afin de préserver ou de restaurer ses caractères hydrologiques et géomorphologiques essentiels* » (loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages ; art. L. 211-12 du Code de l'environnement). Cet article prévoit ainsi la préservation de certains secteurs contre la protection et la fixation du lit mineur, mais aussi la suppression de protections ou de points durs existants. Le principe de préservation et de restauration de l'espace de mobilité est également affirmé de manière forte dans les différents SDAGE (à l'exemple de l'orientation fondamentale n°6A-01 du SDAGE Rhône-Méditerranée).

Le décret n°2002-202 du 13 février 2002 signale par ailleurs que **les protections de berge ne doivent pas réduire de manière significative l'espace de mobilité des cours d'eau.** Celui-ci est défini par la loi française comme « *l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le lit mineur peut se déplacer* » (arrêté du 24 janvier 2001). Les exploitations de carrières de granulats y sont interdites.

En Suisse, les mesures agro-environnementales imposent aux **exploitations agricoles riveraines de consacrer l'équivalent de 7 % de leur surface agricole utile à des surfaces de compensation écologique (SCE).** Celles-ci sont notamment des milieux naturels ou semi-

naturels exploités de manière extensive (prairies et pâturages extensifs, haies, etc.). **L'espace réservé aux eaux défini par les cantons pourra être exploité uniquement comme surface de compensation écologique** de type prairie extensive, surface à litière, pâturage extensif, pâturage boisé, haie, bosquet champêtre ou berge boisée. De plus, l'ordonnance sur les zones alluviales d'importance nationale de 1992 charge les cantons de protéger les zones alluviales, de conserver, voire de rétablir leur dynamique naturelle, et d'accorder les usages avec les objectifs de protection. Près de 23 000 ha de zones alluviales sont ainsi concernés.

De chaque côté de la frontière, les structures ou autorités locales chargées de la gestion des milieux aquatiques sont incitées à mener des opérations de revitalisation (ou de « restauration ») des cours d'eau perturbés par les aménagements successifs (endiguement, chenalisation, protection de berge, etc.) et les diverses activités humaines (extraction de granulats, loisirs, etc.). **Les politiques de gestion incitent également les structures à laisser le cours d'eau éroder ses berges dans la limite de l'acceptable** afin de lui permettre de mobiliser au mieux les matériaux stockés sur les berges et de reconstituer une alternance de milieux hétérogènes (radier, mouilles, bancs alluviaux, etc.). On peut alors parler de « **non-intervention** ».

Les opérations visant le blocage de la dynamique latérale du cours d'eau par l'intermédiaire d'ouvrages de protection de berge sont, par conséquent, à proscrire lorsqu'aucun enjeu humain ne se trouve menacé par l'érosion.

1.2.5. Le génie végétal au sein des politiques publiques

La position des partenaires techniques et financiers français en matière de protection de berges a évolué depuis plusieurs années. Ainsi, si **les Agences de l'eau** ont financé des ouvrages de protection au cours des dernières décennies, que ce soit en génie civil dans un premier temps, ou en génie végétal dans un second temps, elles **ne s'engagent plus aujourd'hui financièrement sur des chantiers concernant la protection des berges face à l'érosion**. Néanmoins, elles participent indirectement à cette mission en subventionnant les opérations de restauration hydromorphologique qui intègrent souvent des techniques de génie végétal. Les projets d'aménagement de protection en génie civil, quant à eux, ne bénéficient plus d'aucune subvention.

Les partenaires techniques et financiers français mènent, à l'instar de la Région Rhône-Alpes, une **politique de non-intervention en matière de protection de berges et mettent en avant le maintien et/ou la création d'un espace de mobilité des cours d'eau**. Le SDAGE Rhône-Méditerranée préconise néanmoins des mesures de protection contre l'érosion latérale lorsque celles-ci sont justifiées par la protection des populations et des ouvrages existants. Il stipule également que « *lorsque la protection*

est justifiée, des solutions d'aménagement les plus intégrées possible sont recherchées en utilisant notamment les techniques du génie écologique » (SDAGE RM 2009).

Le point de vue de **la législation suisse diffère** par certains aspects, même si la tendance générale s'oriente également **vers la renaturation voire la revitalisation** des cours d'eau. Si l'objectif prioritaire de la loi sur l'aménagement des cours d'eau (LACE) est la protection des biens et des personnes contre les crues (art. 1), cette même loi ne recommande pas d'intervention systématique. En effet, face à tout problème engendré par les crues, elle préconise prioritairement des mesures relevant de l'entretien ou de la planification territoriale. Si ces deux types de mesures ne peuvent donner satisfaction, il est alors possible de mettre en œuvre des mesures structurelles relevant de l'aménagement. Cette priorisation permet ainsi de minimiser les impacts physiques sur le cours d'eau.

Par ailleurs, lors de toute intervention sur un cours d'eau, le tracé naturel doit être respecté voire reconstitué, les interactions avec la nappe phréatique ne doivent pas être perturbées, et les conditions doivent être offertes pour favoriser le développement d'une flore et d'une faune typiques et diversifiées (LEaux, art. 37 ; LACE, art. 4). Or, même s'il n'est pas cité, le génie végétal contribue dans une large mesure à satisfaire à ces conditions lors d'interventions physiques.

Cependant, les techniques en génie civil peuvent être utilisées dans des contextes très précis (sécurisation des agglomérations et voies de communication) et subventionnées en partie par la Confédération. Le rapport explicatif se rapportant à l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) indique que des « *mesures pour empêcher l'érosion naturelle de la berge du cours d'eau ne sont admissibles dans l'espace réservé aux eaux que si elles sont indispensables pour assurer la protection contre les crues ou empêcher une perte disproportionnée de surface agricole utile* ». Ce dernier point constitue une divergence légale entre les politiques suisse et française.

Certains cantons ont tout particulièrement cherché, ces dernières années, à favoriser les techniques en génie végétal en raison de leur sensibilité écologique. Les cantons de Genève, Zurich ou Berne, par exemple, ont été les pionniers dans l'utilisation de ces techniques pour la renaturation de cours d'eau de plaine.

En France, l'utilisation de techniques de génie végétal pour la protection des berges n'est pas soumise à autorisation ou à déclaration. En effet, la rubrique 3.1.4.0 de la nomenclature « Loi sur l'eau » exclut les techniques exclusivement végétales. Les ouvrages de protection de berge faisant appel aux techniques de génie civil ou aux techniques mixtes, ainsi que les digues de protection contre les inondations, sont quant à eux soumis à autorisation ou déclaration depuis les modifications de la nomenclature « Loi sur l'eau » de 2002 (arrêté du 13 février 2002, art. 6). Il s'agit d'une évolution cruciale de la loi qui impose notamment, pour tout projet concerné, une étude d'impact ou d'incidence, avec définition de mesures compensatoires. Cette évolution favorise ainsi l'utilisation de techniques végétales.

Le génie végétal est considéré par les politiques publiques française et suisse comme un outil à part entière pour la restauration et la renaturation des cours d'eau, mais ne constitue pas une fin en soi.

Les politiques publiques restent ainsi vigilantes concernant l'utilisation du génie végétal afin qu'il ne constitue pas la justification à des projets d'aménagement qui pourraient avoir un impact négatif sur les milieux et les fonctionnalités écologiques des cours d'eau. Il est donc bel et bien considéré comme une ingénierie au service de la protection et de l'environnement et non comme une simple caution écologique ou un « verdissement ».

Notons enfin que d'autres pans des législations européenne, française et suisse encadrent la mise en œuvre du génie végétal, comme, par exemple, les réglementations sur la production et la commercialisation des graines, semences, plants ou parties de plants (chap. III.3.2.3), le statut de protection des espèces, les installations de chantiers, les possibilités de défrichage et d'intervention dans le lit mineur, etc. Autant de réglementations qui peuvent influencer sur le développement du génie végétal, en montagne notamment.

2. Fonctionnement des cours d'eau de montagne

Avant de s'intéresser aux raisons qui permettent de décider de la mise en œuvre d'un chantier de protection de berge et aux techniques de génie végétal, à leurs avantages et inconvénients, il convient d'aborder les spécificités du fonctionnement d'un cours d'eau de montagne. Ce chapitre est destiné à définir le cadre d'intervention des structures de gestion de cours d'eau de montagne ainsi que les différents concepts scientifiques sur lesquels s'appuyer pour comprendre le fonctionnement du cours d'eau dans sa globalité et décider de l'opportunité du recours à une protection de berge.

2.1. Principes de fonctionnement

2.1.1. L'équilibre morphologique

Une des principales caractéristiques de la rivière est d'assurer le transfert des sédiments (sables, graviers, galets, etc.) vers l'aval. Selon les cours d'eau, la quantité de sédiments transportée se compte généralement en dizaines de milliers de tonnes par an. Pour cela, la rivière dispose de deux principales sources d'énergie : la gravité liée à la pente du fond de vallée et les débits en période de crue.

Plus la pente est forte et les débits élevés, plus la rivière est capable de déplacer de grandes quantités de matériaux. On quantifie cette énergie disponible par la puissance hydraulique, qui est le produit de la pente de la ligne d'eau, du débit et du poids volumique de l'eau. Afin de pouvoir comparer des rivières de différentes tailles, on rapporte cette puissance à la largeur du lit et on obtient la puissance spécifique.

La fourniture sédimentaire et les débits ne sont pas constants dans le temps. Ils fluctuent en fonction des variations climatiques (saisonniers à séculaires) et des modifications de l'occupation du sol qui affectent le bassin versant. Le lit de la rivière s'ajuste donc continuellement pour maintenir une capacité de transport en adéquation avec la charge sédimentaire charriée par les eaux. C'est la raison principale de la grande mobilité des lits fluviaux.

Cette mobilité se manifeste concrètement par des berges qui reculent, des chenaux qui changent de position, des bancs qui se forment et qui disparaissent... Sans cette « respiration » des formes fluviales, la rivière ne peut trouver son état d'équilibre dans lequel les processus d'érosion et de dépôt se compensent, et les sédiments sont

transportés vers l'aval. On parle d'équilibre lorsque les paramètres qui définissent la morphologie du lit (pente, largeur et profondeur à pleins bords, tracé et sinuosité) restent relativement stables dans le temps.

Il arrive parfois que l'équilibre soit rompu et que la géométrie du lit se transforme durablement sous l'effet d'une dérive des variables de contrôle comme les modifications des régimes de crue ou des quantités de sédiments disponibles, appelées forçages hydrologiques et détritiques. Les mécanismes qui gouvernent ces ajustements ont été conceptualisés au début du 20^e siècle par Gilbert (1914) et Mackin (1948), puis représentés schématiquement sous forme d'une balance par Borland et Lane quelques années plus tard (fig. 1). Cette illustration offre la possibilité de prédire qualitativement les réponses morphologiques susceptibles de se produire lorsque les débits liquides et/ou la charge sédimentaire changent. Elle permet aussi de prédire quels seront les mécanismes du retour à l'équilibre.

Les **variables de contrôle** sont imposées au cours d'eau par le climat, le relief, la géologie et l'occupation du sol et sont soumises à de fortes variabilités dans l'espace et dans le temps. Il s'agit d'une part des caractéristiques hydrologiques donc le **débit liquide** conditionné entre autres par le taux de **boisement** du bassin versant et, d'autre part, du **débit solide**, conditionné par les conditions d'érosion du bassin versant, l'état des réserves sédimentaires dans les lits et la nature des berges du cours d'eau.

L'ensemble de ces variables influent sur les caractéristiques des cours d'eau et, par conséquent, sur des variables de réponse (ou d'ajustement) qui s'ajustent en permanence aux débits liquide et solide : géométrie du lit, tracé en plan, taille des matériaux.

Ainsi, lorsque la capacité de transport devient excédentaire par rapport à la charge à transporter, le lit s'incise, ce qui a pour effet de réduire la pente et donc de réduire la capacité de transport du cours d'eau. D'autre part, des processus de tri granulométrique vont progressivement augmenter la dissipation d'énergie et diminuer ainsi la capacité de transport. L'enfoncement du lit s'effectue principalement par évacuation des matériaux de petit diamètre, ce qui conduit à la formation d'une couche grossière de surface, appelée pavage. La rugosité de surface s'en trouve augmentée, ainsi que la résistance du lit à l'érosion.

Inversement, lorsque la capacité de transport devient déficitaire par rapport à la charge sédimentaire, le lit s'exhausse, la pente augmente et le tri granulométrique contribue à diminuer la taille des grains en surface.

Cette approche reste néanmoins limitée en matière de prédiction quantitative de l'ajustement morphologique, car elle ne donne pas de formulation mathématique de la relation entre débit liquide, débit solide, pente et taille des grains. Il est toutefois théoriquement possible de combiner une loi de résistance à l'écoulement et une loi de transport solide afin de modéliser la pente d'équilibre (Wilcock *et al.* 2009), mais ce type d'approche reste encore du domaine de la recherche (Ferro et Porto 2011).

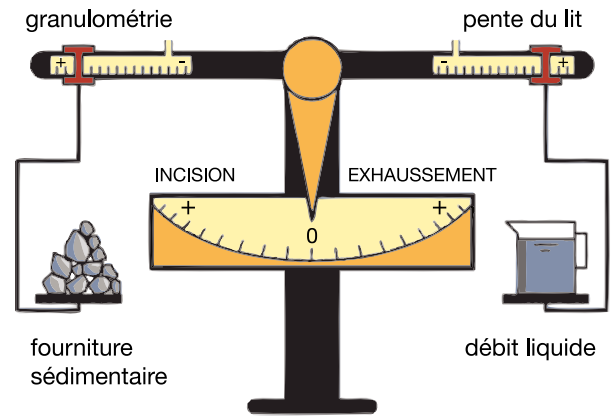


Fig. 1 - La balance de Lane-Borland (1960) illustrant le concept d'équilibre morphologique (Gilbert 1914 ; Mackin 1948 ; Lane 1955).

La balance de Lane-Borland ne s'intéresse qu'à la pente d'équilibre (s) et à la granulométrie du lit (D_{50} ou diamètre médian). Or, la morphologie d'une rivière possède bien d'autres variables d'ajustement, dont les principales sont la largeur et la profondeur à pleins bords (notées respectivement w_b et d_b), la sinuosité du tracé en plan (λ), ainsi que la rugosité du lit (n). Ces variables s'ajustent également aux modifications des forçages hydrologiques et détritiques. La synthèse des observations empiriques a conduit à proposer d'autres modèles conceptuels qui intègrent toutes les dimensions de la morphologie fluviale. Il s'agit du modèle de Schumm (1971), qui peut s'écrire ainsi :

$$Q \approx \frac{w_b d_b D_{72} n \lambda}{s} \quad Q_s \approx \frac{w_b s}{d_b D_{72} n \lambda}$$

avec Q , le débit liquide, et Q_s , le débit solide.

Ces relations expriment les tendances d'évolution des variables d'ajustement en réponse à une augmentation ou à une diminution des débits liquide et solide. Par exemple, dans le cas d'une diminution du débit solide, les variables placées au numérateur (largeur à pleins bords et pente) vont décroître, tandis que celles placées au dénominateur vont augmenter (profondeur à pleins bords, sinuosité, granulométrie, rugosité de surface).

Toutes ces relations ne donnent qu'une image partielle de la complexité des interactions qui gouvernent les hydro-systèmes fluviaux. Elles ne prennent pas en compte l'influence de la végétation sur la morphologie fluviale. Or, celle-ci joue un rôle primordial, notamment par le renforcement de la résistance des berges à l'érosion, par l'augmentation de la résistance à l'écoulement et par la fourniture de débris végétaux qui peuvent jouer un rôle morphologique majeur, notamment en matière de stockage sédimentaire : de par la création d'embâcles (piégeage de débris végétaux par la végétation en place : bois mort de toutes tailles, feuillages, etc.), les sédiments sont piégés à leur tour et s'accumulent.

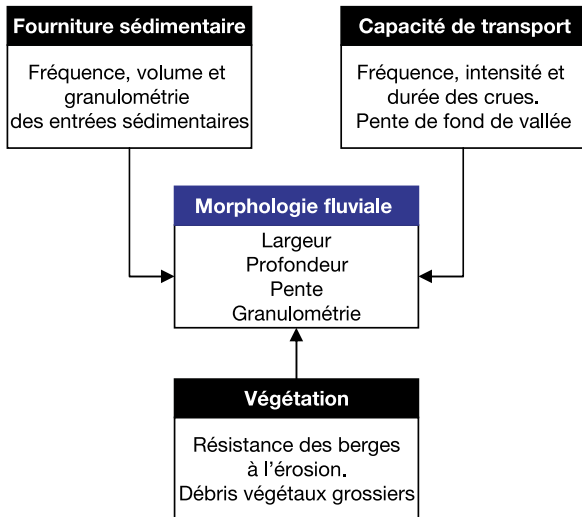


Fig. 2 - Les variables de contrôle de la morphologie fluviale aux échelles de temps pluri-décennales (Montgomery et Buffington 1998).

Certains auteurs proposent d'intégrer la végétation comme une variable de contrôle de la morphologie au même titre que les forçages hydrologiques et détritiques (Montgomery et Buffington 1998 – fig. 2).

2.1.2. Fluctuations verticales du lit

Une attention particulière doit être portée aux fluctuations verticales des lits fluviaux, notamment lorsqu'il s'agit d'implanter des ouvrages de protection de berge. Ces fluctuations peuvent provoquer la ruine de l'ouvrage par déchaussement, et inversement, la stabilisation des berges peut dans certains cas amplifier une tendance lourde à l'enfoncement du lit par diminution de la fourniture sédimentaire. L'érosion des berges participe en effet à la recharge sédimentaire des lits et donc à l'équilibre morphologique du système.

On distingue deux grands types de fluctuations verticales en fonction des échelles de temps auxquelles elles se produisent. Les fluctuations sur des pas de temps courts, typiquement à l'échelle de la crue ou de la saison, sont gouvernées par des déséquilibres provisoires du transport solide. On parle parfois de respiration du lit, ce dernier passant par des phases courtes de stockage et déstockage, qui se compensent mutuellement (fig. 3). Dans les rivières de montagne, toujours proches des sources sédimentaires (érosion des versants), cette respiration traduit l'irrégularité de l'alimentation solide depuis les versants. Il faut donc imaginer la propagation de petites vagues sédimentaires depuis l'amont, dont le passage en une section donnée se traduit par un cycle dépôt-reprise. Le lit va s'engraver lorsque la vague se dépose, puis se creuser lorsque ces matériaux vont transiter vers l'aval. Ces phénomènes se retrouvent plus en aval lors de la migration de macroformes sédimentaires (vague de plus grande ampleur). Ils traduisent également le caractère très discontinu du charriage, les particules étant généralement déplacées sur des distances relativement courtes (typiquement quelques centaines de mètres pendant un épisode de crue).

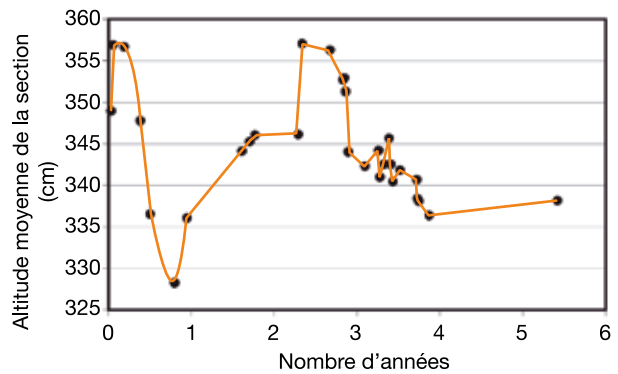


Fig. 3 - Exemple de respiration du lit mesurée sur un petit torrent du Diois (la Barnavette), entre 1997 et 2002, au droit d'une section en travers sur un tronçon divaguant (Liébault 2003).

Des fluctuations verticales peuvent aussi se produire sur des pas de temps longs (décennaux voire séculaires). Dans ce cas, elles traduisent les modifications du régime sédimentaire du bassin versant, défini comme le différentiel entre les entrées et les sorties solides. Lorsque le régime est en équilibre, les fluctuations se compensent et l'altitude moyenne du lit reste stable. Lorsque le régime est excédentaire (entrées > sorties), le lit s'engrave de manière durable. On parlera alors d'exhaussement. Ceci se traduit souvent par une expansion latérale de la bande active et

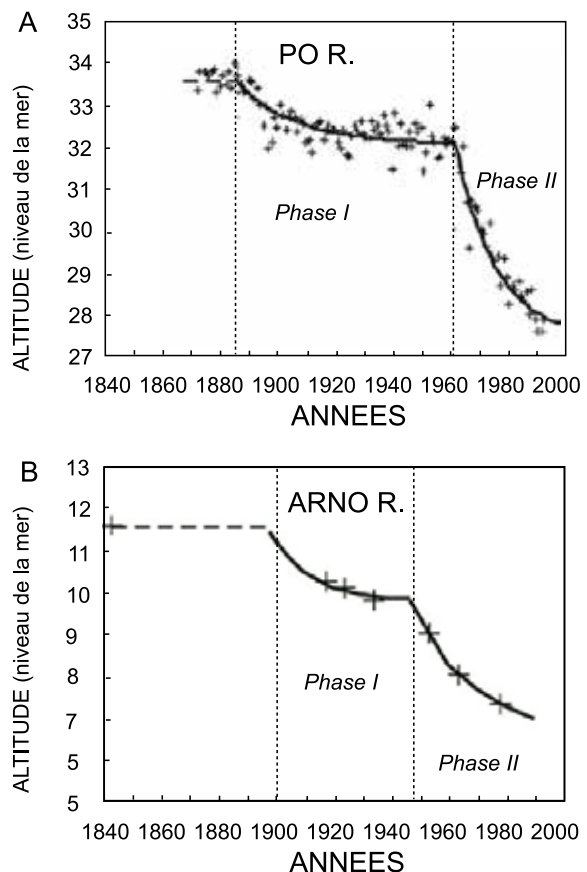


Fig. 4 - Incision du lit sous l'effet du reboisement (phase I) et des extractions de graviers (phase II) pour le Po et l'Arno en Italie (Surian et Rinaldi 2003).

par l'amplification du tressage. Inversement, lorsque le régime est déficitaire (entrées < sorties), le lit s'enfoncé et on parle d'incision. Ces tendances s'analysent à partir de données historiques (anciens levés topographiques) et elles permettent de replacer l'état actuel dans la trajectoire morphologique du système (fig. 4). Sur l'exemple en figure 4, le Po et l'Arno, aux altitudes considérées, ne sont pas des cours d'eau de montagne, mais des rivières de piémont. Néanmoins, les trajectoires présentées sont ici influencées par l'évolution de la production sédimentaire des têtes de bassin.

Dans les Alpes françaises, la grande majorité des rivières présentent des régimes déficitaires dus aux extractions de graviers massives des années 1970 et 1980 et de la reconquête forestière planifiée (travaux RTM : restauration des terrains en montagne, etc.) et spontanée des versants (Bravard 1991 ; Liébault *et al.* 2005). Ceci se traduit par une incision accélérée, qui peut atteindre près de 10 mètres à l'échelle du siècle en valeur maximum (Peiry *et al.* 1994).

2.1.3. Typologie des rivières de montagne

La diversité des paysages torrentiels est grande et témoigne de la complexité des processus naturels qui gouvernent la morphologie des rivières de montagne. Certains torrents prennent l'allure de grandes plaines de graviers arides au sein desquelles serpente un mince filet d'eau. Pour d'autres, l'eau jaillit entre de gros rochers en formant des successions de petites cascades et de piscines naturelles. Malgré leur complexité, il est possible de distinguer quelques règles dans l'organisation spatiale des paysages torrentiels. La plus évidente est celle qui consiste à ordonner

les formes de l'amont vers l'aval en fonction des processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments (Montgomery et Buffington 1997 – fig. 5).

La zone de production, située à l'amont, a pour caractéristique principale de produire les sédiments que la rivière utilise pour bâtir son lit et façonner sa plaine alluviale. Elle regroupe l'ensemble des ravins et des têtes de bassin qui fonctionnent un peu à l'image des condensateurs électriques : ils accumulent de l'énergie sur de longues périodes sous forme d'apports sédimentaires depuis les versants, puis ils se purgent brutalement lors d'épisodes pluvieux suffisamment intenses pour déclencher des coulées de débris. Lorsque ces chenaux sont en phase d'accumulation, leur lit est encombré de débris de toutes tailles qui forment un ensemble d'allure chaotique. Après le passage des coulées se forme un lit en U décapé qui laisse souvent apparaître la roche-mère dans le fond du lit. Ce sont les lits rocheux (fig. 6). Ces formes sont typiques des branches les plus reculées du réseau hydrographique.

En aval de la zone de production, se trouve la zone de transport. C'est ici que se forment la majorité des lits à blocs, souvent organisés en alternances plus ou moins régulières de marches et de fosses de surcreusement (fig. 7a). Ce sont les step-pool (littéralement « marche-cuvette », que l'on peut traduire par « lit en marche d'escalier »), forme emblématique des petites rivières de montagne. La présence de blocs et de gros cailloux en surface confère au lit un aspect chaotique et génère un écoulement très turbulent. Cette forte rugosité du lit entraîne d'importantes déperditions d'énergie, ce qui conduit à les interpréter comme des formes de cours d'eau ajustées à de très fortes capacités de transport solide, bien supérieures à la fourniture sédimentaire réelle. Autrement dit, la puissance de la rivière (liée au produit de la pente et du débit)

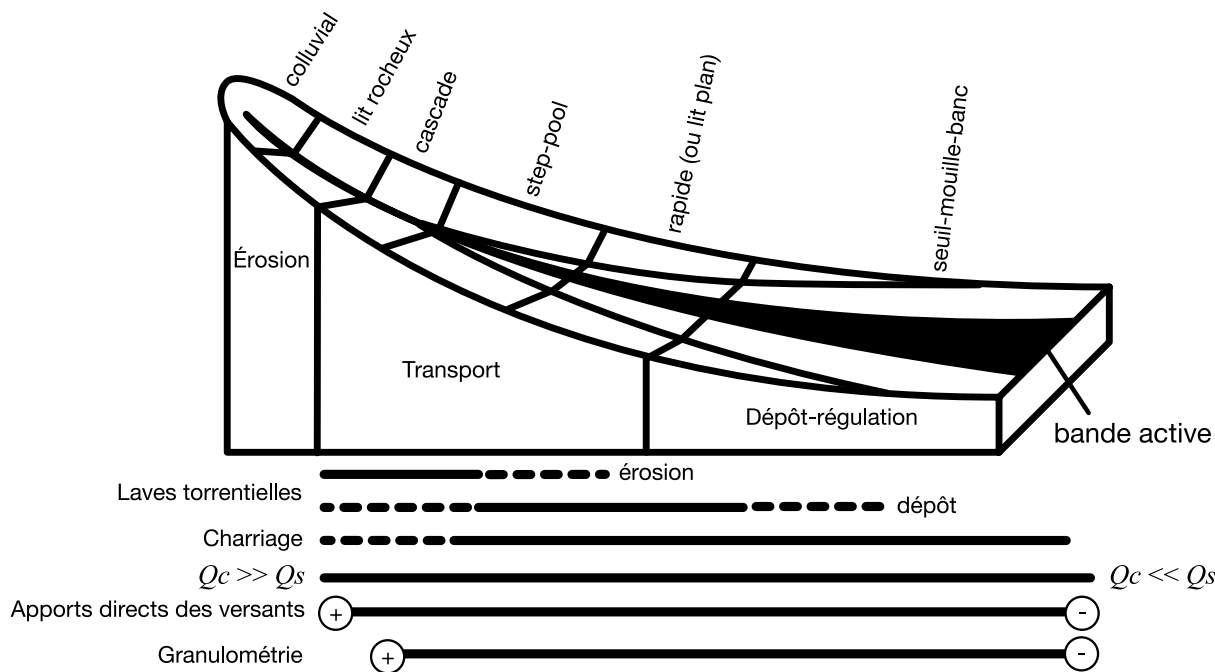


Fig. 5 - Continuum des types morphologiques (adapté de Montgomery et Buffington 1997) ; Q_c : capacité de transport ; Q_s : charge sédimentaire.

étant supérieure à la charge sédimentaire à transporter, la morphologie s'ajuste de façon à consommer la puissance excédentaire en augmentant la résistance à l'écoulement.

En progressant leur parcours vers l'aval, les matériaux arrivent progressivement à la zone de dépôt, où les pentes sont plus faibles mais où les surfaces drainées augmentent. La situation s'inverse et, cette fois-ci, la puissance du cours d'eau est insuffisante pour mobiliser toute la charge sédimentaire qui provient de l'amont. Ceci se traduit par la formation de stocks sédimentaires dans les lits et par l'apparition de styles morphologiques spécifiques. Ce sont les bancs alternes et les lits en tresses, qui se forment par élargissement du lit et démultiplication des chenaux en eau dans de grandes plaines de graviers mobiles (fig. 7b). Ces paysages se forment par accumulations successives de vagues sédimentaires en provenance de l'amont et sont typiques des zones de piémont.

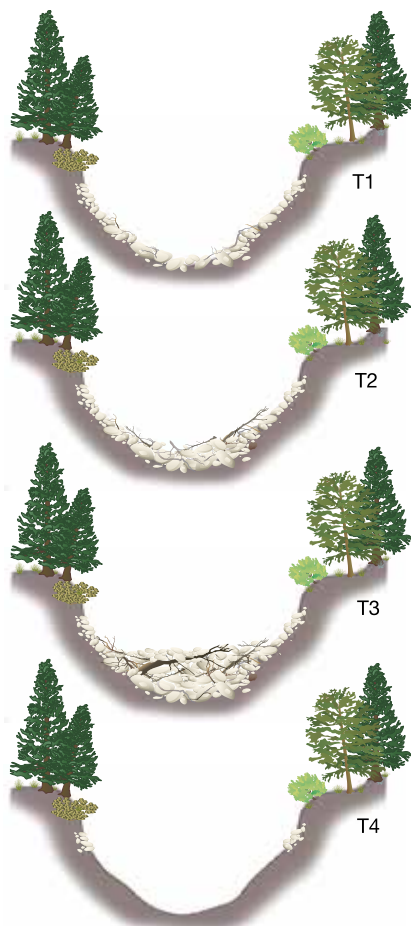


Fig. 6 - La morphologie des ravins situés en tête de bassin est fortement contrôlée par les apports sédimentaires en provenance des versants ; de longues phases d'accumulations sédimentaires se succèdent avec des phases rapides de vidange brutale sous forme de coulées de débris (T4 - d'après Jakob *et al.* 2005).

2.1.4. Liens entre blocage des berges et dynamique du transport solide

2.1.4.1. Influence des berges sur l'équilibre morphologique du cours d'eau

L'érosion des berges participe à la recharge sédimentaire du lit et donc à son équilibre morphologique (fig. 8). La migration des méandres offre une illustration de ce mécanisme. Le méandre se déplace par érosion de la berge concave, qui alimente un banc de convexité en aval par le dépôt de matériaux et contribue ainsi à construire la plaine alluviale (fig. 9). Une étude récente du bilan sédimentaire d'une rivière alpine en Italie a montré que la recharge sédimentaire en provenance des berges, estimée à partir de photos aériennes et de données LiDAR, pouvait représenter jusqu'à 100 000 m³/an, soit 10 à 20 fois plus que les entrées solides en amont du tronçon étudié (Surian et Cisotto 2007). Une méthodologie similaire a été utilisée sur le Bès, un affluent de la Bléone (Alpes-de-Haute-Provence - France) qui présente un lit en tresses particulièrement bien préservé. L'étude a montré une recharge nette par érosion de berge de l'ordre de 65 000 m³ pour la période 2000-2008, période pendant laquelle les extrêmes hydrologiques n'ont pas dépassé la valeur de période de retour biennale (Genin 2009 - fig. 10).

La télédétection par mesure LiDAR, acronyme de l'expression anglaise « Light Detection And Ranging », désigne une technique de mesure optique fondée sur l'émission et la réception d'ondes laser. Elle permet d'obtenir des modèles numériques de terrain de haute résolution sur de vastes étendues spatiales. Elle offre aussi la possibilité de restituer la topographie sous le couvert forestier.

La stabilisation massive des berges peut provoquer un déficit sédimentaire et aggraver une tendance à l'incision du lit (Bravard *et al.* 1999). Tout projet d'implantation de protection de berge doit donc étudier avec soin l'évolution historique du cours d'eau afin de caractériser précisément son régime sédimentaire. Une étude récente réalisée sur les rivières en tresses du bassin Rhône-Méditerranéenne a montré un lien statistique entre l'évolution altimétrique séculaire des tresses, étudiée à partir des anciens profils en long, et le linéaire de berges érodables (Liébault *et al.* 2010). Les berges sont différenciées selon deux modalités (berges érodables et berges stables). Sont considérées comme stables, les berges protégées par des aménagements (digues, enrochements) ou en contact direct avec les versants rocheux. Le linéaire de berge ne répondant pas aux critères de stabilité est considéré comme érodable. Les tresses qui maintiennent un régime sédimentaire en équilibre ou excédentaire sont celles sur lesquelles le potentiel de divagation latérale a été le mieux préservé.

Dans le cas des méandres mobiles, l'érosion des berges est le principal moteur de la dynamique morphologique du système. La stabilisation d'un recul de berge peut avoir des répercussions majeures à l'échelle du tronçon fonctionnel. Ainsi, le blocage de la migration d'un méandre peut provoquer une accélération de l'érosion de berge sur le méandre en aval sous l'effet d'une augmentation locale de la capacité érosive de l'écoulement (Larsen et

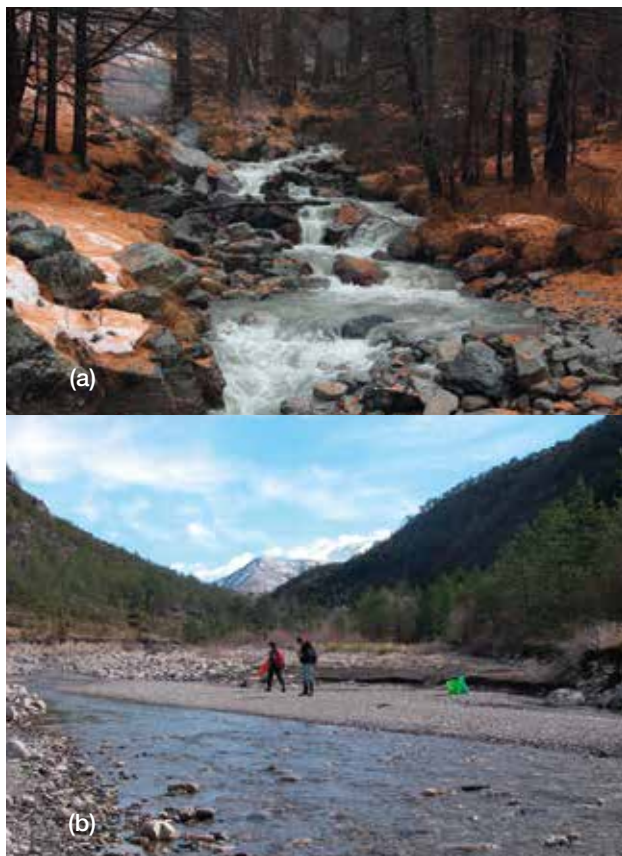


Fig. 7 - (a) exemple de step-pool, morphologie en alternance de marches et de fosses de surcreusement ; **(b)** exemple de lit en seuil-mouille-banc.

Greco 2002). Si les méandres ont tendance à migrer vers l'aval, ceci peut conduire également à l'empilement des méandres en amont par effet de compression mécanique, ce qui augmente le risque de recoupement (Degoutte 2006 ; Malavoi et Bravard 2010).

Il faut enfin souligner que la dynamique morphologique des lits fluviaux est créatrice d'habitats écologiques diversifiés par régénération des annexes fluviales. Elle participe ainsi au bon fonctionnement des écosystèmes de plaine alluviale. La stabilisation des berges peut donc avoir des répercussions sur les communautés vivantes de ces milieux. On peut citer, à titre d'exemple, la réduction des apports en bois mort à la rivière et son impact sur la diversité des habitats aquatiques (Angradi *et al.* 2004).

2.1.4.2. Influence de la végétation des berges sur la section transversale du cours d'eau

Les cours d'eau et les milieux associés sont particulièrement riches en termes de biodiversité. Les différents aménagements qui sont réalisés peuvent avoir des impacts importants sur ce plan (chap. I.2.2 et II.6).

La végétation des berges a une grande influence sur la recharge sédimentaire et sur les profils en long et en plan des cours d'eau. Elle a aussi un impact important sur les



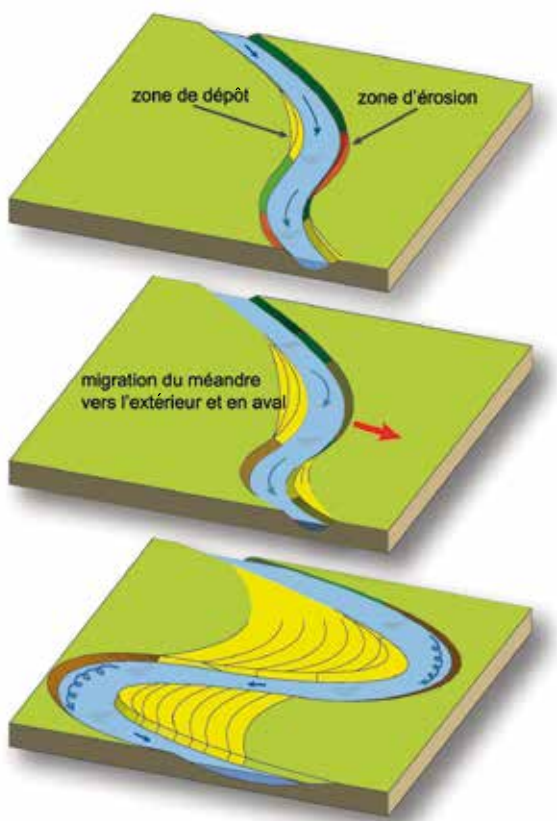
Fig. 8 - Les sapements de berges participent à la recharge sédimentaire des rivières : **(a)** recul d'une berge sableuse sur la Bruche, en Alsace, par remobilisation de la plaine alluviale ; **(b)** recharge sédimentaire par sapement d'une berge caillouteuse sur le Bès, dans la Drôme, par remobilisation d'une terrasse Holocène.

profils transversaux. Comme avec le profil longitudinal, il existe une forte relation entre la forme du profil transversal et la structure des ripisylves. Les conditions hydrauliques vont contraindre les ripisylves *via* des processus d'érosion, de submersion et d'ensevelissement. À son tour, la végétation agit sur la forme du profil transversal :

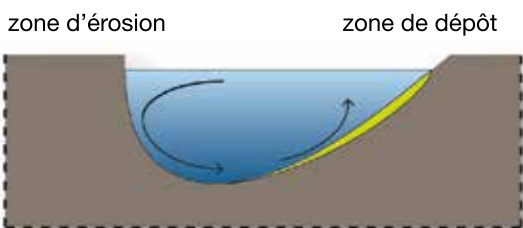
- en ralentissant la vitesse des écoulements à proximité du sol et donc les forces d'arrachement associées ;
- en protégeant le sol grâce à l'ancrage et l'armature fournis par les racines ;
- en modifiant le microclimat et donc les cycles gel-dégel au niveau du sol (Wynn et Mostaghimi 2006).

Le ratio « largeur de plein bord naturelle / profondeur du cours d'eau » est un indicateur de l'activité dynamique d'un cours d'eau. Plus ce rapport est élevé, plus la dynamique d'érosion latérale et la dynamique de transport solide sont importantes. Ce ratio reflète également la cohésion des berges. Plus celle-ci est élevée, plus la largeur du cours d'eau a tendance à être faible et la profondeur importante. Par conséquent, le ratio est faible (Malavoi et Bravard 2010).

Plusieurs études ont montré que les cours d'eau végétalisés présentent un ratio « largeur de plein bord / profondeur » plus faible que les cours d'eau non végétalisés. Dans le cas des rivières à graviers, Millar et Quick (1993) ont établi des rapports entre la géométrie des sections



Le mouvement de l'eau en tire-bouchon provoque l'érosion puis le dépôt des sédiments.



Coupe transversale

Fig. 9 - Mécanisme de déplacement des méandres par sapement de la berge concave et construction de plaine alluviale par dépôt sur la berge convexe.



Fig. 10 - Cartographie de la recharge par sapement de berge sur le Bès (Alpes-de-Haute-Provence - France) entre 2000 et 2008 à partir de la comparaison d'une orthophotographie et d'un levé LiDAR aéroporté (Genin 2009).

transversales de cours d'eau avec et sans végétation sur les berges (tab. 1) qui illustrent l'impact de la végétation sur la tenue des berges. Lorsque les berges sont végétalisées, le lit est moins large et plus profond, et la pente du fond du lit diminue.

Tab. 1 - Géométrie de la rivière en fonction de la végétalisation des berges : cas des rivières stables avec un lit de gravier et des berges cohésives (Millar et Quick 1993 ; Degoutte 2006).

	Berges bien végétalisées	Berges peu végétalisées
Largeur	L	1,6 x L
Profondeur	H	0,7 x H
Pente du fond du lit	i	1,1 x i

Ainsi, en fixant les berges et en empêchant l'érosion latérale, la végétation diminue le ratio « largeur/profondeur ». De même, l'augmentation du tirant d'eau provoque une augmentation de la contrainte au fond du lit et favorise son incision.

La présence de végétation ligneuse diminue les processus d'érosion latérale et modifie le profil transversal en travers de la section. Les berges cohésives ralentissent la dynamique d'érosion latérale des cours d'eau.

Par ailleurs, il a été montré que les berges de cours d'eau végétalisées sont plus raides que les berges non végétalisées. Par conséquent, les végétaux augmentent la résistance au cisaillement de berge et limitent les risques de glissement (Abernethy et Rutherford 1998). Cette capacité à améliorer la résistance au glissement a toutefois des limites : elle peut être remise en cause si le fond du lit s'incise et/ou si les arbres, par leur taille excessive, présentent un port déséquilibré.

Les végétaux influent également sur le profil transversal des cours d'eau en favorisant et en maintenant les plages de dépôts sédimentaires. Par effet de peigne, les racines superficielles et les tiges favorisent les dépôts sédimentaires en ralentissant les vitesses d'écoulement. Les sédiments sont ainsi piégés et protégés de l'érosion hydraulique. Ces dépôts sédimentaires et les débris piégés par les végétaux vont eux-mêmes diminuer la section d'écoulement en encombrant le lit du cours d'eau.

Les végétaux augmentent la rugosité des berges et provoquent une diminution de la vitesse d'écoulement à proximité des berges. La présence de végétaux au sein de la zone d'écoulement lors des crues va aussi diminuer la section transversale et la capacité de transit, ce qui va provoquer une élévation du tirant d'eau. La figure 11 montre la différence de positionnement des isolignes de vitesse sur le profil transversal entre deux sections de cours d'eau, l'une sans végétation et l'autre avec. Les vitesses sont plus faibles à proximité de la berge et plus fortes au centre. Pour un même débit, le tirant d'eau augmente sur un cours d'eau végétalisé.

2.1.5. La notion d'espace de mobilité des cours d'eau

La mobilité latérale des lits fluviaux est aujourd'hui reconnue comme un élément positif qui participe au bon fonctionnement géomorphologique de l'hydrosystème et qui contribue à enrichir la diversité des habitats écologiques. Cette reconnaissance est à l'origine du concept d'**espace de liberté** (on parle aujourd'hui davantage d'**espace de mobilité** ou d'**espace de bon fonctionnement**), qui est un concept de gestion apparu dans l'Allier au début des années 1980 quand il s'est révélé nécessaire de trouver des solutions alternatives pour faire face à l'enfoncement du lit suite aux extractions de graviers (Malavoi et Bravard 2010). Le concept a progressé, puisqu'il est aujourd'hui reconnu juridiquement en France dans plusieurs textes législatifs sous l'appellation « *espace de mobilité* » (chap. I.1.2.4).

L'article 2 de l'arrêté français du 24 janvier 2001 stipule que « [...] l'espace de mobilité est évalué par l'étude d'impact en tenant compte de la connaissance de l'évolution historique du cours d'eau et de la présence des ouvrages et aménagements significatifs, à l'exception des ouvrages et aménagements à caractère provisoire, faisant obstacle à la mobilité du lit mineur. Cette évaluation de l'espace de mobilité est conduite sur un secteur représentatif du fonctionnement géomorphologique du cours d'eau en amont et en aval du site de la carrière, sur une longueur minimale totale de 5 kilomètres ». Le lit mineur est défini dans l'arrêté comme « l'espace d'écoulement des eaux formé d'un chenal unique ou de plusieurs bras et de bancs de sables ou galets, recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement ». **Cette notion recouvre donc clairement celle de bande active des géomorphologues, à savoir l'espace occupé par les chenaux en eau et les bancs de graviers ou de sables non végétalisés.**

Un guide méthodologique publié par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse (AERM&C) est entièrement consacré au problème de la délimitation de cet espace (Malavoi *et al.* 1998). Celui-ci est défini de manière plus précise comme étant « l'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres ». Il intègre donc la bande active du cours d'eau et l'espace du lit majeur (fond de vallée inondé par les crues extrêmes) susceptible d'être érodé par le cours d'eau et accepté socialement comme tel (fig. 12).

L'approche historique qui consiste à reconstituer les tracés successifs du lit et à définir une enveloppe de migration historique (fig. 13) est présentée comme une méthode appropriée de délimitation de l'espace de mobilité fonctionnel. Cette approche doit être couplée à une cartographie précise des enjeux et de leur vulnérabilité. L'espace de mobilité ainsi défini doit ensuite faire l'objet d'une phase de négociation avec les acteurs afin de soustraire d'éventuels enjeux dont la protection semble justifiée.

Principes d'aménagement des cours d'eau - 2. Fonctionnement des cours d'eau de montagne

Les lignes pointillées indiquent le rapport entre la vitesse en un point et la vitesse moyenne.

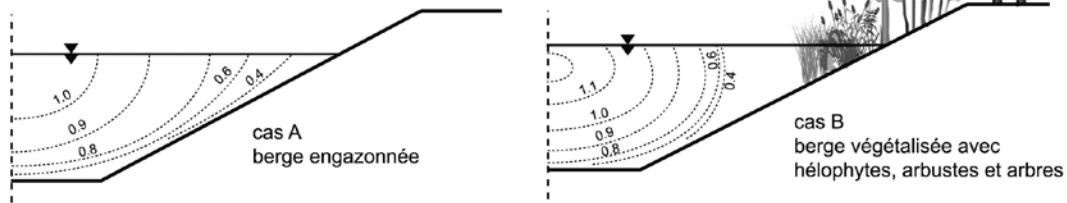


Fig. 11 - Schéma de l'impact de la végétation sur le champ des vitesses dans l'écoulement (d'après BMLFW dans Donat 1995).

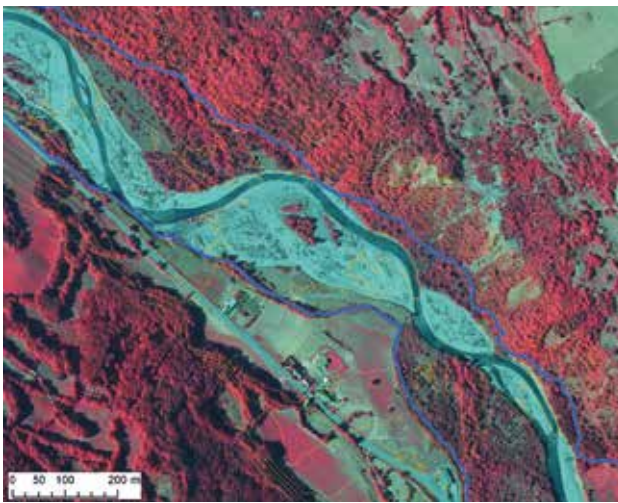


Fig. 12 - Exemple de délimitation de l'espace de liberté sur le Drac (traits bleus). Celui-ci incorpore la bande active (chenaux en eau et bancs de graviers non végétalisés) et la plaine alluviale boisée (fond : BD Ortho infra-rouge couleur de l'IGN - 2009).

Une revue bibliographique récente des pratiques en matière de délimitation de l'espace de mobilité (Piégay *et al.* 2005) recommande l'imbrication d'échelles spatiales comme approche pertinente pour la définition des objectifs de gestion en matière de préservation et de restauration de cet espace. Une revue des outils mobilisables est également proposée, en distinguant trois grands types d'approche :

- l'approche morphométrique fondée sur l'amplitude d'équilibre des méandres (fig. 14) ;
- l'approche historique fondée sur la superposition des tracés en plan au cours du temps (fig. 13) ;
- la modélisation numérique.

L'espace de mobilité est ainsi reconnu comme une solution permettant de délimiter une enveloppe spatiale résultant d'un compromis négocié. Il s'agit en effet de faire la part entre les bénéfices environnementaux liés à l'érosion des berges, et les bénéfices économiques induits par la protection des terrains et des infrastructures contre l'érosion.

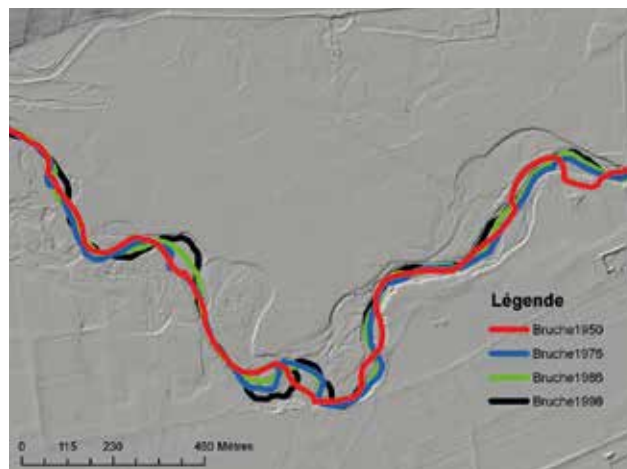


Fig. 13 - Exemple de reconstitution des tracés successifs de la Bruche à partir de photographies aériennes historiques et de données LiDAR.

Morphométrie des méandres

- amplitude (a)
- longueur d'onde (λ)
- rayon de courbure (r_c)
- indice de sinuosité (I_s)

$$I_s = L/\lambda$$

$I_s < 1,05$: chenal rectiligne

$1,05 < I_s < 1,5$: chenal sinueux

$I_s > 1,5$: méandre



Fig. 14 - Principaux indices morphométriques utilisés pour caractériser la forme des méandres. L'amplitude est souvent utilisée dans la délimitation de l'espace de mobilité.

Il est aussi admis que le principe visant à promouvoir le recul des berges et la mobilité en plan du lit des cours d'eau n'est pas adapté à toutes les situations. Certains types de cours d'eau ne possèdent pas véritablement de dynamique latérale active. Délimiter un espace de mobilité dans un tel contexte n'a donc pas vraiment de sens. Il

existe aussi des cas où l'**analyse coût-bénéfice (ACB)** de la protection de berge peut justifier le recours au génie civil ou au génie biologique. Enfin, il n'est pas non plus pertinent de promouvoir l'érosion des berges dans une situation de régime sédimentaire excédentaire et d'exhaussement du lit. **Le concept apparaît surtout adapté aux morphologies à bancs alternes et en tresses en régime sédimentaire déficitaire.**

La législation suisse impose quant à elle la définition précise d'un espace réservé pour les cours d'eau, visant à assurer la protection contre les crues et les fonctions biologiques et sociales.

Défini à l'aide d'un abaque (fig. 15) dont le périmètre de référence correspond à la largeur du fond du lit, cet espace minimal est basé sur les besoins réels des cours d'eau, dépendant de la taille du bassin versant, des débits, de la dynamique naturelle ainsi que des besoins de la faune et de la flore typiques des cours d'eau. Ainsi, l'article 41 de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) impose les dimensions exactes de ces espaces. À titre d'exemple, « l'espace réservé doit être de 11 m pour les cours d'eau dont la largeur naturelle du fond du lit est inférieure à 1 m ».

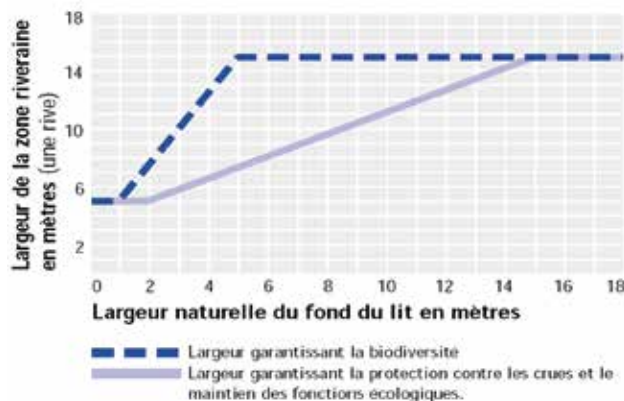


Fig. 15 - Abaque servant à déterminer la largeur de la zone riveraine (OFEFP : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage ; OFEG : Office fédéral des eaux et de la géologie – 2003).

Aucune construction nouvelle n'est tolérée au sein de cet espace à l'exception des installations qui servent un intérêt public ou en zone urbaine suite à dérogation.

Bien que les méthodes de définition du périmètre de l'espace de mobilité soient différentes en France et en Suisse, il n'en reste pas moins que les États encouragent la mise en œuvre d'actions favorisant la dynamique naturelle des cours d'eau.

2.2. La biodiversité des cours d'eau et de leurs milieux annexes

2.2.1. Généralités, fonctions et enjeux

2.2.1.1. Qu'est-ce que la biodiversité ?

Le terme « biodiversité » est largement utilisé mais englobe souvent des réalités différentes. On entend généralement par « biodiversité », la diversité de toutes les espèces vivantes. Il englobe également la diversité des écosystèmes et la diversité génétique. L'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) définit la biodiversité comme « la variabilité entre les organismes vivants provenant de toutes origines, notamment des écosystèmes terrestres, marins et aquatiques ainsi que les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces, entre les espèces et celle des écosystèmes ». On peut ainsi **appréhender la biodiversité à trois niveaux : génétique, spécifique et écosystémique.**

La **diversité génétique** concerne la variabilité génétique au sein d'une même espèce. Elle offre aux individus qui la composent des aspects et des caractéristiques différents. Elle permet à l'espèce de s'adapter dans un environnement changeant. La **diversité des écosystèmes** renvoie à la variabilité spatiale des êtres vivants en lien avec les différents milieux qu'ils occupent.

Enfin, plus récemment, la notion de **biodiversité fonctionnelle** a émergé. Il ne s'agit alors plus seulement de considérer les variabilités spécifiques, génétiques et écosystémiques des êtres vivants, mais aussi de prendre en compte leurs propriétés à agir sur le fonctionnement des écosystèmes, comme la production de biomasse, la protection des sols contre l'érosion, la pollinisation, etc.

2.2.1.2. Pourquoi préserver la biodiversité ?

Les espèces sont en interaction entre elles et avec le milieu au sein des écosystèmes, et dépendent souvent les unes des autres pour assurer leur cycle vital. L'homme dépend ainsi du bon fonctionnement des écosystèmes, qu'il s'agisse de la production de biomasse (aliments, énergie, etc.), du recyclage des nutriments (déchets) ou de la photosynthèse (production d'oxygène). Des travaux expérimentaux et théoriques menés ces dernières décennies ont montré que la biodiversité avait un effet positif sur la production de biomasse des écosystèmes.

Des chercheurs ont par ailleurs montré une relation positive entre la diversité et la stabilité de la production de biomasse après une perturbation, indiquant qu'**un écosystème retrouvera généralement plus facilement ses capacités de production après une perturbation** (incendie, sécheresse, destruction, etc.) **s'il est diversifié.**

On voit ainsi que **le maintien de la biodiversité constitue une garantie pour le fonctionnement des écosystèmes**, et qu'il est donc prudent de la maintenir si l'on veut conserver les services fournis par ces écosystèmes. En berges de cours d'eau, ces services sont nombreux,

qu'ils soient récréatifs, liés à la dépollution de l'eau, au développement de la vie aquatique ou à la fixation des berges (fig. 16).

Parmi les services rendus par les écosystèmes, il faut prendre en compte ceux qui sont avérés, mais également ceux qui peuvent être rendus dans le futur. La biodiversité possède un potentiel futur important en termes biochimique ou génétique, par exemple. La préservation de la biodiversité constitue, en ce sens, une assurance pour l'avenir.

Les écosystèmes sont généralement interconnectés et échangent des espèces et des flux de nutriments entre eux. Ainsi, l'altération d'un compartiment va aussi avoir un impact sur les compartiments adjacents. Par exemple, la destruction d'une ripisylve peut interrompre la circulation de certaines espèces, ce qui impacte les échanges de gènes et donc la vitalité des populations, faisant courir un risque de disparition des milieux adjacents. De même, dans un écosystème, **les espèces sont en interaction**, et la disparition d'une espèce peut entraîner la disparition d'autres espèces associées.

Ainsi, si la biodiversité peut être conservée parce qu'elle fait partie de notre patrimoine commun, elle doit aussi l'être parce qu'elle constitue une assurance sur le bon fonctionnement de notre environnement à venir.

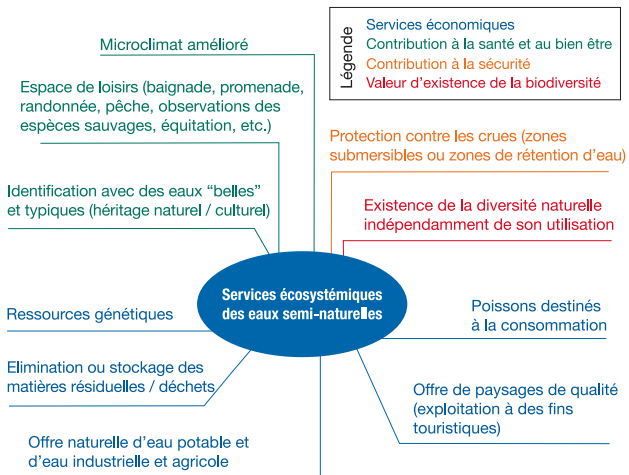


Fig. 16 - Les avantages écosystémiques des cours d'eau (d'après OFEV).

2.2.1.3. Les cours d'eau : des zones particulièrement riches en biodiversité

Les cours d'eau et leurs milieux annexes abritent naturellement une biodiversité élevée. De nombreuses espèces animales et végétales s'y reproduisent, s'y alimentent et s'y réfugient (fig. 17).

Ils constituent des zones d'interface (ou écotones) entre les milieux terrestres et aquatiques et présentent une très grande richesse floristique et faunistique. Si les lacs et rivières n'occupent que 1 à 2 % de la surface des terres émergées, on considère qu'au moins un tiers des vertébrés (poissons, batraciens, reptiles, oiseaux et mammifères)

dépendent étroitement de ces milieux pour accomplir leur cycle biologique (Lévêque 1998). Les formations végétales riveraines permettent également l'accueil de nombreux animaux terrestres (mammifères, oiseaux, amphibiens, arthropodes, etc.), soit durant tout leur cycle de vie, soit seulement pendant une période particulière de ce cycle, comme la reproduction ou l'alimentation. Ces zones abritent à la fois des espèces d'oiseaux inféodées aux habitats forestiers ou rupestres et des espèces spécifiques, comme le martin-pêcheur ou le cincle plongeur, qui dépendent pour leur alimentation ou leur nidification de la présence de l'eau.



Fig. 17 - *Calopteryx splendens* sur une feuille de *Salix purpurea*.

Cette richesse taxonomique particulière s'explique par différents facteurs, notamment par la diversité des biotopes et des structures végétales. En effet, outre son lit mineur et ses berges, le cours d'eau est connecté avec différents milieux annexes (bras morts, zones humides, affluents, terrasses alluviales, ripisylve, etc. – fig. 18).



Fig. 18 - Diversité des habitats sur une portion non rectifiée de la Haute Durance (Hautes-Alpes - France).

Cette hétérogénéité d'habitats est notamment liée aux différentes conditions de sol (granulométrie, fertilité, hygrométrie, etc.) et à un régime élevé de perturbation déterminé par le régime hydrologique du cours d'eau et

les crues qui en résultent. Ce régime est complexe et possède une fréquence élevée. Il est responsable de la création régulière de nouveaux habitats présentant des faciès différenciés empêchant généralement les espèces les plus compétitives de dominer complètement les communautés végétales (Everson et Boucher 1998).

Les crues sont également responsables de l'arrivée de nombreuses espèces végétales par l'intermédiaire de graines qui peuvent germer et de fragments de végétaux qui peuvent se développer par multiplication végétative (propagules). On observe ainsi de véritables pics de diversité spécifique liés à l'arrivée de graines lors des crues qui vont contribuer à diversifier les écosystèmes. Une étude menée à large échelle confirme que les crues et les processus écologiques liés à la présence du cours d'eau ont une importance majeure, alors que la diversité végétale située dans les milieux terrestres à proximité joue un rôle mineur (Renöfält *et al.* 2005). La comparaison de la diversité végétale de rivières aux crues naturelles et de rivières aux crues régulées par des barrages montre que ces dernières ont une diversité moindre. Cela souligne à nouveau le rôle majeur des crues dans la genèse et le maintien de la diversité des milieux rivulaires (Christer et Roland 1995).

On note aussi que la diversité végétale varie en fonction du rang du cours d'eau. Elle est en effet généralement supérieure dans les cours d'eau de rang intermédiaire alors qu'elle est souvent plus faible dans les parties avales (Nilsson *et al.* 1989 ; Nilsson *et al.* 1994 ; Ferreira et Moreira 1999). Enfin, la qualité de l'eau et le degré de perturbation anthropique sont également des facteurs importants.

Outre les espèces inféodées aux milieux rivulaires, ces milieux accueillent également les espèces qui y transitent. **Les ripisylves jouent ainsi un rôle majeur de corridors biologiques** sur les territoires français et suisses qui comptent plusieurs centaines de milliers de kilomètres de cours d'eau. Ces corridors remplissent des fonctions écologiques essentielles et jouent le rôle de vecteurs canalisant les propagules de nombreuses espèces des milieux adjacents. Utilisés comme couloir de migration par de nombreuses espèces, ils créent aussi une continuité en développant des connexions entre des milieux souvent fragmentés. Cela augmente la biodiversité génétique des peuplements en facilitant leur mélange.

2.2.1.4. Des milieux fortement impactés par les espèces végétales envahissantes

Les espèces invasives sont particulièrement dynamiques sur les berges de cours d'eau (fig. 19), notamment en raison du fort régime de perturbation qui y règne et de l'importance du flux de propagules. Il était ainsi estimé en 2001 que 20 à 30 % des espèces de la flore des communautés riveraines de cours d'eau étaient constituées d'espèces invasives (Planty-Tabacchi *et al.* 2001). L'invasion des berges par des plantes invasives joue à la fois sur la diversité spécifique de ces milieux (en la réduisant), mais également sur la diversité des différents taxons qui uti-

lisent ces corridors dans leurs déplacements (Gerber *et al.* 2008). Les espèces invasives ont ainsi un impact sur le bon fonctionnement des corridors écologiques.



Fig. 19 - Berge de cours d'eau envahie par les renouées (*Reynoutria sp.*).

2.2.2. Impacts des aménagements sur la biodiversité

2.2.2.1. Les cours d'eau : des zones particulièrement touchées par l'anthropisation

D'une manière générale, on estime que deux tiers des zones humides originelles françaises ont été détruites. Dans les Alpes françaises, sur plus de mille kilomètres de rivières en tresses, 53 % ont disparu en 200 ans (Piégay *et al.* 2009). Si cette disparition a plusieurs explications, les endiguements et rectifications réalisés afin de protéger des zones urbaines et agricoles y jouent un grand rôle. Ainsi, la même étude montre que sur les cours d'eau en tresses disparus en un siècle, 21 % ont été endigués, 48 % ont été canalisés et 5 % se sont retrouvés inclus dans des plans d'eau de barrages. À titre d'exemple, la largeur de l'Arve sur la commune de Cluse (Haute-Savoie) était comprise entre 300 et 500 mètres en 1936, elle n'était plus que de 120 mètres en 1970 pour atteindre 50 mètres en 1984 (Source : SM3A). En 1996, seuls 18 % des cours d'eau des Alpes françaises pouvaient encore être considérés comme des hydrosystèmes sauvages (Pautou *et al.* 1996). En Suisse, on estime que seuls 54 % des cours d'eau sont dans un état proche de leur état naturel et que plus de 90 % subissent une altération due à l'activité hydroélectrique (EAWAG 2010). La petite massette (*Typha minima*), espèce alpine se développant dans les zones marécageuses des cours d'eau en tresses, a été très impactée par la chenalisation des cours d'eau alpins. Une étude a ainsi montré que son aire de répartition dans les Alpes s'était réduite de 85 % en un siècle. Elle n'occupe plus que 480 kilomètres de cours d'eau, alors qu'on la rencontrait sur environ 3 170 kilomètres au 19^e siècle (Prunier *et al.* 2010).

On s'attachera ici à **trois principaux types d'impact anthropique** sur la structure physique des cours d'eau de montagne : **les travaux de chenalisation, les prélèvements de granulats et les barrages.**

2.2.2.2. Les travaux de chenalisation

Les travaux de chenalisation englobent les travaux de recalibrage, de rectification de tracé, d'endiguement, de protection de berge et de curage. « *Les objectifs hydrauliques visés par les aménagements sont le plus souvent atteints, et cela se traduit par l'accélération de l'écoulement, un surdimensionnement du lit, une réduction de la diversité des mosaïques d'habitats, la disparition des structures d'abris, la réduction des connexions avec le lit majeur* » (Wasson et al. 2000). L'accélération des écoulements liée à la chenalisation des cours d'eau entraîne une augmentation des débits de pointe à l'aval et donc une augmentation des effets dévastateurs des crues. Ces travaux ont aussi un lourd impact sur les écosystèmes. La biomasse piscicole peut ainsi être réduite de plus de 80 % après de tels travaux. Ceux-ci sont en effet le plus souvent suivis par la mise en place de seuils pour stabiliser le fond du lit. Le cumul de ces deux facteurs est particulièrement impactant pour les populations piscicoles. La destruction des connexions hydrauliques avec le lit majeur a aussi un impact fort sur la production piscicole en supprimant des zones de refuge, d'alimentation ou de reproduction.

Dans des zones fortement urbanisées (comme le sont, par exemple, certaines vallées alpines), les ripisylves constituent parfois le dernier corridor écologique disponible pour connecter les écosystèmes situés de part et d'autre des zones urbanisées. Dans ces zones où la pression foncière est forte, l'espace disponible pour les ripisylves est souvent réduit, avec des endiguements et des protections de berge fréquents (fig. 21). Les conditions déjà difficiles pour la circulation de la faune sont parfois encore compliquées par l'existence d'ouvrages linéaires de protection constitués d'enrochements (fig. 20). Ils créent des discontinuités dans les corridors biologiques, avec peu ou pas de caches, de zones refuges pour la faune terrestre, ni de zones d'alimentation. On y observe aussi des températures estivales parfois très élevées et peu favorables à la faune.



Fig. 20 - Protection de berge en enrochement sur un torrent de montagne.

2.2.2.3. Les prélèvements de granulats

À la chenalisation se sont parfois ajoutées des extractions de granulats. Des extractions d'alluvions (sables, graviers, galets) ont ainsi lieu depuis des décennies sur différents cours d'eau alpins. Sur l'Arve, ce sont 10 à 15 millions de m³ de granulats qui ont été extraits entre 1950 et 1980 ; sur la rivière Drôme, des extractions allant jusqu'à 250 000 m³ par an ont été autorisées de 1950 à 1985 (Landon et al. 1998). Ces prélèvements sont en grande partie responsables d'un enfoncement du lit allant jusqu'à 5 mètres pour la Drôme et 12 mètres sur l'Arve. Celui-ci provoque de nombreuses perturbations tels que la déstabilisation des berges ou le déchaussement d'ouvrages. Il est aussi responsable d'un abaissement du niveau de la nappe et donc de l'assèchement de certaines zones humides ainsi que de l'augmentation des risques concernant l'approvisionnement en eau potable.

En France, de telles extractions sont aujourd'hui interdites en lit mineur et fortement réglementées en lit majeur.

2.2.2.4. Les barrages et les seuils

De nombreux barrages à vocation essentiellement hydroélectrique ont été installés sur les cours d'eau alpins. Ils ont un fort impact sur l'hydrologie du cours d'eau, avec une désaisonnalisation du régime originel (stockage de l'eau, soutien d'étiage) et une réduction des débits sortants.

La régulation des régimes de crue par les barrages change le régime hydrologique et réduit le nombre et l'intensité des crues. En conditions naturelles, le régime de crue est à l'origine de perturbations fortes des écosystèmes alluviaux. Ces perturbations récurrentes contribuent à la biodiversité des cours d'eau en maintenant des milieux à différents stades d'évolution, mais aussi en assurant la connexion du lit mineur avec les milieux annexes. Par conséquent, le lissage des crues par les barrages a des effets négatifs non négligeables sur le milieu : il entraîne une perte de l'hétérogénéité des habitats et une diminution de la biodiversité des cours d'eau et de leurs annexes. Ces ouvrages constituent également un obstacle physique à la circulation des organismes aquatiques comme la remontée ou la dévalaison du poisson. Ils entravent le transit sédimentaire, créant ainsi un déficit en matériaux solides à l'aval. De plus, les « chasses », qui servent à évacuer une partie des matériaux stockés dans la retenue, ont un impact important, notamment à cause d'un apport massif de matières en suspension. Enfin, la qualité de l'eau stockée dans la retenue est inférieure à celle du cours d'eau à l'amont (désoxygénation, concentration de polluants, etc.). L'eau rejetée à l'aval provient ainsi généralement des eaux stagnantes et profondes, ce qui est susceptible d'avoir des impacts sur les organismes aquatiques.



Fig. 21 - Comparaison de la confluence des rivières Arve et Giffre entre 1935 et 2004.

Ainsi, les différentes formes d'artificialisation des cours d'eau, qu'il s'agisse de la modification de l'hydrologie, du curage, du rescindement de méandres, de la construction de protections de berge ou d'endiguement, ont toutes en commun d'altérer les dynamiques naturelles des écosystèmes et des successions écologiques propres à ces milieux. Ces interventions détruisent également les connexions entre les différents milieux associés aux cours d'eau, fragmentant les habitats et limitant la circulation et le développement de nombreuses populations animales et végétales.

De plus, on peut noter que le bois mort dans les cours d'eau, s'il peut être un facteur aggravant de l'érosion et des inondations, constitue très généralement un facteur bénéfique du point de vue écologique en créant des habitats et un apport de matière organique pour les organismes aquatiques. Ainsi, dans certains cas, la biomasse totale de poissons peut être réduite de 30 % par l'enlèvement des embâcles sur un cours d'eau lors de travaux d'entretien systématiques (Wasson *et al.* 2000).

3. Génie végétal en montagne

3.1. Définition et principes

Le génie végétal est un ensemble de techniques de construction fondé sur l'observation et l'imitation des modèles naturels pour répondre à des problématiques d'aménagement du territoire. Les principaux domaines d'utilisation du génie végétal sont :

- la lutte contre l'érosion du sol ou l'instabilité des talus ;
- la renaturation d'un site (écologique, paysagère, etc.) ;
- la lutte contre les espèces invasives ;
- la protection contre les risques naturels ou le bruit.

Il s'agit donc de techniques alternatives aux techniques traditionnelles de génie civil.

Surell déclarait en 1841 que « *la végétation est le meilleur moyen de défense à opposer aux torrents. [...] L'art alors se bornera à imiter la nature, à s'emparer de ses procédés, et à opposer habilement les forces de la vie organique à celles de la matière brute* ». Cette idée de **reproduction de modèles naturels** se retrouve dans beaucoup de définitions du génie végétal (ou génie biologique). Ainsi, pour Zeh (2007) : « *Le génie biologique traite de la construction d'une manière proche de la nature.* » Pour Adam et al. (2008), « *il est une imitation de la nature* » et correspond à « *une protection vivante inspirée des modèles naturels* ».

Un ouvrage relève du génie végétal si la végétation y assure des fonctions structurelles (stabilité, ancrage) et qu'elle n'intervient pas uniquement comme supplément (verdissement) d'une structure qui se suffit à elle-même sur le plan mécanique (fig. 1). Ainsi, Schiechl (1992) stipule qu'une caractéristique du génie biologique est que **les plantes et le matériel végétal constituent des matériaux de construction (vivant) à part entière, utilisables seuls ou en association avec des matériaux inertes**. Dans cet esprit, un ouvrage ne peut être qualifié de génie végétal que si les matériaux vivants sont utilisés comme base de sa construction (Adam et al. 2008).

Gray et Sotir (1996) différencient les techniques de stabilisation « biotechniques » (*biotechnical stabilization*) du génie biologique proprement dit (*soil bioengineering*). Pour ces auteurs, les techniques de stabilisation « biotechniques » combinent des structures inertes et des végétaux vivants sans que ces derniers n'assurent nécessairement de rôle mécanique. Le génie biologique apparaît ainsi comme un sous-ensemble du domaine biotechnique pour lequel les végétaux servent comme éléments structurants de l'ouvrage, assurant un vrai rôle mécanique. Dans le même esprit, et en ce qui concerne les berges de cours d'eau, Fripp (2008) souligne le caractère flexible et plastique des aménagements structurés par des végétaux, et propose de séparer les ouvrages en fonction de leur flexibilité : il oppose alors les **ouvrages rigides** dont la structure repose sur des matériaux inertes, et les **ouvrages**

souples dont la structure repose sur des végétaux. Ces définitions et les portées sémantiques des termes présentent une importance particulière lorsqu'on s'intéresse au génie végétal en rivière de montagne. En effet, **s'agissant de rivières à fortes pentes et à forte énergie, les ouvrages de protection de berge font fréquemment appel à des matériaux auxiliaires lourds comme des enrochements**.



Fig. 1 - Protections de berges en génie végétal sur la Petite Gryonne, cours d'eau torrentiel des Préalpes vaudoises (chantier pilote Géni'Alp - Canton de Vaud - Suisse).

En s'appuyant sur les définitions énoncées ci-dessus, on peut considérer que **le génie végétal rassemble l'ensemble des ouvrages pour lesquels les végétaux assurent une fonction de stabilisation mécanique**. On parlera de génie biotechnique pour les ouvrages dans lesquels ce sont les matériaux inertes qui assurent les fonctions de stabilisation mécanique, comme, par exemple, les enrochements végétalisés. Dans les ouvrages de génie biotechnique, les végétaux n'assurent pas ou peu de fonctions mécaniques, ces dernières étant assurées par des ouvrages de génie civil comme l'enrochement ou le grillage. Les végétaux assurent en revanche des fonctions écologiques (création d'habitats, maintien d'une partie de la fonctionnalité des corridors, etc.) et des fonctions paysagères. Même en appui de matériaux minéraux lourds, les végétaux peuvent également contribuer à la stabilité de la berge par augmentation de sa rugosité et par renforcement de la stabilité de l'ouvrage par les systèmes racinaires.

Les ouvrages de protection de berge peuvent être classés en trois types principaux : le génie végétal, le génie forestier et le génie civil. Le génie forestier concerne les ouvrages réalisés avec des structures bois (rondins), et le génie civil concerne les ouvrages réalisés avec des matériaux minéraux (enrochements, grillages, etc.). La figure 2 ci-après permet de positionner ces trois types d'ouvrages qui ne s'excluent pas mutuellement. En effet, des végétaux vivants peuvent être intégrés à des ouvrages bois (caissons végétalisés, par exemple), des techniques végétales peuvent également être associées à des techniques de génie civil (lits de plants et plançons et enrochement de pied de berge, par exemple).

Les matériaux utilisés dans les ouvrages de génie végétal sont principalement des végétaux vivants (semences, boutures, plants, etc.). En appui à ces matériaux vivants, des matériaux inertes à base de matière végétale (troncs, pieux en bois, géotextiles, etc.) ou minérale (enrochements, pieux métalliques, fils de fer, etc.) peuvent toutefois être utilisés. Les techniques de génie végétal utilisant à la fois des matériaux végétaux et minéraux sont appelées techniques mixtes.

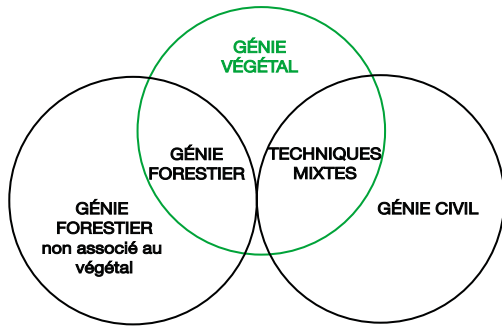


Fig. 2 - Étendue du génie végétal et des domaines associés.

Des matériaux inertes sont parfois installés pour assurer la tenue de la berge en attendant que la végétation se développe et prenne le relais de la protection de la berge, comme c'est le cas pour les géotextiles biodégradables ou, dans une certaine mesure, pour les caissons en bois végétalisés. Ces matériaux peuvent également être utilisés en complément de la végétation pour accroître la stabilité de la berge dans des zones à trop fortes contraintes. Par exemple, des enrochements de pied de berge sont souvent utilisés pour protéger la partie inférieure de celle-ci dans les rivières de montagne, en complément d'ouvrages en matériaux vivants sur la partie supérieure. Cette pratique peut notamment se justifier par la présence naturelle de blocs dans le lit des rivières de montagne (fig. 3).



Fig. 3 - Présence de blocs en rivière de montagne.

Le génie végétal est un domaine pluridisciplinaire faisant appel à des connaissances variées : ingénierie, botanique, écologie végétale, hydraulique, hydrologie, pédologie, géotechnique, etc. La mise en œuvre de chantiers de génie végétal est donc complexe car de multiples facteurs interviennent et influent sur l'efficacité de la stabilisation de la berge et la pérennité de l'ouvrage. Celle-ci

dépend largement du bon développement des végétaux, ces derniers ayant pour but d'augmenter la stabilité du sol.

Pour qu'un ouvrage de génie végétal soit efficace, il faut être particulièrement attentif au choix des espèces utilisées, à la conception, à la méthode de construction de l'ouvrage et à son entretien. Une bonne observation du site et de ses paramètres stationnels (hydrologie, température, propriété du sol, luminosité, etc.) est primordiale pour la réalisation de ces ouvrages. En effet, les végétaux doivent être en mesure de se développer rapidement dans les conditions locales. **Un ouvrage de génie végétal est réussi lorsqu'il protège les biens et les personnes contre les problèmes d'érosion, mais aussi lorsqu'il s'intègre parfaitement à son milieu (propriétés écosystémiques, paysage, usages, etc.).**

Un des dangers de l'utilisation de ces techniques peut être de considérer les ouvrages de génie végétal uniquement comme des aménagements paysagers. Lachat (1994) considère que le génie végétal ne doit pas se borner à un « *effet esthétique* ». Au contraire, l'ambition du génie végétal est **de contribuer à la conservation, l'amélioration et la recréation des fonctions naturelles** (Lachat 1991).

Dans un contexte global d'aménagement des cours d'eau, le génie végétal est utilisable dans différentes situations et pour plusieurs types d'intervention. Ses domaines d'application variés en font **un outil à disposition du gestionnaire et non pas un concept d'aménagement**. Comme présenté sur la figure 4, le génie biologique fournit des solutions intéressantes et s'adapte tout à fait à différents types de projets, qu'il s'agisse de travaux d'endiguement comme de travaux de restauration de cours d'eau au sens large.

En effet, il s'intègre parfaitement à la fois dans le cadre de travaux lourds visant des objectifs purement sécuritaires de protection contre les crues et contre l'érosion. Mais il est surtout utilisé et adapté dans le cadre de travaux de revalorisation (niveau d'objectif du type **R1**) et de renaturation de cours d'eau (**R2**) visant à diversifier les milieux et à améliorer les caractéristiques écologiques (Malavoi *et al.* 2007). Au-delà, il est également largement utilisé pour des opérations plus ambitieuses de revitalisation, dont l'objectif est de rendre un espace de mobilité latérale à la rivière et de reconstituer les conditions nécessaires à la dynamique fluviale (**R3** – fig. 4).

RESTAURATION (R)		
ENDIGUEMENT	REVALORISATION (R1) RENATURATION (R2)	REVITALISATION (R3)
Protection contre les crues comme unique objectif	Amélioration de la structure des berges et du lit	Espace nécessaire au cours d'eau
Génie civil	Adoucissement des berges	Expression des phénomènes dynamiques
Techniques mixtes	Diversification du milieu et amélioration des conditions de développement pour les biocénoses	Ouvrages de protection réduits au minimum
Impacts négatifs souvent importants sur les biocénoses		Aménagement du territoire
GÉNIE BIOLOGIQUE (techniques végétales)		

Fig. 4 - Principales catégories d'intervention et situation du génie biologique dans un contexte global d'aménagement des cours d'eau.

3.2. Le génie végétal face au génie civil : avantages, limites et coûts

3.2.1. Des avantages environnementaux et techniques certains...

Le génie végétal est souvent présenté comme une alternative plus respectueuse de l'environnement par rapport aux techniques traditionnelles du génie civil (enrochement, béton, maçonnerie, etc.). Du point de vue de la biodiversité et de la ressemblance des aménagements par rapport aux berges « naturelles », le génie végétal présente en effet des atouts certains (chap. II.6).

Parmi les **bénéfices environnementaux** du génie végétal, on peut citer :

- l'augmentation de l'ombrage sur le cours d'eau, engendrant une **diminution de la température de l'eau et une augmentation de la concentration de l'oxygène dans l'eau**. Cela procure des conditions favorables pour le développement de la faune aquatique (macro-invertébrés et poissons notamment) ;
- la garantie de la **présence d'habitats diversifiés** favorables au développement de nombreuses espèces animales (insectes, macro-invertébrés, poissons, oiseaux, reptiles, etc.) ;
- **l'apport d'aliments** (production de matières organiques et piégeage des nutriments) pour la faune du cours d'eau ;
- le **maintien des fonctions de « corridor biologique »**. En zone urbanisée ou péri-urbanisée, le corridor est fondamental au maintien et à la conservation de nombreuses espèces animales qui, sans possibilités de déplacement, périssent, se raréfient, voire disparaissent (appauvrissement génétique par isolement de populations) ;
- la **limitation de la prolifération des espèces invasives**, telles que la renouée du Japon ;
- **l'augmentation du pouvoir autoépuration du cours d'eau** : les végétaux favorisent en effet la dégradation ou l'absorption de molécules polluantes. La ripisylve filtre ainsi une partie de la pollution en diminuant, par exemple, la quantité de nitrate. Elle constitue ainsi une **zone tampon** entre les milieux terrestres et le cours d'eau ;
- une **bonne intégration paysagère** du cours d'eau. La présence de ripisylve constitue un atout pour le tourisme et les loisirs.

Par ailleurs, sous réserve de l'utilisation d'espèces indigènes de provenance locale, la mise en place d'ouvrages de génie végétal participe à la **conservation du patrimoine génétique des espèces**. Par exemple, dans le cas des rivières de montagne, l'utilisation de certaines espèces vulnérables, présentes naturellement aux abords du site, permet de créer de nouveaux noyaux de populations favorisant ainsi la pérennité de l'espèce en facilitant l'échange de gènes entre les différents noyaux existants. Les cas de la myricaire ou de l'argousier (en régression

dans tout l'Arc alpin) et des saules glauque, helvétique ou bleuâtre en sont de parfaites illustrations. **Par l'intermédiaire de processus de brassage génétique, une espèce ou un contingent d'espèces diversifient ainsi leur patrimoine génétique**. Ceci va alors se traduire par l'augmentation de la tolérance des populations vis-à-vis de différents facteurs comme les maladies ou les conditions climatiques extrêmes (froid, sécheresse, etc.).

Sur un **plan technique**, le génie végétal présente des avantages également considérables. Notons principalement les points suivants :

- **l'efficacité de la résistance des ouvrages de génie végétal augmente avec le temps** du fait du développement des végétaux, tandis que celle des enrochements stagne, voire diminue avec le temps. À terme, certaines techniques telles que les couches de branches à rejets dépassent ainsi le seuil de résistance de certains types d'enrochement (Schiechl et Stern 1996) ;
- la grande diversité de techniques disponibles permet **d'adapter les aménagements à de multiples contextes** en combinant les techniques (part. II) ;
- les végétaux installés sur les ouvrages peuvent éventuellement à leur tour fournir la matière première (branches, boutures, etc.) pour la construction d'autres ouvrages. Ceci n'est toutefois pas conseillé car il s'ensuit, à terme, un appauvrissement génétique (boutures de boutures) ;
- la possibilité, dans de nombreux cas, de **prélever le matériel sur place ou à proximité directe d'un chantier** permet au maître d'ouvrage de diminuer les coûts énergétiques pour la construction ;
- les **ouvrages de génie végétal** sont généralement **souples et adaptables**, contrairement aux ouvrages de génie civil qui sont rigides.

Selon les contextes, les techniques de génie végétal n'ont toutefois pas que des avantages et peuvent présenter des inconvénients parfois gênants pour leur utilisation ou nécessiter un suivi plus important.

3.2.2. Des inconvénients surmontables...

3.2.2.1. Les limites techniques d'avant-projet

La **période d'intervention** pour la création d'un ouvrage de génie végétal est réduite par rapport à celle dont le maître d'ouvrage dispose pour un ouvrage de génie civil. La période estivale n'est généralement pas propice à la réalisation de chantiers utilisant les végétaux en raison de la période végétative (montée de sève) et d'une plus faible disponibilité en eau dans le sol durant cette période. Il convient donc, dans la mesure du possible, d'intervenir en dehors de cette période. **En cours d'eau de montagne**, cette question est davantage problématique en raison des **régimes hydrologiques et des conditions climatiques contraignants pour les travaux** (accessibilité du chantier, tenue du sol, présence de neige, difficultés pour travailler dans le lit mineur en période de hautes eaux, etc.) et pour la végétation (crues). Sur certains cours d'eau, la fraie hivernale des salmonidés peut également constituer un facteur limitant pour l'intervention.

Même s'il existe de nombreuses espèces ligneuses adaptées à l'altitude, la **limite altitudinale de la végétation** est bien sûr un facteur limitant de la mise en œuvre d'ouvrages de génie végétal (part. III). Par ailleurs, le **régime torrentiel** de certains cours d'eau de montagne implique des **contraintes mécaniques élevées** que le génie végétal ne peut supporter au-delà d'un certain seuil (chap. II.3). Dans ce cas, si l'intervention est nécessaire, il est indispensable d'avoir recours à des techniques de génie civil.

3.2.2.2. Les problèmes potentiels d'après travaux

La question de la **résistance mécanique dans les premiers mois suivant la mise en place de l'ouvrage** constitue également une limite qu'il convient de prendre en compte. En effet, avant que les végétaux ne se développent, la résistance de l'ouvrage aux contraintes mécaniques exercées par une éventuelle crue est faible.

Avec une période de hautes eaux printanière ou estivale, l'ouvrage a davantage de risques de subir une crue et d'être ainsi déstabilisé ou détruit avant la reprise de la végétation (chap. II.3). C'est moins le cas pour un ouvrage de génie civil tel qu'un enrochement, dont la résistance mécanique est immédiatement maximale. La qualité de réalisation de l'ouvrage, qu'il soit en génie végétal comme en génie civil, pondère bien sûr très largement ce constat. Un aménagement bien conçu et bien réalisé présentera immédiatement une résistance plus élevée qu'un ouvrage présentant des défauts de conception ou de fabrication.

Ces éléments ne sont pas les seuls facteurs d'échec possibles d'un ouvrage de génie végétal. Qu'il s'agisse de la **sensibilité des espèces utilisées aux maladies et à la sécheresse**, ou de la vulnérabilité des espèces à bois tendre comme les saules face à l'appétit des castors, ou encore des risques de dégradation ou de vandalisme, **les causes d'échec sont multiples. Néanmoins, elles peuvent souvent être anticipées et réduites.**

Par ailleurs, par rapport aux procédés de génie civil classiques, la végétalisation des berges peut avoir des conséquences négatives en termes de gestion des inondations. Par exemple, l'augmentation de l'encombrement du lit et/ou la production accrue d'embâcles peut provoquer une augmentation de la hauteur d'eau en amont de l'ouvrage. On prêtera également attention à la végétalisation à proximité des digues de protection contre les inondations qui peut parfois accroître les risques de rupture (chap. I.4.1.5).

Il convient ainsi de prendre en compte ces différentes contraintes lors de l'élaboration d'un projet de protection de berge.

3.2.3. Les coûts de revient d'ouvrages en génie végétal et en génie civil

3.2.3.1. Objectifs et approche méthodologique

L'objectif est ici de fournir aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre une première idée *a priori* des prix applicables pour la réalisation d'ouvrages de génie végétal et de faciliter leur choix quant aux techniques à utiliser

(tab. 2). L'idée est de **fournir une fourchette des coûts de revient des techniques** suivantes :

- fascines de saules ;
- lits de plants et plançons ;
- couches de branches à rejets ;
- caissons végétalisés ;
- enrochement de pied de berge.

Les quatre premières techniques sont complétées par la mise en œuvre de plantations, de boutures et d'un enherbement, comprenant le prix du géotextile. La présentation d'enrochements de pied de berge dans les techniques considérées ici se justifie par la nécessité d'utiliser cette technique dans une grande partie des ouvrages de protection de berge réalisés en rivière de montagne afin de stabiliser le pied de l'ouvrage face aux fortes contraintes tractrices qui lui sont imposées.

Le projet Génie'Alp s'est attaché à réaliser un retour d'expériences sur des cours d'eau de montagne de l'espace alpin afin de recenser les coûts de différentes techniques utilisables en rivière de montagne. Plusieurs références issues de la littérature scientifique européenne fournissent des éléments de chiffrage des différentes techniques. Ceux-ci semblent néanmoins insuffisamment précis pour être extrapolés en France et en Suisse. Ils ont ainsi été confrontés aux coûts des chantiers pilotes mis en œuvre dans le cadre du projet (chap. II.4). L'ensemble des données recueillies a été complété grâce au recueil de coûts pratiqués auprès des partenaires du projet (ARRA, SM3A, SYMASOL, ONF, hepia, Irstea).

On constate également que la bibliographie donne des éléments de chiffrage relativement précis pour la mise en place d'ouvrages de génie végétal ou de génie civil en plaine. Néanmoins, **les prix pratiqués localement varient très largement selon le contexte économique, la situation du site, la disponibilité des matériaux sur place, etc.** Les comparaisons sont donc difficiles. **Concernant l'application de ces techniques en zone de montagne, les éléments de chiffrage sont par contre très rares** en raison du très faible nombre de retours d'expériences disponibles et des caractéristiques spécifiques de ces territoires. La variabilité des prix y est encore plus importante du fait de la grande diversité de contraintes influant sur les conditions de mise en œuvre (période et durée d'intervention, accès au chantier, espèces utilisées, etc.). Il est ainsi très complexe de déterminer les prix moyens des techniques de génie végétal en rivière de montagne.

L'analyse et la comparaison des coûts sont d'autant plus difficiles qu'il existe différentes modalités de réalisation pour une même technique. La densité des plants, par exemple, peut différer pour un même type d'ouvrage selon les concepteurs et le contexte. Les coûts unitaires propres à chaque technique ne sont pas non plus fournis avec les mêmes unités (unité, ml, m² ou m³), ce qui complexifie encore la comparaison.

L'analyse présentée ici consiste à déterminer les prix de plusieurs techniques prises de manière individuelle et non de leurs combinaisons qui, selon l'ouvrage et le contexte, différeront par leurs modalités de mise en œuvre, les matériaux utilisés ou les linéaires réalisés.

3.2.3.2. Coûts observés

Les coûts présentés comprennent les fournitures (bou-tures, plants, bois, géotextile, etc.) et la mise en place de l'ouvrage. Les coûts d'installation du chantier, de prépa-ration du terrain (retalutage, déblai/remblai, etc.) et d'en-tretien sont exclus du fait de leur caractère très variable selon les chantiers et les territoires.

Ces éléments de chiffrage sont donnés à titre indicatif et reflètent la forte variabilité des prix de chaque technique.

Ils doivent être pris avec précaution, d'une part en raison d'unités de mesures différentes (mètre linéaire, m², m³, unité) et, d'autre part, la comparaison isolée du coût des techniques ne correspond pas à la réa-lité du terrain. Ces techniques ne sont en effet que très rarement utilisées seules sur un ouvrage.

En effet, la protection d'une berge impose généra-lement de combiner différentes techniques, notam-ment entre le pied de berge et la partie supérieure de celle-ci. Des combinaisons possibles sont ainsi fournies dans le tableau suivant (tab. 1).

Les fourchettes des coûts observés en France et en Suisse pour chaque technique sont présentées dans le tableau ci-après (tab. 2). L'amplitude de variation des tarifs est déterminée par les valeurs minimales et maxi-males recueillies.

Tab. 1 - Combinaisons possibles de techniques de génie végétal et de techniques mixtes.

Pied de berge	Partie supérieure de la berge
Fascines de saules	Bouturage/plantation + Ensemencement
Fascines de saules	Lits de plants et plançons + Ensemencement
Caissons végétalisés	Bouturage/plantation
Enrochement de pied de berge	Couches de branches à rejets + Plantation + Ensemencement
Enrochement de pied de berge	Bouturage/plantation + Ensemencement
Enrochement de pied de berge	Lits de plants et plançons + Ensemencement

Les techniques purement végétales semblent moins coûteuses que les techniques mixtes. On observe éga-lement des coûts particulièrement élevés en Suisse (tab. 2). La variation des prix mise en évidence pour une même technique est relativement importante. Elle dépend notamment :

- de la provenance des matériaux (achetés ou pré-lévés sur site) ;
- du type de structure qui réalise les travaux (entreprise, association d'insertion, régie) et de son expérience ;
- de la densité des plantations, boutures et enherbements ;
- de l'accessibilité du site ;
- de la qualité des matériaux utilisés ;
- du cours des marchés.

Tab. 2 - Synthèse des coûts par technique de génie végétal et technique mixte (éléments de chiffrage fournis à titre indicatif et à considérer avec précaution : unités de mesure différentes, techniques prises isolément et très rarement utilisées seules sur un même ouvrage).

Techniques de génie végétal et techniques mixtes	Unité	Prix observés (fournitures + mise en œuvre)	
		En France (en € HT)	En Suisse (en CHF HT)
ENHERBEMENT / ENSEMENCEMENT (géotextile compris)	m ²	4 à 10	8 à 9
BOUTURES	Unité	1 à 5	2,5 à 5
PLANTATIONS	Unité	2 à 10	3 à 20
FASCINES DE SAULES	ml	50 à 100	60 à 150
LITS DE PLANTS ET PLANÇONS	ml de lit	20 à 40	60 à 100
COUCHES DE BRANCHES À REJETS	m ²	30 à 80	80 à 100
CAISSONS VÉGÉTALISÉS	m ³ de bois posé	100 à 400	300 à 700
ENROCHEMENT	m ³	70 à 150	170 à 500

Rappelons également, à titre indicatif, que les ouvrages doivent faire l'objet d'un entretien régulier espacé dans le temps, selon les buts de la protection et des impacts de la végétation sur les flux ou sur les biens. Il s'agit d'assurer la pérennité de l'ouvrage et de limiter les éventuels troubles provoqués par son vieillissement (encombrement du lit, embâcles, perturbation des flux, etc.). On estime que ces

coûts d'entretien sont compris entre 10 et 15 % du montant total de l'ouvrage. Ce dernier doit faire l'objet d'une surveillance accrue au cours des premières années afin de vérifier la bonne tenue de l'aménagement, la bonne reprise végétative des plants et boutures, et réparer d'éventuels dégâts causés par une crue précoce ou par la sécheresse.

4. Pourquoi, quand et comment protéger ?

Au cours des derniers siècles, les sociétés modernes n'ont eu de cesse de protéger les berges des cours d'eau pour l'agriculture et l'urbanisation, et de se protéger contre les inondations.

La réflexion autour de la protection de berges est une question d'aménagement du territoire, dont les conséquences dépassent largement la seule protection d'un enjeu local et doivent être envisagées à l'échelle d'un cours d'eau ou d'un tronçon. Elle intervient bien évidemment en amont et est totalement indépendante de toute réflexion autour des techniques à utiliser.

Si certains enjeux doivent nécessairement être protégés compte tenu de leur importance (zones d'urbanisation dense, infrastructures de transport majeures, ouvrages de franchissement, etc.), il doit être envisagé, dans un souci de restauration des cours d'eau, d'**accepter l'érosion de certains terrains faisant l'objet d'enjeux moindres**. En effet, la stabilisation des berges bloque le processus de recharge sédimentaire nécessaire aux cours d'eau pour retrouver un équilibre morphologique, et participe ainsi à l'aggravation des dysfonctionnements de l'hydrosystème fluvial dont les conséquences sont tant environnementales qu'économiques.

La généralisation à l'ensemble d'un bassin versant des déséquilibres sédimentaires liés au blocage du transport solide et de la recharge sédimentaire risque d'engendrer des effets cumulatifs potentiellement graves et impactants pour les activités humaines. Pour exemple, l'incision du fond du lit provoque l'augmentation des processus d'érosion de berge par affouillement et l'accroissement du risque de déchaussement d'ouvrages d'art (ponts, digues, etc.) et de protection de berge. L'abaissement de la nappe d'accompagnement et son corollaire, la diminution de la ressource en eau, voire sa disparition (affleurement du substrat rocheux), figurent également parmi les conséquences les plus graves liées à l'incision.

Stabiliser les berges d'un cours d'eau dans sa plaine alluviale signifie empêcher la reprise du stock alluvial du lit majeur récemment formé et des terrasses plus anciennes par le cours d'eau (« production interne »), ce qui permettrait de garantir son rééquilibrage sédimentaire (Malavoi *et al.* 2011). De même, en zone de montagne, principale zone de « production externe » de sédiments grossiers, la stabilisation des versants est préjudiciable à l'alimentation du cours d'eau en matériaux.

Ceci, associé aux fortes perturbations du transport de matériaux solides induites par la création de barrages et seuils et par les importantes opérations de curage et d'extraction de granulats menées au cours du siècle dernier notamment, provoque d'**importants dysfonctionnements hydromorphologiques des cours d'eau**. C'est de ce constat qu'est né le concept d'espace de liberté ou de mobilité dans les années 1980, ainsi que la prise de conscience de la nécessité de garantir l'équilibre sédimentaire des cours d'eau en préservant leur capacité d'érosion (Malavoi *et al.* 2011 ; chap. 1.2).

Ainsi, s'il est tout à fait acceptable de protéger les enjeux importants contre l'érosion, il est également indispensable d'inclure cette démarche dans une **logique de préservation de l'espace de mobilité à l'échelle de l'intégralité du linéaire du cours d'eau afin d'assurer une recharge sédimentaire suffisante. Il s'agit ainsi de prendre en compte la problématique de l'équilibre sédimentaire des cours d'eau dans les politiques d'aménagement du territoire afin de préserver l'intérêt général.**

Ce point impose la prise en compte, à l'échelle du bassin versant, des enjeux tant environnementaux que socio-économiques, des dysfonctionnements de l'hydrosystème et de leurs impacts potentiels sur ces enjeux, mais également l'appréciation du rapport « coûts/bénéfices » lié au déplacement de certains enjeux hors de l'espace de mobilité du cours d'eau. Une analyse coût-bénéfice (ACB) est ainsi à privilégier (chap. 1.4.1.3.1).

Définition :

La notion d'enjeu recouvre une notion de valeur ou d'importance. Un bien matériel peut ainsi être caractérisé par une valeur fonctionnelle, économique (vénale) et/ou sociale.

Un enjeu (bien ou activité) peut être vulnérable vis-à-vis d'événements ou de phénomènes donnés. On peut définir sa vulnérabilité en termes physiques (son « aptitude à être plus ou moins affecté, en termes de perte ou d'endommagement, par la survenance d'un phénomène donné d'intensité donnée ») ainsi qu'en termes sociaux, économiques, environnementaux ou fonctionnels (« niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène sur les enjeux, en termes sociaux, économiques ou fonctionnels »).

« L'identification des enjeux a pour objet la mise en évidence de biens, de personnes, de milieux ou de fonctions qui seraient susceptibles d'être endommagés par des phénomènes [...]. Ces dommages auraient probablement de plus des conséquences économiques et/ou sociales et/ou environnementales » (INERIS et BRGM 2007).

4.1. Les enjeux socio-économiques et la protection face au risque « érosion »

4.1.1. Des enjeux hérités de politiques économiques et d'aménagement du territoire...

Les pouvoirs publics et les collectivités gestionnaires de milieux aquatiques doivent aujourd'hui composer avec un « héritage socio-économique » fruit de plusieurs décennies de politiques d'aménagement du territoire au cours desquelles la logique économique a largement prévalu sur la logique environnementale. Les lits majeurs des cours d'eau ont offert des terrains peu coûteux et en apparence faciles à viabiliser pour l'urbanisation et les différentes activités économiques. Ces terrains ont apporté une réelle plus-value économique et financière à

leurs acquéreurs en raison de leur faible coût d'achat et de la valeur ajoutée produite par les activités qui y furent installées, parfois très importantes (usines, manufactures, agriculture intensive, etc.).

C'est le cas en zone de montagne et de piémont, où les recalibrages successifs des cours d'eau et la lutte contre les inondations ont permis à la fois le développement de l'agriculture, l'implantation d'infrastructures productives et de transport ainsi que l'urbanisation des fonds de vallées. Ceux-ci, auparavant largement occupées par la rivière, ont ainsi été colonisés par les activités humaines favorisant très fortement le développement économique de territoires autrefois relativement hostiles. En France, à l'exemple de la vallée de l'Arve, les vallées alpines ont connu un essor industriel majeur au cours du 20^e siècle notamment. Cela s'est traduit en France comme en Suisse par l'installation de très nombreux ouvrages hydroélectriques et par la canalisation des rivières.

L'implantation d'enjeux au sein du lit majeur des cours d'eau a causé une forte augmentation de la vulnérabilité face au risque d'inondation, et a nécessité la création d'ouvrages hydrauliques comme les digues de protection contre les crues. Or, ces aménagements ont un effet pervers : sensés diminuer le risque, ils n'ont en réalité diminué que l'aléa, avec plus ou moins de succès. Au bilan, le risque a fortement augmenté par le positionnement d'enjeux en arrière des ouvrages, qui a accru la vulnérabilité (Degoutte 2006). Ainsi, les différentes politiques d'aménagement du territoire ont mis en place un cercle vicieux nécessitant toujours davantage de protection contre les inondations et l'érosion des berges afin de protéger des enjeux dont l'implantation en lit majeur est favorisée par un sentiment illusoire de sécurité, lui-même fourni par l'existence des aménagements hydrauliques. Or, ces aménagements nécessitent une gestion, une surveillance et un entretien parfois lourds et coûteux afin d'assurer leur bon fonctionnement et leur pérennité. Celle-ci peut d'ailleurs parfois être remise en cause par un mauvais usage et un mauvais entretien des végétaux sur l'ouvrage (chap. I.4.1.5).



Fig. 1 - L'Arve au Fayet (Haute-Savoie - France), corsetée entre les infrastructures de transport, les zones urbanisées et les zones d'activité économique.

Aujourd'hui, on retrouve ainsi à la fois des zones urbanisées (habitat, zones d'activités, zones industrielles, etc.) et de l'habitat isolé, mais aussi d'importantes infrastructures de transport (routes principales, autoroutes, chemin de fer, etc. – fig. 1). La création de ces enjeux stratégiques ainsi que leur protection nécessitant une quantité importante de matériaux, a conduit au développement de zones d'extraction massive de granulats en lit mineur puis en lit majeur (gravières). Au-delà de la simple préservation de leur intérêt économique, ces gravières, plans d'eau artificiels le plus souvent créés à proximité directe des cours d'eau, constituent désormais un risque environnemental en cas de connexion avec le cours d'eau (piégeage massif des sédiments en transit et aggravation des processus d'érosion).

Par ailleurs, **la substitution de zones naturelles ou de pâturage par des terres labourées et cultivées gagnées sur la rivière a également participé, au même titre que l'urbanisation, à augmenter considérablement les valeurs sociale et vénale des fonds de vallées alpines.**

4.1.2. La prise en compte de la dimension socio-économique

Dans ce cadre, il est souvent complexe de définir une stratégie de gestion et d'intervention et de déterminer quelle zone d'érosion doit faire l'objet de mesures de protection et quelle zone doit pouvoir évoluer librement.

Le SDAGE Rhône-Méditerranée impose le principe de non-aggravation des perturbations subies par les cours d'eau. Il est demandé aux gestionnaires de mener des opérations de restauration physique des cours d'eau en intégrant les dimensions socio-économiques par l'élaboration de stratégies d'intervention et la détermination des options à retenir sur la base d'analyses coût-bénéfice (SDAGE Rhône-Méditerranée). En France comme en Suisse, les actuelles politiques publiques de gestion des milieux aquatiques donnent la priorité à la restauration (ou revitalisation) des cours d'eau et à la création/préservation d'un espace de mobilité suffisant pour assurer un bon fonctionnement de l'hydrosystème fluvial.

Dans certains cas, il peut être moins coûteux de déplacer l'enjeu que de réaliser une protection de berge. Dans le cadre d'une démarche de gestion globale des milieux aquatiques et de la ressource en eau, il est ainsi fondamental de **définir et de cartographier un espace de mobilité** (chap. I.1.2.4 et I.2.1.5) au sein duquel :

- **toute nouvelle protection de berge**, ainsi que toute nouvelle activité qui pourrait nécessiter à terme une protection, **est proscrite** ;
- **certaines protections contre l'érosion pourraient être remises en cause**, ainsi que les enjeux qu'elles protègent, dans le cadre d'opérations de restauration hydromorphologique.

Il est aujourd'hui impossible d'envisager le déplacement ou la destruction de certains enjeux participant au développement et au fonctionnement économique de ces territoires (zones urbaines et infrastructures de transport), ni

même des zones d'extraction de matériaux. **Le SDAGE Rhône-Méditerranée prend en compte les enjeux existants en préconisant des mesures de protection contre l'érosion latérale lorsque celles-ci sont « motivées par la protection des populations et des ouvrages existants »** (SDAGE Rhône-Méditerranée). **Dans les autres cas de figure, la priorité est donnée à la non-intervention, voire à la restauration physique du cours d'eau.**

Les politiques locales d'aménagement du territoire doivent aujourd'hui permettre et favoriser une bonne gestion des milieux aquatiques en rendant leur juste place aux cours d'eau par la préservation d'un espace de mobilité suffisant. Celui-ci doit être défini en composant avec la présence d'enjeux socio-économiques majeurs mais également en prenant la responsabilité du déplacement ou de l'abandon d'autres enjeux moins importants. **Mais comment décider de la protection d'un enjeu ? Dans quels cas le déplacer ? Dans quels cas ne pas intervenir ?**

4.1.3. Hiérarchiser les enjeux à différentes échelles

La réflexion vis-à-vis de l'opportunité d'une protection de berge doit s'appuyer sur une prise en compte approfondie des **enjeux socio-économiques** à proximité du cours d'eau et **potentiellement menacés** par les processus d'érosion. Pour cela, il est conseillé de procéder à leur hiérarchisation à l'échelle locale comme à celle du bassin versant.

Ils peuvent être distingués selon leur **nature** et leur **valeur sociale** (usage de loisir, de transport, d'infrastructure, de réseau, de pâturage, de production agricole, d'énergie, etc.), mais également selon leur **valeur vénale** (prix marchand). L'occupation du sol (agricole, urbanisée, naturelle ou forestière) et le type d'activité développée (transport, réseau, production, tourisme et loisirs, etc.) donnent plus ou moins de valeur à un terrain.

4.1.3.1. L'échelle locale

La figure 2 ci-après propose une hiérarchisation possible des enjeux socio-économiques susceptibles d'être menacés par les risques d'érosion (Malvoï *et al.* 2011). Elle prend en compte à la fois les **valeurs sociale, fonctionnelle et vénale des enjeux**. Bien sûr, **cet exemple ne constitue pas un modèle car il est fondamental d'apprécier au cas par cas la valeur des enjeux en place**. On peut néanmoins se baser sur cet exemple pour une première hiérarchisation *a priori*.

La hiérarchisation des enjeux selon leur valeur sociale s'apprécie en fonction de l'usage qui en est fait par la société et de son utilité sociale. Il convient, par exemple, de prendre en compte la propriété du bien, sa fréquentation éventuelle par le public et l'activité liée à l'élément, etc. On peut ainsi s'interroger de la manière suivante :

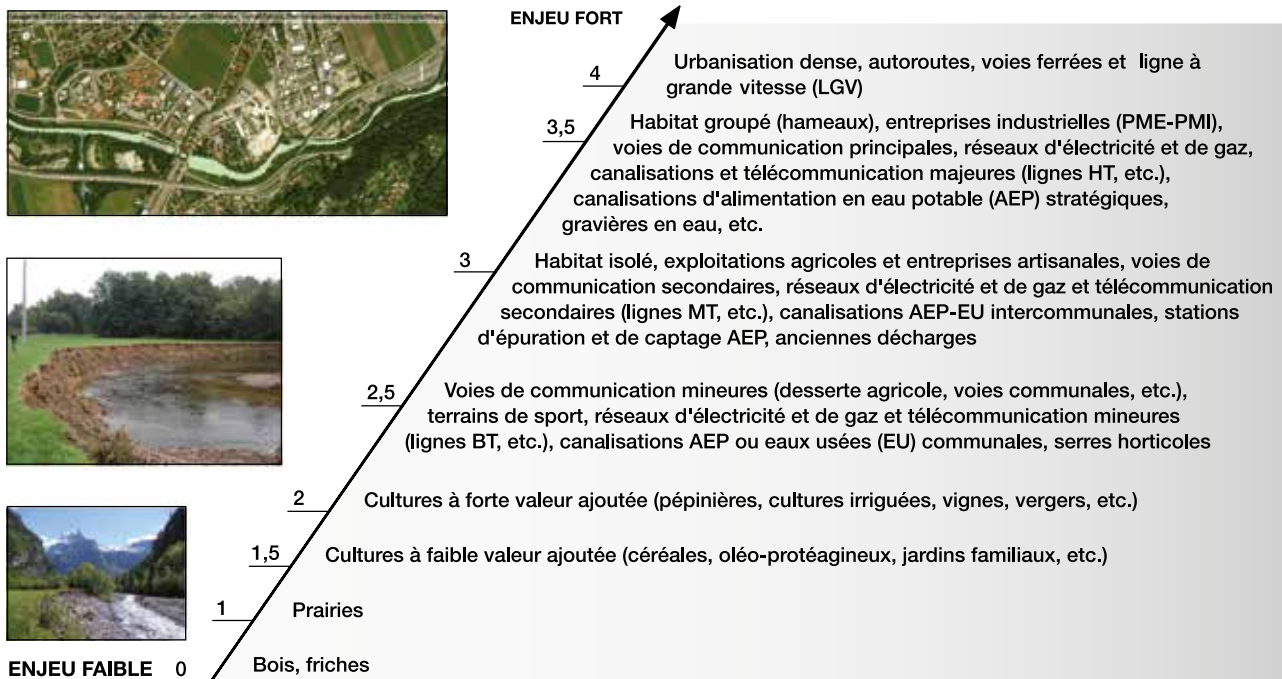


Fig. 2 - Exemple de grille de détermination du niveau d'enjeu socio-économique susceptible d'être menacé par des risques d'inondation/érosion liés au transport solide (d'après Malavoi *et al.* 2011).

- s'agit-il d'une propriété privée ou publique ?
- la fréquentation du site ou du bien est-elle importante ?
- d'autres sites ou infrastructures sont-ils susceptibles de remplir le même rôle social ?

La **valeur économique de l'enjeu** constitue bien évidemment un point crucial. Les grandes infrastructures de transport (voies ferrées, routes, autoroutes), en raison de leur coût particulièrement important, constituent des enjeux majeurs, au même titre que les zones densément urbanisées ou les zones d'activités. À l'inverse, **compte tenu de leur valeur économique relativement peu importante, les terrains non bâtis constituent des enjeux relativement faibles.**

En 2010, en France, le prix moyen d'acquisition d'une terre agricole de type « prés » était de 5 230 €/ha à l'échelle nationale ; 3 229 €/ha pour des forêts. Lorsqu'il s'agit de patrimoine bâti isolé, la valeur vénale du terrain augmente fortement : 169 000 €/ha en moyenne à l'échelle nationale pour un terrain abritant une maison d'habitation en zone rurale (prix issus des SAFER – Sociétés d'aménagement foncier et d'établissement rural).

Dans le cas des réseaux de fluides (eau, électricité, gaz), les coûts de déplacement peuvent être relativement élevés. Par exemple, le prix du déplacement d'un pylône THT (très haute tension) est estimé à environ 150 000 €, celui d'un poteau HTA (haute tension A) à 60 000 € (N'Guyen 2008).

Ces coûts sont à mettre en rapport avec ceux d'une protection de berge, qu'il s'agisse de génie végétal ou de génie civil, mais aussi avec d'éventuels coûts issus de perturbations engendrées ailleurs sur le tronçon du cours d'eau (déchaussement d'ouvrages, inondations, etc.) afin de bien mesurer les avantages et inconvénients à large échelle de l'abandon ou du déplacement de l'enjeu.

L'analyse coût-bénéfice (ACB) peut apporter des éléments de réponse pertinents. Aujourd'hui fortement promue dans toute démarche d'aménagement, elle constitue un **outil d'évaluation des projets d'investissement** dans une perspective à long terme et du point de vue de l'économie dans son ensemble.

Cette méthode apporte des réponses sur les questions d'intérêt général, en comparant les effets du projet à ceux d'une hypothèse « sans projet ». Elle permet de **comparer les coûts des mesures ou des projets avec les bénéfices environnementaux** sur la base de données prévisionnelles de coûts et d'avantages exprimés en monnaie, à l'aide d'indicateurs de rentabilité économique pour la collectivité dans son ensemble (AERM&C 2007 ; Grelot 2004 ; Grelot 2009).

4.1.3.2. L'échelle du bassin versant

Dans le cadre d'une réflexion à l'échelle du bassin versant, la préservation ou la création d'un espace de mobilité du cours d'eau favorise à la fois une amélioration du fonctionnement morphologique de celui-ci, mais également la lutte contre les inondations et leurs conséquences. L'existence de zones d'expansion de crues, qu'elles soient naturelles ou artificielles, permet la réduction de l'aléa et donc du risque en aval, par le ralentissement de la propagation de l'onde de crue et la rétention temporaire des eaux (fig. 3). Au regard des enjeux impactés par les inondations et du coût humain et financier des dégâts qui se chiffrent

souvent en millions, voire en milliards d'euros, il devient intéressant de se questionner sur l'impact potentiellement positif d'une érosion localisée, au-delà de la seule destruction de l'enjeu. Il s'agit alors de mettre en synergie les logiques de lutte contre les inondations (DCI - Directive cadre inondations) et d'atteinte des objectifs environnementaux de la DCE.

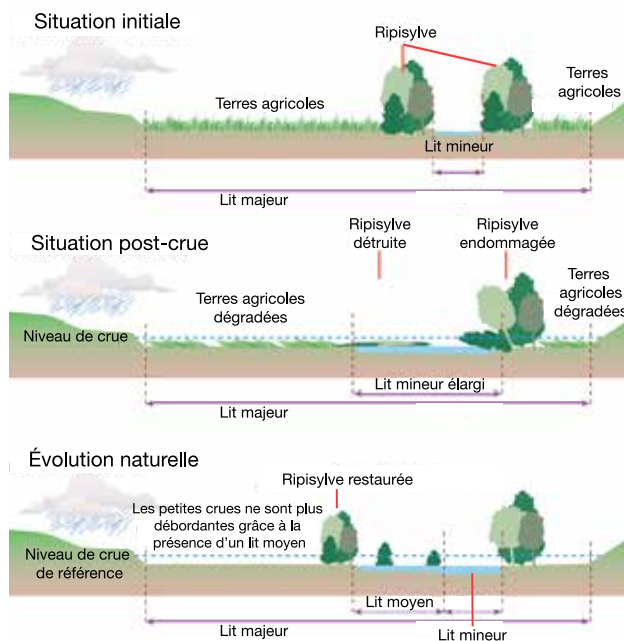


Fig. 3 - Schéma de principe des conséquences de l'élargissement du lit mineur sur les crues (d'après IRMA - Institut des Risques Majeurs).

Au-delà d'exemples strictement montagnards tels que la catastrophe du Grand-Bornand en 1987, les crues de l'Ainan en 2002 (Isère et Savoie), des torrents de Belledonne (Isère) ou du village de Lauterbrunnen (Alpes bernoises)

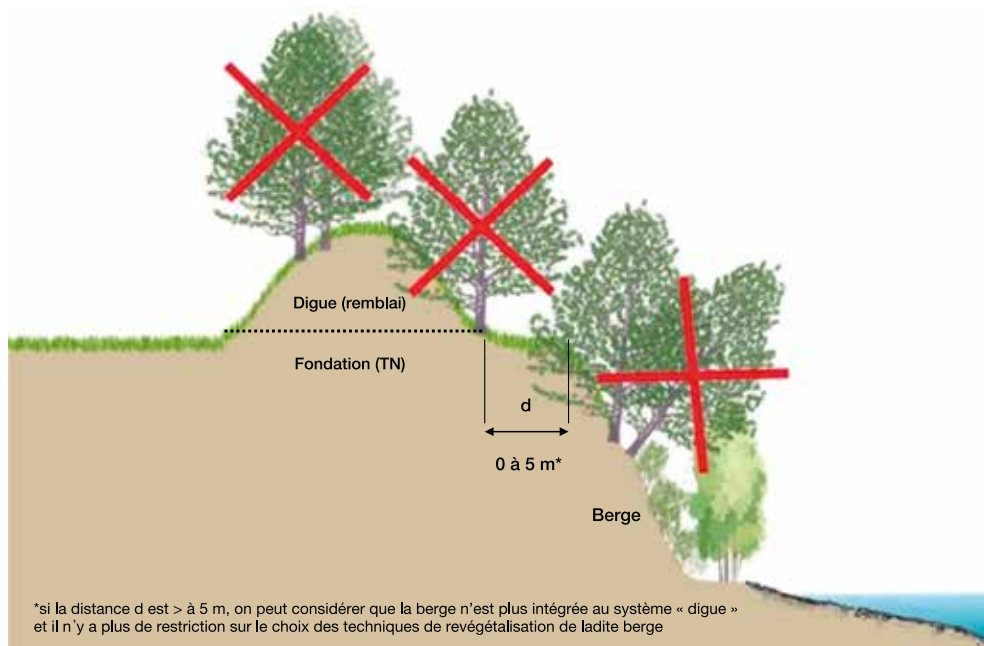
en 2005, on pense également à quelques inondations majeures des dernières décennies : le bas Rhône en 2003 (7 victimes et 1 milliard d'euros de dégâts), le Gard en 2002 (23 victimes et 1,2 milliard d'euros) ou encore l'Aude en 1999 et Vaison-la-Romaine en 1992 (1 milliard et 81 victimes à elles deux). Ces catastrophes sont bien sûr dues à des aléas forts ou exceptionnels et à une vulnérabilité importante, mais la présence de zones d'expansion de crues naturelles en amont aurait pu participer à atténuer le risque et les conséquences à la fois humaines et économiques pour certains de ces événements.

4.1.4. Protection ou non-intervention : une hiérarchisation *a priori*

La mise en place systématique de mesures de protection contre l'érosion n'est pas une solution adaptée. Il convient bien d'agir au cas par cas, selon la valeur réelle des enjeux menacés et les possibilités d'action.

Néanmoins, au regard de la figure 2 ci-avant, on peut déterminer *a priori* trois catégories d'enjeux :

- **de 0 à 2 : non-intervention.** Aucune protection de berge ne doit être préconisée afin de permettre la recharge sédimentaire du cours d'eau ;
- **de 2,5 à 3 : protection en cas d'impossibilité de déplacement ou de coûts trop élevés en regard de leur protection.** Il est important d'envisager sérieusement la possibilité de déplacer l'enjeu afin de le soustraire au risque d'érosion ;
- **de 3,5 à 4 : protection impérative.** Ces enjeux, le plus souvent stratégiques, coûteux et non déplaçables, doivent absolument être soustraits au risque d'érosion. Il est important d'envisager des opérations de recharge sédimentaire par ailleurs sur des tronçons sur lesquels les enjeux sont moins importants.



*si la distance d est > à 5 m, on peut considérer que la berge n'est plus intégrée au système « digue » et il n'y a plus de restriction sur le choix des techniques de revégétalisation de ladite berge

Fig. 4 - Modalités de gestion des ligneux sur les digues.



En présence de gravières ou de plans d'eau artificiels en bordure directe du cours d'eau, il est fondamental de protéger la rivière d'une éventuelle capture par la gravière.

Dans le cas contraire, les conséquences sur son équilibre sédimentaire peuvent être catastrophiques en raison du piégeage par le plan d'eau d'une part importante, voire de l'ensemble des matériaux solides. Les conséquences se font alors directement sentir en aval par l'accroissement des phénomènes d'érosion latérale et verticale (incision).

4.1.5. Étude et recommandations sur les limites de la végétalisation ligneuse sur des berges intégrées à une digue de protection contre les crues

La végétalisation des protections de berge et les ouvrages de défense de berge construits à l'aide de techniques végétales présentent de nombreux avantages sur les plans écologique et paysager. Ces techniques sont donc à encourager dans les projets d'aménagement de cours d'eau. Il existe cependant une configuration d'ouvrages où des restrictions à la recommandation précédente s'imposent : lorsque la berge à défendre est prolongée par le talus (ou parement) d'une digue de protection contre les crues, les règles de l'art du génie civil recommandent de la maintenir dans un état strictement enherbé, dans sa partie haute tout au moins.

Une digue de protection contre les crues est un ouvrage en remblai ou en maçonnerie construit en élévation par rapport au niveau du terrain naturel et/ou au sommet de la berge (si la digue est proche du cours d'eau), dont la fonction est de contenir l'eau afin de l'empêcher d'envahir une zone naturellement inondable. Dans le présent ouvrage, seul le cas des digues en remblai est considéré.

Dans cette configuration, des arbres ou arbustes se développant sur la digue ou à proximité de son pied, côté rivière ou torrent, sont susceptibles de remettre en cause la sécurité de l'ouvrage et donc sa fonction de protection des biens et des personnes situés dans la zone inondable. **Il peut alors y avoir une contradiction entre la volonté**



Fig. 5 - Effondrement en crête de digue suite à la décomposition d'une souche.

de végétaliser les berges de cours d'eau et celle d'éviter arbres et arbustes sur les digues. Notons que la configuration amenant à un tel conflit d'objectifs n'est absolument pas majoritaire le long des cours d'eau de montagne car, bien que l'on ne dispose pas de statistiques précises, seule une faible part du linéaire total des rivières torrentielles et des torrents alpins est endiguée, au sens défini ci-dessus.

Par ailleurs, il est ici convenu que la berge de cours d'eau est dite « intégrée » à une digue lorsque le sommet de berge est confondu avec le pied côté rivière ou torrent du parement de ladite digue, ou est situé à moins de 5 mètres de celui-ci (fig. 4). **Si le sommet de berge est à plus de 5 mètres du pied de digue, on peut en effet considérer que l'on dispose d'une marge de sécurité suffisante pour laisser les ligneux se développer sur la berge sans conséquence fâcheuse pour la digue, à condition toutefois de pratiquer une surveillance de routine adéquate.**

Pour mieux évaluer les risques liés aux ligneux se développant sur les digues ou sur les berges intégrées à une digue, des études ont été conduites, notamment dans le cadre du projet Géni'Alp, sur les enracinements des arbres et arbustes susceptibles de s'y trouver. Ces études ont consisté à dessoucheur des arbres pour caractériser la structure globale de leurs systèmes racinaires (forme, dimension, distribution des racines, spécificités morphologiques, volume d'encombrement et phénomène de décomposition racinaire). Ces analyses permettent d'affiner les recommandations pour la mise en œuvre des techniques de génie végétal sur une berge intégrée à une digue.

4.1.5.1. Les paramètres contrôlant la structure des systèmes racinaires : impacts sur les digues

Il existe **quatre types d'enracinement : traçant, fasciculé, pivotant et mixte** (Köstler *et al.* 1968). Chaque type induit des risques différents pour les digues à moyen et long terme (Zanetti 2010).

Un **système traçant** est peu résistant aux contraintes d'arrachement mais assure en contrepartie une fixation de la partie superficielle du sol face au ruissellement ou au courant. Ce type de structure est dangereux pour la digue



Fig. 6 - Conséquences d'un renard hydraulique sur le barrage des Ouches (Puy-de-Dôme - France).

si les racines s'enfoncent dans le corps de l'ouvrage ou dans sa fondation à l'horizontale et le traversent en partie.

Un **système fasciculé** présente une bonne résistance à l'arrachement du fait de la répartition dense et homogène des racines, mais possède un volume d'encombrement élevé, nuisible pour la structure en génie civil en cas de pourrissement ou d'arrachage.

Un **système pivotant** mature génère un risque pour les digues car il pénètre le corps du remblai. Il assure un bon ancrage de l'arbre par son ou ses pivots, mais pose cependant des problèmes de déstructuration des matériaux. Les pivots de gros diamètre engendrent en outre un risque d'effondrement après leur pourrissement.

Un **système racinaire à structure mixte**, composé de racines horizontales et verticales, rassemble les avantages et inconvénients précédemment énoncés pour les systèmes traçants et pivotants.

Les paramètres influençant la structure des systèmes racinaires sont essentiellement :

- la **position de l'arbre sur le talus** (parement de la digue ou berge), qui conditionne l'accès à l'eau ;
- les **propriétés des matériaux de la digue ou de la berge** (granulométrie, sédimentométrie, etc.).

→ **Structure racinaire et position de l'arbre sur la digue ou la berge**

Les arbres positionnés en pied de berge ou de digue et proches de l'eau ont généralement des systèmes traçants. On observe chez la plupart des espèces une galette racinaire plane qui épouse la surface supérieure de la nappe par un nombre très important de radicelles. En effet, l'essentiel des essences de bord de cours d'eau ont d'importants besoins en eau pour se développer, mais n'émettent pas de racines sous le niveau permanent des eaux (asphyxie), à l'exception des aulnes qui ont des racines capables de capter l'oxygène présent dans l'eau.

Sur les zones situées en milieu de digue et de berge, les systèmes racinaires sont généralement mixtes ou fasciculés. Dans ces situations, les racines se développent en profondeur pour capter l'eau. Une fois que les pivots ont atteint l'eau, ils se subdivisent en racines fines et radicelles absorbantes.

En haut de berge ou de digue, sur matériaux grossiers et drainants, et lorsque la nappe est trop lointaine (> 3 m), le sol sec et pauvre est peu propice aux racines : les systèmes racinaires restent alors superficiels, sauf dans les climats très humides en été qui empêchent le dessèchement du substrat.

→ **Structure racinaire et matériaux**

La granulométrie des matériaux induit des modifications de la structure racinaire. Dans les matériaux grossiers (sablo-graveleux), les racines ont une morphologie irrégulière (marquée par la présence de galets) et sont moins nombreuses que dans les matériaux fins (sablo-limoneux).

Dans ces derniers, les racines sont nombreuses et ont une morphologie régulière.

Sur matériaux grossiers, les arbres développent un système racinaire à structure mixte, tandis que sur matériaux fins, on observe souvent des systèmes à structure fasciculée. **La structure racinaire dépend beaucoup plus des conditions de développement (accès à l'eau et nature des matériaux) que de l'espèce végétale.**

4.1.5.2. **Décomposition racinaire et risques engendrés pour les digues**

Tandis que la décomposition des pivots et du cœur des souches génère des risques d'effondrements localisés des talus de digue (fig. 5), celle des grandes racines traversantes crée un risque de formation de renard hydraulique. Le renard hydraulique est une érosion interne de conduit qui se matérialise par l'entraînement des particules des parois d'un conduit ou d'une fissure dans le sol (fig. 6).

Lors de l'étude sur le terrain de la dégradation naturelle des racines, la date de leur mort est souvent inconnue, mais **l'état visuel de dégradation renseigne sur les modalités du phénomène de décomposition**. La **texture** (sciure, copeaux, bois encore consistant), la **structure** (état de conservation du cœur, du duramen, de l'aubier et de l'écorce) ainsi que les **traces d'attaque du bois** (champignons ou insectes) **peuvent être observées**. Cette caractérisation de l'état de décomposition permet de déterminer le moment à partir duquel les racines pourries sont susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiel pouvant générer l'apparition de désordres dans les ouvrages.

Dans les matériaux faiblement cohésifs (sables, graviers, alluvions grossiers, etc.), le réarrangement spontané comble les zones de décomposition au fur et à mesure que le bois pourrit. Ainsi, le bois en décomposition n'accroît que peu le risque de circulation d'eau car ces matériaux sont déjà perméables naturellement.

Par contre, dans les matériaux fins et cohésifs (limoneux, argilo-limoneux), les vides créés par la décomposition des racines persistent longtemps. Si cela n'est pas nécessairement problématique sur une berge, cela l'est beaucoup plus sur une digue dont la fonction principale est de contenir la charge hydraulique et les écoulements en période de crue.

Indépendamment du type de matériau, les racines peuvent créer des galeries lorsque le bois de cœur se désagrège plus rapidement que le bois périphérique ou l'écorce. La présence de matière organique liée à la décomposition des racines est ainsi favorable à la colonisation des galeries de racines mortes par les racines vivantes des végétaux implantés à proximité (fig. 7).



Fig. 7 - Départ de galerie créée par une racine décomposée en pied de digue dans des matériaux cohésifs.



Fig. 8 - Système racinaire avec deux longues racines traçantes pénétrant la digue.

4.1.5.3. Synthèse et préconisations

La végétation arborée et arbustive sur les berges remplit de multiples fonctions positives sur les plans écologique, mécanique et paysager. Les techniques de génie végétal sont donc fortement recommandées pour la protection des berges si, bien sûr, une telle protection est nécessaire. Aucune restriction n'existe lorsque ces berges ne sont pas intégrées à des digues ou lorsque qu'il faut protéger la berge qui supporte la digue (végétalisation possible de la partie inférieure de la berge située sous la digue – fig. 4).

Cependant, les configurations dans lesquelles la berge est intégrée à une digue, certes minoritaires en termes de linéaire mais importantes en termes d'enjeux de sécurité, imposent de rester vigilant quant à la colonisation des espèces végétales implantées à l'interface berge/digue. En effet, certaines essences arborées développent de grandes et grosses racines, susceptibles de traverser une partie voire la totalité de la digue (fig. 8) et menaçant de ce fait la sécurité de l'ouvrage. Les vieilles souches, ayant un volume d'encombrement très important, génèrent la désstructuration d'une partie importante de l'ouvrage en cas de basculement de l'arbre par le vent ou le courant (fig. 9). **Les digues remplissant des fonctions de protection des biens et des personnes contre les inondations, leur bon fonctionnement apparaît donc comme une priorité. Pour remplir ce rôle sécuritaire, il est nécessaire d'éviter tout risque nuisant à leur bonne étanchéité ou stabilité.**

Par ailleurs, afin de suivre l'état de ces digues dans le temps, il est indispensable de pouvoir les surveiller visuellement. Un tel contrôle visuel n'est malheureusement pas compatible avec la présence de ligneux qui peuvent cacher d'éventuels désordres, voire empêcher ou gêner la progression pédestre sur les ouvrages. Sans compter que la présence d'un couvert boisé favorise la venue d'animaux fouisseurs (blaireau, ragondin, rat musqué, lapin, etc.) qui creusent leur terrier dans les digues.



Fig. 9 - Arrachement par basculement d'une souche de mélèze.

Il est cependant difficile d'établir des règles générales pour tous les ouvrages hydrauliques et cours d'eau. En effet, chaque cas est particulier en termes d'enjeux sécuritaire, social, écologique et paysager, ainsi qu'en termes de régime hydrologique, de type et de violence de crue, de matériaux constitutifs, de dimension, de climat, de position de la digue par rapport à la berge, de marge de sécurité, etc.

Gardons à l'esprit qu'au-delà d'une distance de l'ordre de 5 mètres par rapport au pied de digue, le gestionnaire a toute latitude pour végétaliser les berges.

Un diagnostic précis et le développement d'un plan de gestion adapté sont nécessaires pour tout choix qui s'écarte de la règle de base consistant à maintenir, sur les digues et plus généralement sur les ouvrages hydrauliques en terre, une végétation au stade uniquement herbacé. Il s'agit ainsi d'éviter totalement la présence d'arbres ou grands arbustes sur ces ouvrages et, lorsqu'ils sont déjà boisés, d'éviter au moins que ces arbres et leurs souches n'atteignent de grandes dimensions en hauteur ou diamètre.

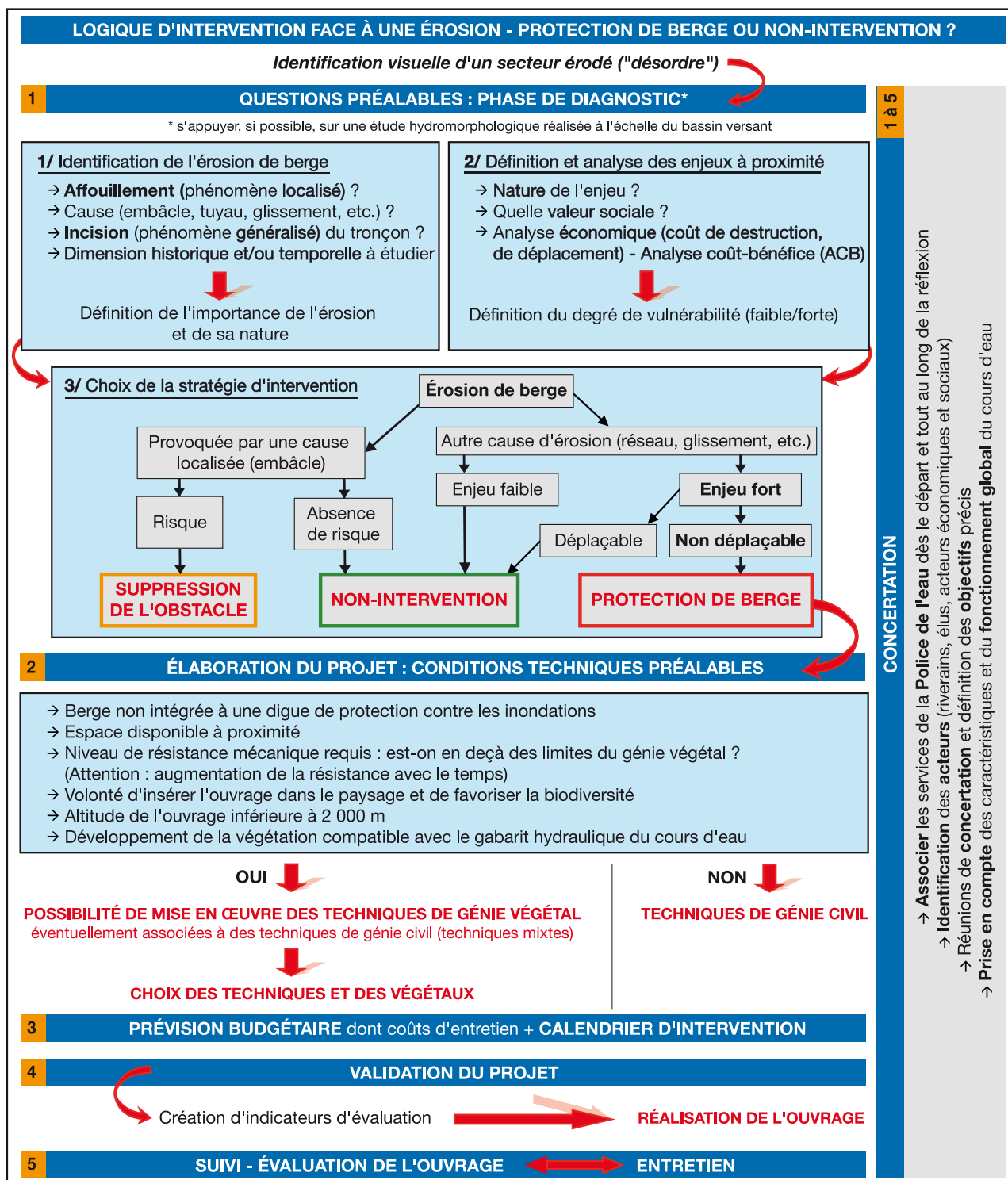


Fig. 10 - Schéma synthétique d'aide à la décision en présence d'érosion de berge.

Cette règle ne souffre d'exception que sur les ouvrages à profil transversal très confortable, avec des pentes faibles de talus et/ou une crête large, voire lorsqu'ils sont équipés de dispositifs étanches robustes (paroi moulée), cas rare dans les aménagements de montagne.

Il faut cependant noter que sur les ouvrages à profil étroit et talus raides, les arbres restent parfois les seuls éléments assurant temporairement une certaine stabilité à l'ouvrage. Leur suppression implique donc de refaire l'ouvrage dans sa totalité, ce qui ne peut se faire que dans le cadre d'un projet de confortement comportant une étude de diagnostic préalable.

Bien que cela soit parfois difficilement acceptable aux niveaux social, écologique et paysager, il n'est pas souhaitable d'implanter des arbres sur les ouvrages hydrauliques en remblai, neufs ou remis en état. **La structure de protection de surface à recommander pour les digues en remblai modernes est la couverture herbacée régulièrement entretenue.**

Dans les projets de réaménagement de digue, une possibilité permettant de concilier protection de berge par végétalisation (sans plus aucune restriction) et sécurité de la digue remise à niveau, est de déplacer la digue, c'est-à-dire de l'éloigner du cours d'eau afin de restaurer l'espace de mobilité de ce dernier sur les tronçons où cela s'avère possible. De telles solutions de travaux apparaissent progressivement.

4.2. La définition d'une stratégie adaptée face à l'érosion : une nécessaire approche méthodologique

4.2.1. Abandon, déplacement, protection : quels éléments prendre en compte pour décider ?

« Toute intervention doit [...] être précédée d'une phase de diagnostic du comportement de la rivière sur un tronçon bien plus long que celui sur lequel on compte intervenir. On devra bien se garder d'établir un diagnostic au vu de quelques particularités locales, comme les ponts ou les seuils [...] ou se réfugier derrière le caractère exceptionnel d'un épisode de crue [...]. Au total, une vision suffisamment large dans l'espace et dans le temps est la meilleure aide pour l'aménageur ou le gestionnaire. La rivière est son propre architecte et sait montrer les solutions à qui sait l'observer » (Degoutte 2006).

L'identification d'une érosion de berge menaçant un ou plusieurs enjeux fait émerger plusieurs interrogations pour la collectivité. Dans la pratique, les prises de décisions ne

reposent pas forcément sur une démarche organisée et complète. Or, d'après les observations énoncées par le guide de l'AERM&C (1999) « beaucoup de dysfonctionnements des rivières découlent des dysfonctionnements décisionnels. [...] Ils relèvent de simplifications, de raccourcis, d'une inadéquation de l'échelle de travail adoptée et peuvent être considérés comme un non-respect des exigences méthodologiques ».

L'idée est donc ici de **détailler ce processus décisionnel, soit de distinguer les grandes phases intervenant dans le processus de décision, et qui mènent à la protection de la berge ou, au contraire, à ne pas intervenir.**

On s'appuiera sur la figure 10 ci-après pour déterminer les grandes phases du processus décisionnel. **Cette figure n'a pas vocation à être exhaustive. Elle ne peut pas constituer un outil unique et indiscutable de décision, car celle-ci doit être appuyée, plus largement, sur tout un panel d'éléments qu'il convient de prendre en compte « sur le terrain », en fonction de l'expérience du technicien, et qu'il n'est pas possible d'intégrer ici.** Elle a néanmoins pour but de poser les bases de la démarche en formalisant les principales composantes influant sur la décision.

4.2.2. Quelques éléments de réflexion à l'usage des gestionnaires

Chaque point de ce chapitre renvoie aux grands titres de la figure 10.

→ 1 – Questions préalables : phase de diagnostic

La première étape d'une démarche logique de réflexion porte sur :

- 1/ l'identification de l'érosion ;
- 2/ l'analyse des enjeux à proximité afin d'établir l'importance de chacun (degré faible/fort) ;
- 3/ le choix de la stratégie d'intervention.

1/ Lors de la constatation visuelle d'une érosion de berge, il convient de s'interroger sur son **ampleur et de bien distinguer l'affouillement, phénomène localisé, et l'incision, phénomène généralisé.**

Le **diagnostic** doit commencer par répondre aux questions suivantes :

- s'agit-il d'un affouillement causé par un simple embâcle (obstruction du cours d'eau par une accumulation de bois mort et autres débris au niveau d'un point dur), d'un réseau mis à jour, d'un rétrécissement du cours d'eau, d'un glissement, etc. ?
- s'agit-il d'un phénomène d'incision généralisée sur le tronçon ?

À défaut de distinguer ces deux notions au travers du diagnostic, un ouvrage de protection de berge, qu'il fasse appel aux techniques végétales, mixtes ou minérales, sera mal conçu.

Il est également opportun de **prendre en compte le temps de retour de l'événement** (dimension historique) qui a engendré le « désordre », c'est-à-dire la crue.

Il est fondamental d'être « **très attentif aux problèmes généralisés et bien rechercher leur véritable cause avant d'envisager une protection, même dans des secteurs à forte vulnérabilité** » (Degoutte 2006). En présence de zones d'érosion ou de glissement de berge sur un tronçon, il est possible que celui-ci soit sujet à l'incision en raison d'un déficit du transit sédimentaire. **Il convient alors de traiter la cause (le déficit en matériaux solides) et non les conséquences (l'érosion des berges).**

La prise en compte de l'aspect historique et temporel de l'évolution du tracé en plan du cours d'eau au sein de sa plaine alluviale (analyse diachronique) permet également d'évaluer l'importance de l'érosion, sa probable évolution (sens et vitesse) et la zone effectivement menacée.

Dans le cas des rivières de montagne, le plus souvent à lit mobile, on peut se retrouver confronté à des problèmes locaux auxquels s'ajoutent des évolutions plus globales d'incision ou de reptation de méandre (translation progressive vers l'aval).

2/ Le diagnostic doit également **prendre en compte les enjeux à proximité, menacés par l'érosion, avec une attention particulière à leur nature et leur valeur.** Il est important d'évaluer de manière objective les dégâts qui pourraient être occasionnés par l'avancée de l'érosion de la berge. Il s'agit de mettre en évidence les conséquences d'une aggravation de celle-ci et, ainsi, **définir le degré de vulnérabilité de la zone.**

Il s'agit donc de tenir compte de **la nature et de la valeur sociale de l'enjeu menacé**, et de poser très rapidement **la question des coûts** dus à sa destruction (manque à gagner, perte de terre arable ou constructible, etc.) ou à son déplacement (coût des travaux) **comme élément de diagnostic et de concertation avec les partenaires techniques** (Police de l'eau, Région, canton, etc.) **et les acteurs concernés** (riverains, agriculteurs, propriétaire de la berge, etc.).

Il convient ainsi de **comparer le coût d'une protection de berge** (qu'il s'agisse de génie végétal ou de génie civil) et de son entretien, d'une part, **avec la valeur marchande des terres menacées par l'érosion et leur productivité**, d'autre part (Degoutte 2006). Sur l'Allier, par exemple, le coût moyen de l'acquisition d'un hectare de terre en bordure de cours d'eau dans le cadre d'une politique de maîtrise foncière est de 3 220 €/ha (Saillard 2006). En rapport au prix de 100 mètres linéaires de protection de berge en enrochement estimé entre 15 000 et 30 000 €, le coût d'acquisition d'une terre menacée par l'érosion, en vue de la préservation de la dynamique latérale du cours d'eau, peut s'avérer particulièrement rentable, tant financièrement que d'un point de vue environnemental.

En présence d'enjeux agricoles, il est ainsi préférable de ne pas protéger la berge. Non seulement le **coût d'une protection de berge est de 8 à 75 fois plus élevé que le coût du terrain** (Degoutte 2006), mais, en outre, la

recharge du lit mineur en matériaux solides stockés sur les berges est bénéfique au rééquilibrage sédimentaire du cours d'eau et à son bon fonctionnement morphologique.

Dans d'autres cas, il est par contre évident que des mesures de protection sont indispensables au vu des coûts de déplacement, de la valeur vénale du terrain ou de l'importance stratégique de l'enjeu existant.

On peut également s'appuyer sur l'échelle de hiérarchisation présentée précédemment (fig. 2 et chap. I.4.1.4).

3/ Ces éléments de diagnostic permettent de **définir une stratégie d'intervention opportune.** En fonction de la cause de l'érosion et des enjeux, la stratégie à mettre en place varie entre une simple **suppression de l'obstacle à l'écoulement, la protection de la berge ou la non-intervention.**

En présence d'un embâcle de bois mort, la suppression de l'obstacle à l'écoulement est préconisée dans la plupart des cas, dans une logique de protection de la sécurité des biens et des personnes face au risque « inondation ». Il s'agit d'une opération que l'on peut qualifier « d'entretien » – l'embâcle est retiré du cours d'eau – et il n'y a pas d'intervention directe sur les berges. En l'absence de risque en aval de l'embâcle, et dans certains cas (simple déviation du lit par l'embâcle par exemple), le gestionnaire peut être amené à décider de ne pas intervenir et éventuellement conserver l'obstacle. Cela s'apprécie au cas par cas, à partir des compétences du technicien et de son niveau d'expertise.

Pour tout autre phénomène susceptible d'engendrer une érosion, et après avoir déterminé **le degré d'importance de l'enjeu**, si ce dernier **est considéré comme « faible », la non-intervention est préférable.** Il en est de même lorsque l'enjeu est fort mais néanmoins déplaçable selon des prix raisonnables. En revanche, **lorsqu'un enjeu fort n'est pas déplaçable** compte tenu du prix des travaux ou de son emprise, **une intervention de protection de berge est préconisée.**

Cette première phase de diagnostic est indispensable afin que le maître d'ouvrage puisse décider d'une intervention ou, à l'inverse, de laisser l'érosion et le cours d'eau évoluer naturellement. Elle doit permettre de poser les bases d'une concertation autour de la pertinence d'un ouvrage de protection de berge avec l'ensemble des acteurs concernés. Il est ainsi important de noter que **la protection ne doit pas être la réponse systématique à l'érosion d'une berge : elle n'est pas une fin en soi et ne doit constituer qu'un dernier recours.**

L'aléa est une notion importante dans la définition du risque, et doit être pris en compte dans la phase de diagnostic et de concertation. Cependant, il n'est pas déterminant dans la décision d'intervention (protection de berge) ou de non-intervention (reconquête d'un espace de mobilité). En effet, en présence d'un aléa fort face à

un enjeu faible, il n'y aura pas d'intervention, dans une volonté de laisser un espace de mobilité au cours d'eau. Inversement, face à un enjeu fort, même si l'aléa est faible, une intervention sera la plupart du temps préconisée.

Ainsi, lorsque qu'une menace est avérée, la **décision finale n'est généralement dépendante que de l'importance de la vulnérabilité et non directement de l'aléa.**

Notons que la **décision de ne pas intervenir** pour protéger la berge **ne signifie pas nécessairement** pour la collectivité « **ne rien faire** ». Hormis sur les rivières domaniales, les berges de cours d'eau sont le plus souvent des propriétés privées. Les propriétaires peuvent alors être tentés d'intervenir eux-mêmes pour protéger leur terrain. S'ils sont tenus par la réglementation française d'entretenir leurs berges, la loi ne spécifie pas qu'ils doivent permettre la libre divagation du cours d'eau.

La collectivité dispose de différents outils lui permettant de préserver certains secteurs contre la protection et la fixation du lit mineur, voire pour supprimer des protections ou des points de fixation existants. En France, elle a par exemple la possibilité de mettre en place une **servitude de mobilité des cours d'eau** au titre de l'article L. 211-12 du Code de l'environnement (chap. I.2.1.5). Celle-ci nécessite la réalisation d'une enquête publique préalable. Elle permet à la fois de mener des opérations importantes de suppression de protections de berge et d'éviter toute nouvelle mesure de protection sur le linéaire concerné, tout en protégeant l'intérêt du propriétaire. Celui-ci peut ainsi bénéficier d'une indemnisation et de la possibilité de demander le rachat de tout ou partie de son terrain. On rentre ainsi dans une **stratégie de maîtrise foncière.**

→ 1 à 5 – Concertation

La **stratégie d'intervention face à l'érosion doit également faire l'objet de concertation avec les acteurs concernés** directement (riverains, élus locaux, acteurs économiques et sociaux) et indirectement (services de l'État). L'organisation de réunions de concertation est ainsi conseillée le plus en amont possible des projets. **La concertation constitue un élément clé dans la bonne gestion d'un cours d'eau.** Elle doit perdurer tout au long de la réflexion autour du projet d'aménagement de la berge.

Les **services de Police de l'eau doivent être associés au plus tôt** dans la démarche **et tout au long de la réflexion.** Les impacts potentiels de l'ouvrage doivent être appréciés avec leur aide et prendre en compte le cours d'eau dans son ensemble. Notons qu'en France, dans le cas de mesures de protection de berges, le choix des techniques végétales seules facilite le plus souvent l'aval de la Police de l'eau et évite généralement des procédures administratives lourdes (procédure d'autorisation au titre de la rubrique 3.1.4.0 de la nomenclature « Loi sur l'eau » – chap. I.1.2.5).

→ 2 – Élaboration du projet : conditions techniques préalables

Lorsque la stratégie d'intervention s'oriente vers une protection de la berge, le gestionnaire doit **arbitrer entre l'utilisation de techniques végétales (ou mixtes) et de génie civil.** Cette décision est conditionnée par l'analyse des conditions techniques préalables et indispensables à l'utilisation du génie végétal. Il s'agit de **déterminer si les conditions limites d'utilisation du végétal sont dépassées.**

La réalisation de techniques de génie végétal nécessite généralement davantage d'**espace disponible** en arrière de la berge que les techniques de génie civil. Hormis avec l'utilisation de caissons bois, il est en effet impossible de réaliser des ouvrages en génie végétal bénéficiant de la même pente de berge que pour la mise en place de gabions ou de cunettes béton. On se reportera à la deuxième partie de ce guide, dédiée aux techniques en elles-mêmes, pour les spécifications de pentes des ouvrages (chap. II.3.2.3).

Le **niveau de résistance mécanique requis** pour la réussite de l'ouvrage est l'élément principal à prendre en compte. Le gestionnaire doit déterminer précisément quelles sont les forces tractrices appliquées sur la berge lors des crues les plus importantes afin de choisir la technique la plus adaptée en fonction de sa **résistance aux contraintes.** Celle-ci, mesurée en newton par mètre carré (N/m^2), **augmente avec le temps dans le cas des ouvrages utilisant le végétal. Celle des ouvrages minéraux a, quant à elle, tendance à diminuer.** On portera l'attention notamment sur les niveaux de résistance initiale et finale de l'ouvrage (à la réalisation puis après trois ou quatre ans). **Sa résistance est minimale juste après la réalisation.** C'est à ce moment-là qu'il est le plus vulnérable aux crues. La végétation se développe au cours des années suivantes et protège de plus en plus efficacement la berge. L'utilisation du végétal n'est possible que si les forces tractrices exercées par le cours d'eau sur l'ouvrage sont en deçà des limites de résistance des techniques végétales (chap. II.3).

Par ailleurs, en raison de l'utilisation de matériel vivant et d'espèces végétales inféodées à des conditions stationnelles particulières (climatiques, pédologiques, etc.), la réalisation d'ouvrages végétaux devient aléatoire dans les Alpes au-delà de 2 300 mètres d'**altitude** environ. Les saules d'altitude atteignent dans certaines situations des altitudes de 2 400 à 2 500 mètres, mais au-delà de 2 200 mètres environ, les conditions d'utilisation et de croissance ne sont plus optimales (part. III).

Dernière condition technique préalable, la **capacité hydraulique du cours d'eau** doit être suffisante pour permettre le développement de végétation. Sur un cours d'eau de faible largeur, il sera potentiellement malvenu de réaliser un ouvrage en génie végétal en raison des risques supplémentaires d'embâcle induits par la présence d'une végétation dense et abondante. L'écoulement des eaux de crue vers l'aval risque de s'en trouver gêné par le ralentissement voire le blocage des eaux, impliquant un débordement à l'amont.

Si l'ensemble de ces conditions préalables sont remplies, il est préférable de recourir aux techniques végétales ou à des techniques mixtes. Il s'agit ensuite de choisir la combinaison de techniques et les espèces à utiliser pour élaborer le projet technique qui permettra de répondre à la problématique initiale d'érosion de berge.

Si les conditions ne sont pas réunies, le gestionnaire n'a d'autres choix que de faire appel au génie civil.

→ 3 – Prévision budgétaire et calendrier d'intervention

L'estimation des coûts et la programmation budgétaire apparaissent bien souvent comme des éléments déterminants pour l'adoption du projet. Le coût d'un ouvrage variant fortement en fonction de sa conception (combinaison de techniques choisie, choix des matériaux – chap. 1.3.2.3) et de paramètres externes (disponibilité directe des matériaux, par exemple), il est complexe de fournir un ordre d'idée précis des prix.

Pour les **matériaux** (bois, boutures, plants et éventuels blocs), **on privilégiera principalement le recours à des circuits courts d'approvisionnement.** La disponibilité des matériaux à proximité est un facteur de diminution des coûts et de limitation de l'impact environnemental (limitation des coûts de transport et des émissions de gaz à effet de serre). Il est donc pertinent de mener une campagne de terrain visant à déterminer la présence des espèces végétales qui pourront être utilisées. La troisième partie de ce guide fournit des éléments utiles à l'identification des espèces végétales utilisables dans les ouvrages de génie végétal. L'élaboration d'un budget précis nécessite par ailleurs la programmation d'opérations régulières d'entretien. Il est donc important de prévoir entre 10 et 15 % du montant total de l'ouvrage.

La problématique du **calendrier d'intervention**, contrainte importante pour l'utilisation du génie végétal, doit également être prise en compte afin d'assurer la réussite de l'ouvrage (chap. II.2.2.3). De manière générale, **les travaux doivent être réalisés en dehors de la période végétative afin de permettre une bonne reprise des végétaux.** La récolte des matériaux végétaux doit ainsi être réalisée de préférence avant la fin de la période de dormance et le débourrement des bourgeons. Cela complique l'identification des espèces. Plus spécifiquement en rivière de montagne et de piémont, cette contrainte est accompagnée du **raccourcissement de la fenêtre d'intervention**

en raison des périodes d'enneigement et de hautes eaux printanières ou estivales. Celles-ci risquent d'endommager l'ouvrage ou de nuire à la reprise végétative. Les végétaux rentrant à peine dans leur période végétative, ils ne sont pas encore assez résistants pour subir de fortes crues. On le comprend alors aisément, plus le chantier est réalisé en altitude et en rivière à forte pente, plus les contraintes sont fortes et plus l'ouvrage doit être réfléchi et dimensionné (part. II).

→ 4 – Validation du projet et réalisation

Il est pertinent de **créer des indicateurs d'évaluation** pour **assurer un suivi à moyen ou long terme** de l'ouvrage. À court terme, il peut s'agir du taux de reprise des boutures ou plants. Sur un temps plus long, il s'agit de suivre et évaluer le comportement de l'ouvrage et sa résistance en cas de crue, si possible par une reconnaissance de terrain. Cela permet, si nécessaire, d'envisager d'**éventuelles mesures correctives** pour renforcer l'ouvrage, voire tout simplement l'ajout de boutures ou de plants complémentaires afin de remplacer ceux qui n'auraient pas repris.

Il peut aussi être intéressant de mettre en œuvre des indicateurs liés à la biodiversité afin d'établir un suivi dans le temps des différentes communautés faunistiques et floristiques. La réalisation d'un état des lieux avant intervention (lorsqu'il est possible) peut constituer un apport scientifique important, s'il est complété dans les années suivantes par des relevés rigoureux et réguliers.

→ 5 – Suivi, évaluation et entretien de l'ouvrage

Enfin, un entretien régulier des protections de berge doit être planifié en fonction des techniques mises en œuvre, des objectifs de protection et des impacts de la végétation sur les flux ou sur les biens. Ces opérations peuvent ainsi aller de la simple surveillance et du réajustement, au recépage. L'ouvrage doit faire l'objet d'une surveillance accrue au cours des premières années afin de vérifier la bonne tenue de l'aménagement, la bonne reprise végétative des plants et boutures, et réparer d'éventuels dégâts causés par une crue précoce ou par la sécheresse.

Il est par ailleurs indispensable d'assurer un suivi dans le temps afin de prévenir l'implantation d'espèces invasives sur l'ouvrage dans les premières années suivant sa création. Des interventions d'arrachage précoce des plants de renouée du Japon, par exemple, permettent de lutter efficacement contre son implantation sur l'ouvrage et sa dispersion. Pour cela, un repérage de terrain suite aux crues est nécessaire.

5. Conclusion : du bon usage du génie végétal

Le génie végétal n'est pas un but en soi. Il est un outil à disposition du gestionnaire et non pas un concept d'aménagement.

Grâce à un grand nombre de solutions techniques, il offre une grande souplesse d'utilisation et peut donc faire l'objet de nombreuses applications aux objectifs variés (endiguement, restauration de niveaux R1, R2, R3 – fig. 4, chap. 1.3.1). Ainsi, même s'il peut être utilisé à des fins de protection pure et simple (crues, érosion), il intervient néanmoins au service d'une logique d'aménagement durable du territoire donnant la priorité au respect de l'environnement et à la préservation des milieux aquatiques.

Le génie végétal en berge de cours d'eau n'est pas une simple action de « verdissement » et d'intégration paysagère. Il s'agit véritablement d'une construction basée sur des matériaux vivants, s'inspirant des modèles naturels et répondant à des critères techniques et mécaniques exigeants (Adam *et al.* 2008). L'objectif est bien de fixer et de stabiliser la berge, et toute autre utilisation de ces techniques ne relèverait pas du génie végétal mais d'aménagement paysager.

Dans le cadre de travaux sécuritaires de protection contre les crues et/ou contre l'érosion, le génie végétal constitue une alternative intéressante à des techniques minérales issues du génie civil. Il est en général préférable de laisser divaguer le cours d'eau lorsque le contexte le permet. Son utilisation est ainsi parfois un « pis-aller » lorsqu'il n'est pas possible de faire autrement que d'intervenir pour protéger une berge. Les politiques publiques le considèrent comme un outil permettant de diminuer l'impact environnemental de la protection.

Mais il est également un outil particulièrement efficace au service d'objectifs environnementaux de restauration des cours d'eau, bien au-delà de son seul intérêt paysager. Il constitue l'un des outils de base en vue de diversifier les milieux tout en encadrant la mobilité latérale du lit mineur lorsque cela s'avère nécessaire.

Quel que soit son champ d'application (restauration ou protection), la réussite d'un ouvrage de génie végétal ne se mesure pas uniquement par des aspects techniques. Certes, une protection efficace des biens et des personnes contre les problèmes d'érosion constitue l'un des indica-

teurs de cette réussite. Mais l'intégration de l'ouvrage à son milieu récepteur sur le plan écologique doit être optimale. Adam (2008) estime qu'un ouvrage n'est réellement réussi que si « *le milieu récepteur [...] acquiert des potentialités et des valeurs écologiques supérieures à [l'état] initial et [...] à ce qu'un ouvrage classique aurait pu apporter* ».

Au-delà de son champ d'application, la question du recours au génie végétal s'intègre au sein d'une problématique plus large d'aménagement durable du territoire à l'échelle du bassin versant. La question de la place laissée au cours d'eau, à sa dynamique latérale et à ses débordements est l'un des éléments fondamentaux pour un projet de territoire cohérent et une gestion globale, conciliant activités humaines et préservation d'espaces naturels ou semi-naturels.

Comme on l'a vu précédemment, la préservation ou la création d'un espace de mobilité réservé au cours d'eau constitue un enjeu environnemental majeur. Il s'agit d'un moyen efficace de limiter l'incision des rivières et donc l'abaissement des nappes d'accompagnement. Cela contribue par conséquent à préserver l'accès à la ressource en eau. Au-delà des objectifs environnementaux fixés par les politiques publiques, l'existence d'un espace de mobilité participe également à la préservation des enjeux socio-économiques face aux risques d'inondation par la création de zones de rétention temporaire ou d'écroulement de l'onde de crue en amont des secteurs à enjeu.

Il est ainsi fondamental :

- d'intégrer la **problématique de l'érosion de berge dans une logique de territoire** tenant compte des enjeux tant socio-économiques qu'environnementaux, **à l'échelle globale du bassin versant** et du tronçon de cours d'eau ;
- de considérer la création d'une **protection contre l'érosion comme un dernier recours et non comme une solution systématique** d'aménagement ;
- de **privilégier des travaux de restauration** de cours d'eau ambitieux intégrant l'objectif de **constitution** (ou de préservation) **d'un espace de mobilité** ;
- de **privilégier le recours aux ouvrages de protection de berge** aux seuls cas où il est indispensable d'intervenir.

Si le génie végétal constitue la solution à privilégier lorsque le choix d'aménagement s'oriente vers la protection de berge, il est néanmoins inopportun de l'opposer totalement au génie civil et de rejeter en bloc l'utilisation de ce dernier. Les deux peuvent en effet être complémentaires dans le cadre de techniques mixtes combinant à la fois matériaux vivants et inertes. L'un et l'autre sont bien souvent nécessaires, notamment en rivière de montagne où leur utilisation commune est justifiée par les caractéristiques mêmes des cours d'eau et la présence, à l'état naturel, de blocs de diamètre plus ou moins important (fig. 1). Dans certains contextes, le recours au génie civil pur peut également être justifié, notamment dans le cas de contraintes mécaniques très élevées.

Le choix technique d'aménagement doit s'appuyer sur une démarche logique et pragmatique de conception essentiellement basée sur la pleine compréhension des processus en action et des enjeux à l'échelle du site, mais, plus largement, du tronçon et du bassin versant. Le gestionnaire ne peut en aucun cas se départir d'une telle démarche au risque de certaines désillusions.



Fig. 1 - Modèle de berges naturelles en cours d'eau de montagne.

La réussite d'un ouvrage de génie végétal est dépendante de nombreux facteurs de natures diverses que le concepteur doit connaître et prendre en compte lors de l'élaboration du projet. Cela nécessite un niveau d'expertise important et fait appel à des connaissances pluridisciplinaires. C'est pourquoi, sans nier la difficulté d'élaboration et de réalisation d'un ouvrage en génie civil, le recours au génie végétal est complexe et nécessite un haut niveau d'expertise ainsi que beaucoup d'expérience.

Les guides techniques sur le génie végétal constituent un appui pour le concepteur et visent à partager une partie des savoirs techniques sur le sujet. Ils ne remplacent néanmoins pas l'expertise et l'expérience mais visent à les compléter. Le présent ouvrage vient en complément d'autres, réalisés précédemment et dont la qualité est indéniable (Lachat 1994 ; Zeh 2007 ; Adam *et al.* 2008), afin de préciser des éléments spécifiques aux rivières de montagne.

En effet, en présence d'un contexte montagnard, les conditions d'utilisation de végétaux pour la protection de berges de cours d'eau diffèrent très largement d'un contexte de plaine. Gestionnaires et scientifiques manquent, encore aujourd'hui, de connaissances concernant la résistance mécanique des ouvrages et des végétaux ou encore le niveau de diversité végétale et animale des différents types d'aménagement, mais également de retours d'expériences. Les prochaines parties visent ainsi à fournir des éléments de connaissance sur ces sujets fondamentaux.

La deuxième partie du présent guide fournit ainsi des bases techniques utiles à la conception d'ouvrages en rivière de montagne, tandis que la troisième partie apporte des éléments de connaissance nécessaires au choix des espèces végétales dans le contexte des Alpes du Nord.

Partie II



Recueil d'expériences techniques

1. **Introduction**
2. **Le génie végétal en rivière de montagne : histoire et spécificités**
3. **Approche mécanique**
4. **Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants**
5. **Ouvrages transversaux en bois**
6. **Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles**

André Evette, Damien Roman, Jean-Baptiste Barré, Paul Cavallé, Fabien Espinasse

Génie Végétal en rivière de montagne

1. Introduction

1.1. Objectifs généraux de cette deuxième partie

Cette partie vise à recenser et à mettre à disposition les expériences techniques des gestionnaires et les connaissances théoriques et pratiques disponibles sur les techniques végétales de protection de berges et les ouvrages bois en rivière de montagne. C'est-à-dire sur des cours d'eau présentant une forte pente (profil en long supérieur à 1 %), des pentes de berges souvent abruptes, un transport solide important et/ou situés en altitude (étages montagnard et subalpin). Cependant, comme les ouvrages existants sont peu nombreux en rivière de montagne, quelques exemples sont issus de zones non spécifiquement montagnardes, mais illustrent des techniques utilisables sur certains cours d'eau de montagne.

Toutefois, il ne s'agit en aucun cas de fournir des outils clé en main pour réaliser des aménagements. En effet, la conception de ces ouvrages nécessite des compétences pluridisciplinaires et leur réalisation demande une analyse fine des paramètres environnementaux, relevant de différents domaines techniques et scientifiques. Elle requiert également des observations de terrain préalables et beaucoup de recul dans leur analyse. L'expérience apparaît comme particulièrement utile et importante, notamment dans le domaine du génie végétal.

Par contre, cette partie devrait fournir quelques éléments qui permettront d'affiner et d'élargir la réflexion lors de la conception des ouvrages.

1.2. Présentation du plan de la deuxième partie

1.2.1. Histoire et spécificités du génie végétal en rivière de montagne

Ce premier chapitre vise à repositionner le génie végétal dans son contexte historique. Il s'agit de techniques anciennes qui ont fait l'objet de nombreux développements au cours des siècles qui nous ont précédés.

Ce chapitre comprend également des éléments relatifs à la spécificité de l'utilisation de techniques végétales en rivière de montagne. La végétation, les conditions hydrologiques et climatiques sont en effet différentes en montagne par rapport à ce que l'on rencontre en plaine. Ces conditions particulières demandent à être analysées finement lors de la conception et de la réalisation d'un ouvrage.

1.2.2. Approche mécanique

Ce deuxième chapitre synthétise les connaissances actuelles sur les limites mécaniques des ouvrages de génie végétal. Il s'agit de mieux comprendre comment les différentes techniques peuvent résister aux contraintes d'arrachement exercées par les cours d'eau. Il nous est apparu nécessaire de travailler cet aspect car c'est une limite importante des techniques de génie végétal. De plus, c'est souvent sur ce point que leurs détracteurs s'appuient pour dire que le génie végétal ne peut pas être mis en place. Ainsi, une meilleure diffusion de la connaissance des limites mécaniques de ces ouvrages pourrait vraisemblablement contribuer à briser quelques préjugés les concernant.

Les connaissances sur la résistance mécanique des ouvrages de génie végétal en berges de cours d'eau sont principalement issues de travaux menés par les chercheurs autrichiens de l'Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau de Vienne.

1.2.3. Principes, techniques et exemples de réalisations

Ce chapitre est consacré aux retours d'expériences et au recueil de techniques utilisées en rivière de montagne, incluant le génie végétal ainsi que les enrochements végétalisés. Elle décrit un certain nombre d'ouvrages utilisant des végétaux sur des rivières à forte pente et en altitude. Dans la mesure du possible, des éléments de contexte décrivant la situation initiale, des coupes types et des indications sur la végétation utilisée sont fournis.

Les chantiers pilotes réalisés en France et en Suisse, dans le cadre du projet Génie'Alp, sont notamment décrits. Dans ce chapitre, un ouvrage italien de plus de vingt ans et réalisé en cours d'eau de montagne est également présenté. On peut, en effet, trouver dans les Alpes italiennes des ouvrages anciens réalisés avec des techniques de génie végétal.

Une partie spécifique est dédiée aux ouvrages transversaux en bois, construits dans le lit afin de stabiliser le profil en long, et donc indirectement les berges des cours d'eaux et torrents.

1.2.4. Apports en termes de biodiversité du génie végétal

Ce dernier chapitre concerne la biodiversité qui s'épanouit sur les berges de cours d'eau. Il s'agit dans un premier temps de caractériser et de quantifier les biodiversités animales et végétales présentes sur les ouvrages de génie végétal et de génie civil. Le choix de la technique va en effet influencer sur le type et le nombre d'espèces animales et végétales qui vont pouvoir s'installer sur une berge aménagée. Le développement des espèces exotiques envahissantes va aussi différer en fonction des choix initiaux d'aménagement.

L'objectif de cette partie est de fournir des éléments de compréhension à destination des gestionnaires de cours d'eau, pour appréhender dès la phase de projet, l'impact que pourront avoir leurs aménagements sur la biodiversité des berges de cours d'eau.

2. Le génie végétal en rivière de montagne : histoire et spécificités

2.1. Leçons de l'histoire

2.1.1. Le génie végétal : des techniques ancestrales

L'origine des techniques végétales remonte loin dans le passé, puisque déjà au premier siècle avant J.-C., Columelle, agronome romain, décrit la façon d'utiliser des boutures de saule (Evette *et al.* 2009). En Chine, les traces de l'utilisation des végétaux sont très anciennes et pourraient remonter à plus de 2 000 ans avant J.-C. (Stokes *et al.* 2010).

Et si l'on trouve déjà des guides donnant des informations techniques sur les ouvrages de génie végétal dès le 18^e siècle, c'est bien au 19^e que ces techniques prennent leur essor dans les Alpes. En effet, à cette période, les Alpes font face à des phénomènes de déboisement intenses en lien notamment avec une pression de pâturage élevée. L'absence de végétation ligneuse sur de nombreux bassins versants génère de forts problèmes d'érosion, aggravant les phénomènes de laves et charriages torrentiels ou d'inondations. Ces désastres amènent à une prise de conscience des pouvoirs publics et à la promulgation de mesures énergiques par les gouvernements suisse, italien ou français. Ainsi, en France, des lois sur le reboisement et l'engazonnement des montagnes sont adoptées autour de 1860 (Labonne *et al.* 2007).

S'ensuivent, dans de nombreuses parties des Alpes, d'énormes travaux de restauration des terrains en montagne, incluant des ouvrages de génie civil, mais également une large part de travaux à base de génie végétal. À titre d'exemple, dans le Diois et les Baronnies (Sud de la région Rhône-Alpes), ce ne sont pas moins de 92 720 ouvrages de génie végétal de type fascines ou clayonnages qui furent construits le long des thalwegs.

De même, 760 km de ravines furent stabilisés à l'aide de matelas de branches (Evette *et al.* 2009).

Ces travaux gigantesques ont généré une importante expérience française des services de restauration des terrains en montagne (RTM) en matière de génie végétal et d'engazonnement (Bernard, Demontzey, Mathieu, Surell, Thiery, etc.) dans la deuxième moitié du 19^e siècle et au début du 20^e.



Fig. 1 - Garnissage d'un ravin par la technique de clayonnage en croisillons, services de restauration et conservation des terrains en montagne (1911).

2.1.2. Expérience ancienne sur le génie végétal en rivières et torrents de montagne

De nombreuses techniques ont été utilisées pour stabiliser le fond du lit et les berges des rivières de montagne (Labonne *et al.* 2007). Dans ce chapitre, quelques exemples seront montrés afin d'illustrer l'intérêt et les limites de ces techniques.

2.1.2.1. Stabilisation du fond du lit des rivières de montagne

Parmi les techniques de génie végétal utilisées pour stabiliser le fond des rivières et torrents de montagne (majoritairement pour des ravines et cours d'eau temporaires), on peut notamment citer les barrages en fascines, ceux en clayonnages et ceux en palissades.

Il est important de signaler qu'il est illusoire de chercher à stabiliser le fond d'un cours d'eau à écoulement permanent avec des végétaux vivants. En effet, les ligneux ne peuvent pas survivre dans des milieux constamment immergés, et les racines des arbres ne descendent quasiment pas sous le niveau de la nappe. Pour protéger une berge avec du génie végétal, il est donc indispensable d'avoir soit une protection de pied de berge en enrochement, soit d'avoir un fond de lit stable. Par ailleurs, dans les torrents et rivières torrentielles, le charriage de matériaux grossiers peut conduire à un décapage de la végétation exposée.

Des barrages en clayonnages transversaux ont été utilisés pour stabiliser le fond du lit des torrents, entre deux barrages en maçonnerie, comme on peut le voir sur la figure 2a représentant le torrent du Bourget, en Savoie (France). Il semble néanmoins que ces ouvrages transversaux n'aient pas résisté avec le temps, puisque 18 ans plus tard (fig. 2b), la série de barrages en clayonnages a été remplacée par un barrage en maçonnerie.

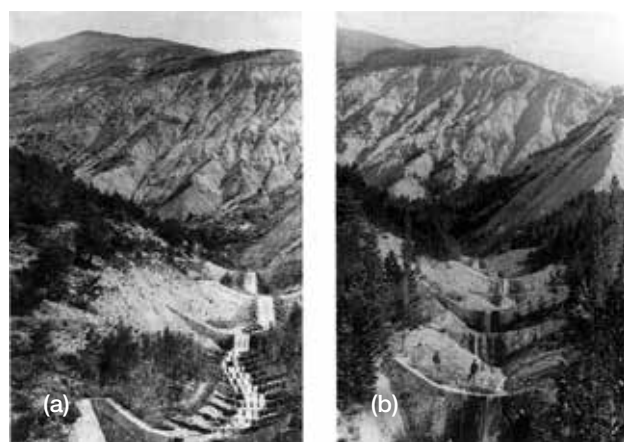


Fig. 2 - Torrent du Bourget : (a) en 1887 ; (b) en 1905.

On peut néanmoins noter que ces techniques de végétalisation du lit et des berges ont conduit dans d'autres cas à des résultats spectaculaires, comme le montrent les deux photos prises à 5 ans d'intervalle sur un ouvrage italien de 1912 (fig. 3).

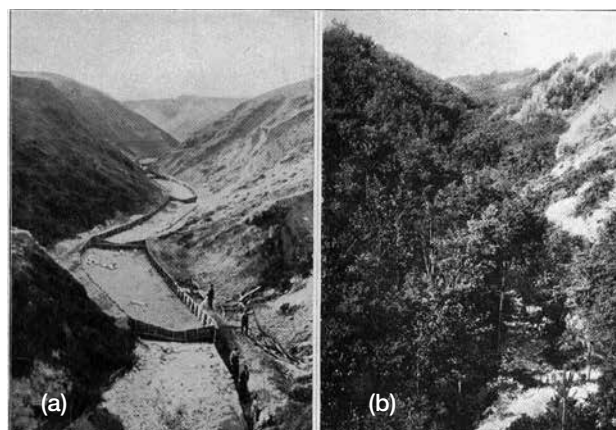


Fig. 3 - Le Val di Mezzo (Rivoli Veronese - Vénétie - Italie) : (a) au moment des travaux de lutte contre l'érosion ; (b) 5 ans après la plantation de saules, d'aulnes et de robiniers (Di Tella 1912).

2.1.2.2. Stabilisation des berges de cours d'eau

De nombreuses techniques ont été utilisées pour la protection des berges des rivières et torrents de montagne. On peut bien sûr citer les fascines, qui peuvent être de structure et de dimension variables.

La fascine simple est constituée de tiges souples, droites et sans intersection, d'un diamètre inférieur ou égal à 2-3 cm. Ces tiges sont assemblées toutes dans le même sens, dans un fagot de 30 à 35 cm de diamètre et d'une longueur de 2,5 à 3 m. Ces fagots sont serrés avec des liens en fil de fer ou en osier. Les fascines d'une longueur supérieure à 3 m sont plus difficiles à utiliser (Scheck 1885).

Les fascines à noyau, encore appelées saucissons, sont des structures de plus gros diamètre variant entre 0,8 à 1,20 m. Ces saucissons contenaient un cœur en sable, gravier, terre ou pierres qui était entouré de branchages, voire par 7 fascines juxtaposées. Ces saucissons pouvaient être utilisés seuls ou juxtaposés par deux ou trois (fig. 4 et 5) (Dugied 1819 ; Defontaine 1833 ; Labonne *et al.* 2007).

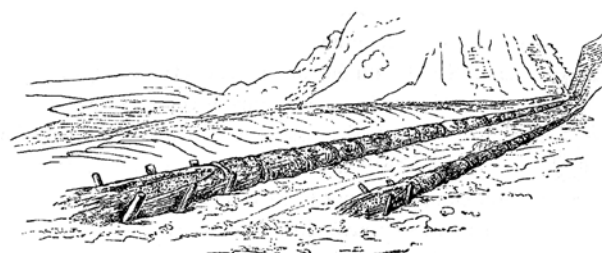


Fig. 4 - Canalisation d'un torrent par construction de saucissons parallèles sur les berges (Mathieu 1864).



Fig. 5 - Stabilisation des berges de la Broye au moyen de fascines à noyau, selon le système de Gumpfenberg (ingénieur en Bavière), vers 1865 (Vischer 2003).

On trouve également des protections faites à base de gabions en osier (fig. 6), qui permettent d'endiguer les petits torrents à des coûts bien moindres que les digues en pierres (Dugied 1819).

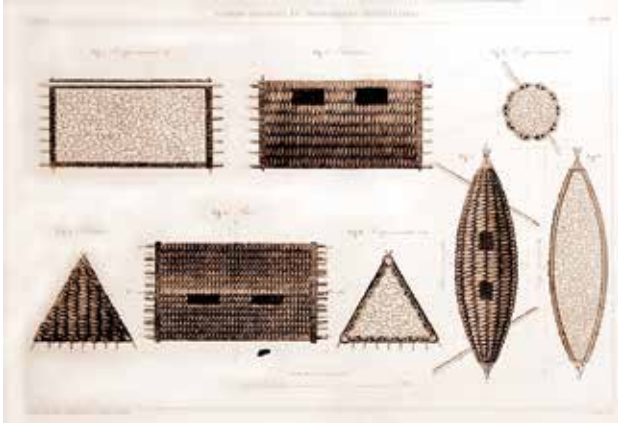


Fig. 6 - Gabions coniques et prismatiques triangulaires en osier remplis avec des graviers (Defontaine 1833).

De nombreux épis ont également été construits à l'aide de techniques de génie végétal pour protéger les berges. Ces ouvrages étaient appelés « tunages » (fig. 7) et faisaient largement appel aux fascines, généralement sur plusieurs couches.

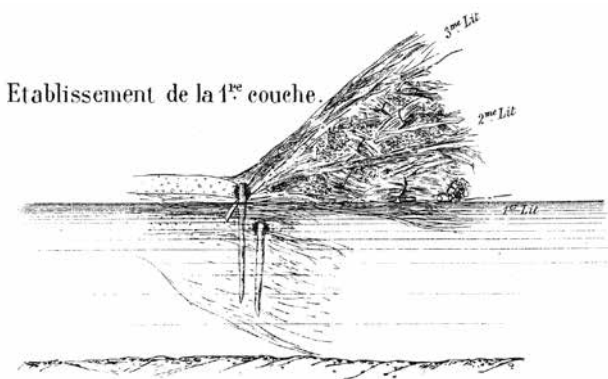


Fig. 7 - Tunage sur le Rhône, à Bex (Vaud - Suisse), avec fascines et pieux (Barraud 1888, d'après Vischer 2003).

Ce bref aperçu montre l'ampleur de ce qu'ont pu être les travaux de génie végétal au cours des siècles précédents. La faiblesse des coûts de main-d'œuvre autorisait en effet des constructions végétales sur de très longs linéaires et avec des techniques variées.

2.2. Spécificités du génie végétal en montagne

2.2.1. Le génie végétal en montagne : des modèles naturels particuliers

2.2.1.1. Une structuration de la rive particulière

Les milieux alluviaux et les berges de cours d'eau présentent une végétation spécifique en montagne. Les types de végétation vont dépendre du régime hydromorphologique, de la zone climatique, de l'altitude, de la géologie. Les différents modèles végétaux présents sur les berges de cours d'eau sont décrits dans la partie III de ce guide.

Le cortège des ripisylves et notamment les espèces de saules vont ainsi varier en fonction de l'altitude. Certains de ces saules de montagne ont des capacités de bouturage intéressantes comme *Salix daphnoides* ou *S. myrsinifolia*, d'autres comme *S. appendiculata* sont plus difficiles à utiliser sous forme de boutures, de plançons ou de couches de branches.

On peut également noter la présence de blocs et d'« enrochements naturels » sur la berge de certaines rivières torrentielles et des torrents (fig. 8 et 9). La présence de ces structures minérales dans les berges augmente avec la pente des cours d'eau.



Fig. 8 - Torrent de montagne.

En milieu montagnard, le type de végétation présent est souvent spécifique. Les espèces herbacées et ligneuses de plaine (dont certains saules) ne sont pas forcément adaptées à l'altitude. Il y a donc lieu d'accorder une vigilance particulière aux espèces utilisées pour la revégétalisation, et s'assurer de leur bonne adéquation aux conditions de milieu, notamment en ce qui concerne l'altitude. La partie III donne ainsi les caractéristiques des espèces utilisables pour le génie végétal en berges de cours d'eau, tant en termes d'exigences de milieu que de modalités d'utilisation en génie végétal. Ces notions sont largement détaillées dans la partie III du guide.

2.2.1.2. Quelle définition du génie végétal en altitude ?

Si on reprend la définition du génie végétal donnée en I.3.1 de cet ouvrage, sont considérés comme des ouvrages de génie végétal ceux pour lesquels les végétaux assurent une fonction de stabilisation mécanique. Les ouvrages dans lesquels les matériaux inertes assurent les fonctions de stabilisation mécanique, comme les enrochements végétalisés, sont alors appelés génie biotechnique.

Cependant, cette définition peut poser problème en ce qui concerne les rivières à forte pente. En effet, un des objectifs du génie végétal est de copier les modèles naturels qui fonctionnent. Il s'agit généralement de s'inspirer des structures végétales présentes à proximité des ouvrages et qui sont stables vis-à-vis de l'érosion (chap. I.3.1). Or, sur les rivières et torrents à forte pente, les berges de cours d'eau sont souvent naturellement constituées de blocs et de végétation entremêlés, donc d'« enrochements végétalisés naturels ». Ainsi, si les enrochements végétalisés ne peuvent pas être considérés comme des ouvrages de génie végétal en rivière de plaine, la question se pose bien différemment sur les rivières à forte pente.



Fig. 9 - Exemple d'un enrochement naturel en pied de berge d'un torrent.



Fig. 10 - Ouvrage de génie végétal sur une rivière dynamique juste après sa mise en place.

2.2.2. Problématique liée à la végétation

2.2.2.1. Des conditions qui influencent la croissance des végétaux

En montagne, la période de végétation diminue avec l'altitude sous l'effet de la baisse des températures et de l'augmentation de l'enneigement. Ainsi, les saules d'altitude débourrent plus tard et perdent leurs feuilles plus tôt que leurs cousins des plaines.

La vitesse de croissance des plantes décroît avec l'altitude ; cela peut d'ailleurs se vérifier sur les espèces présentes sur une large gamme altitudinale. Ainsi, en comparaison avec les saules de plaine, les saules de montagne ont une croissance plus lente. De par ces conditions de croissance, leur bois est plus dur, ce qui leur confère une meilleure résistance (dessiccation, battage, etc.). Leur bois est aussi plus difficile à couper lorsque l'on veut le prélever pour faire des boutures. Il est par ailleurs souvent moins rectiligne et moins souple. Les saules de montagne présentent donc des conditions de prélèvement et de mise en œuvre qui diffèrent de celles des saules de plaine (Duperray 2010).

Cette plus faible croissance des plantes en altitude va ainsi freiner le développement des ouvrages de génie végétal par rapport à ce que l'on peut observer en plaine. De plus, **la résistance des ouvrages de génie végétal augmentant avec le temps, on peut conclure que la résistance des ouvrages de génie végétal en rivière de montagne augmente moins vite que sur les rivières de plaine.**



Fig. 11 - Saules d'altitude.

2.2.2.2. Quelle origine pour les espèces utilisées ?

Souvent, faute de disponibilité ou pour des raisons pratiques, le matériel végétal utilisé pour la revégétalisation de zones de montagne provient d'autres zones géographiques, et notamment de plaine, où il est plus facile de le cultiver et de le prélever. Lorsque l'on utilise des boutures issues de zones éloignées, d'autres massifs, voire de plaines, on introduit des espèces et des variétés ou souches non indigènes. Ces dernières ne sont pas forcément bien adaptées aux contraintes du milieu ambiant. Pourtant, en zone de montagne, on est généralement dans des territoires avec une forte valeur patrimoniale, avec une végétation diversifiée qui présente des espèces ou des écotypes spécifiques. L'utilisation de souches locales apparaît donc comme primordiale, à la fois dans l'objectif d'utiliser un matériel végétal adapté aux conditions de milieu, que pour respecter le caractère patrimonial de ces milieux à forte typicité.

Les saules de montagne ayant une saison de végétation plus courte, leur utilisation pourrait apparaître comme une solution pour des chantiers de plaine précoces à l'automne ou tardifs au printemps (Duperray 2010). Ainsi, on pourrait avoir des saules en période de dormance à utiliser sur des chantiers où les saules locaux seraient encore ou déjà en végétation. Ceci dit, se pose là aussi le problème de l'indigénat et de l'adaptation des espèces et écotypes utilisés.

2.2.3. Périodes d'intervention

2.2.3.1. Contraintes hydrologiques

Dans les Alpes du Nord, on considère généralement trois types principaux de régime hydrologique.

Tout d'abord le régime glaciaire, qui correspond à des cours d'eau dont une part importante du bassin versant est alimentée par des glaciers. Ces cours d'eau connaissent des étiages hivernaux et de hautes eaux estivales. Ils sont aussi caractérisés par des variations de débit importantes entre le jour et la nuit, les débits nocturnes étant plus faibles.

Le régime nival, quant à lui, correspond à des bassins versants d'altitude où une part importante des précipitations tombe sous forme de neige. Il est caractérisé par de très fortes crues de printemps, liées à la fonte des neiges.

Enfin, le régime pluvio-nival se trouve dans des bassins versants à plus basse altitude. Ce régime est caractérisé par deux périodes de crues, l'une au printemps à la fonte des neiges, l'autre en automne ou en hiver. La prédominance de la crue d'automne/hiver est d'autant plus marquée que l'influence nivale est faible.

Les variations de débit pendant la saison de végétation sont à prendre en compte dans la conception des ouvrages de génie végétal.

Dans le cas du régime glaciaire, la période de mise en place des ouvrages au printemps ou à l'automne correspond à des périodes où le débit n'est pas très élevé, ce qui est favorable au déroulement des chantiers.

Les crues de printemps sur les cours d'eau à régime nival sont préjudiciables si l'on souhaite installer les ouvrages

de génie végétal à cette période. Elle risque en effet de se produire au cours du chantier, et donc d'empêcher sa bonne réalisation.

Sur les cours d'eau à régime pluvio-nival, les risques de crues importantes, au printemps mais aussi à l'automne, ne sont pas là non plus sans répercussions pour la bonne réalisation des chantiers à ces périodes.

La question du régime hydrologique est une des questions préalables importantes à se poser lors de la conception d'un projet de génie végétal en rivière de montagne. **Le niveau de l'eau pendant la saison de végétation peut en effet être très variable et conditionner à la fois les périodes de chantier, mais aussi le calage vertical des ouvrages de génie végétal.** Il y a ainsi lieu de bien caler la hauteur des ouvrages afin d'éviter qu'ils ne soient immergés pendant une partie importante de la période de végétation. Par exemple, le calage vertical d'une fascine avec le niveau d'eau pendant la saison de végétation apparaît particulièrement important. Si elle est mal calée et trop longtemps immergée ou trop longtemps à sec, elle ne reprendra pas et les branches de saule ne survivront pas. La protection du pied de berge contre l'érosion arrêtera d'être fonctionnelle dès que la fascine aura disparu.

À noter que la contrainte du niveau d'eau élevé ou des variations fréquentes de hauteur d'eau (jour/nuit) en pleine période de végétation, est d'autant plus forte sur des cours d'eau canalisés et endigués. En effet, la réduction latérale du gabarit hydraulique, consécutif à la chenalisation, accentue les variations de niveau d'eau.

2.2.3.2. Contraintes liées à la neige et à la période de végétation

Les saules, très souvent utilisés en génie végétal, sont parmi les ligneux qui sortent les premiers du sommeil hivernal. Le débournement de leurs bourgeons intervient fréquemment alors que la neige est encore présente au sol. Mais pour réaliser des travaux de génie végétal en altitude au printemps, il y a lieu d'attendre la fonte de la neige, pour des raisons pratiques et d'accessibilité. Survient alors le risque que le matériel végétal prélevé sur place ne soit plus en l'état de dormance. Or, la mise en place de boutures déjà feuillées risque de limiter leur taux de reprise.

Les périodes d'intervention pour les travaux en altitude sont soumises aux aléas hydrologiques et notamment aux fortes crues de printemps pour le régime nival. Dans ce dernier cas, une solution peut être de réaliser les ouvrages à l'automne pour éviter le risque hydrologique.

Il existe pourtant également un risque à réaliser les travaux à l'automne. En effet, les procédures liées à la mise en place des marchés et les aléas propres à l'installation du chantier conduisent fréquemment à un retard dans son démarrage. Ce retard est susceptible de poser problème en termes d'accès et de bon déroulement du chantier si la neige vient à faire une apparition marquée et durable. On prend alors le risque de devoir arrêter le chantier pour l'hiver, et d'être obligé de le reprendre lors de la crue de printemps... Il y a donc lieu d'être particulièrement vigilant sur les procédures et la rédaction des marchés de travaux. Le cas échéant, il peut être judicieux de reporter les travaux à l'année suivante.

3. Approche mécanique

3.1. Contraintes mécaniques sur les rivières de montagne

3.1.1. Le rôle mécanique de l'eau sur les berges

En fonction du régime hydrologique, de la structure de la berge et de la zone étudiée, l'eau peut avoir une action mécanique favorable ou défavorable sur la tenue de la berge. La berge est, on le rappelle, constituée d'un sol de granulométrie variable (grossière, fine ou mixte). L'eau joue ainsi un rôle complexe qui se décline à des échelles très différentes.

3.1.1.1. L'eau et les propriétés physiques du sol

→ La teneur en eau des sols fins

La teneur en eau du sol influence sensiblement ses propriétés physiques et plus spécialement sa résistance au cisaillement. Le cisaillement correspond à une sollicitation tangentielle à la surface de laquelle sont appliqués ces efforts. Au plan de cisaillement, nous observons un glissement des particules de matière (fig. 1).

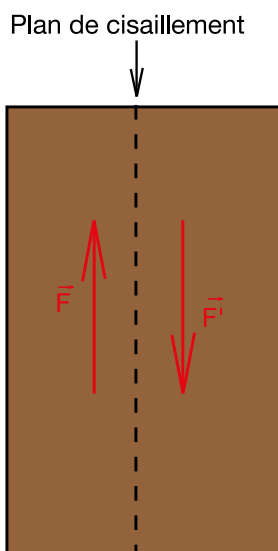


Fig. 1 - Représentation schématique du cisaillement sur une éprouvette de sol.

La stabilité d'une berge, notamment vis-à-vis du glissement, est étroitement liée à sa résistance au cisaillement. La résistance au cisaillement d'un sol saturé en eau est plus faible que celle d'un sol non saturé. Dans ce dernier,

des forces attractives d'absorption entre les grains augmentent la résistance au cisaillement apparente du sol.

Cette force est à l'origine d'une cohésion apparente améliorant la qualité mécanique du sol.

Les épisodes de crue, en saturant le sol en eau, diminuent sa cohésion, augmentent les pressions interstitielles et favorisent les risques de glissement.

Il y a ainsi lieu de bien distinguer la cohésion, qui est source de stabilité, de la pression interstitielle, qui génère les risques les plus forts de glissement à la décrue (chap. II.3.1.4).

Isolée de toute contrainte extérieure, la stabilité de la berge est assurée grâce à sa géométrie (pente), sa composition (granulométrie, texture) et sa teneur en eau. Autrement dit, une augmentation de la teneur en eau peut modifier, à elle seule, l'état de stabilité de la berge.

La teneur en eau du sol est influencée par :

- le niveau du cours d'eau et de la nappe d'accompagnement ;
- la nature des matériaux constitutifs de la berge et notamment leur perméabilité ;
- les conditions météorologiques ;
- l'évapotranspiration de la végétation rivulaire.

→ Les cycles de gel et de dégel

Les cycles de gel et de dégel sont à l'origine d'une destruction mécanique du sol, aggravée par la présence d'eau dont le volume augmente à l'état solide. Plus la fréquence de ces cycles est élevée, plus la dynamique d'érosion est importante. Ce type d'érosion augmente avec l'altitude. Il a été démontré que la présence de végétaux, et même d'un enherbement épars, réduit les fluctuations de température dans le sol en limitant les vitesses de vent et les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Il a également été observé que le couvert végétal diminue la fréquence du cycle de gel et dégel sur les berges de rivière et diminue ainsi les mécanismes d'érosion (Bohn 1989, dans Abernethy et Rutherford 1998).

3.1.1.2. Les actions mécaniques directes engendrées par l'eau

→ La vitesse du courant

La vitesse du courant fait partie des grandeurs caractéristiques d'un cours d'eau. Sa détermination se fait classiquement à partir des lois telles que Manning-Strickler ou Keulegan.

La formule de Manning-Strickler est souvent employée pour calculer la vitesse de l'eau en régime permanent et uniforme. Le coefficient de rugosité K doit être calé sur des mesures de ligne d'eau. Il peut également être calculé à partir de la granulométrie du lit. Cependant, les modèles proposés ne sont plus valables lorsque la pente et le diamètre des blocs sont élevés.

$$U = K.R^{2/3}.I^{1/2}$$

Où :

- U = la vitesse de l'eau (m.s⁻¹) ;
- K = le coefficient de rugosité (ou de Strickler) ;
- R = le rayon hydraulique (m) – rapport de la surface mouillée sur le périmètre mouillé ;
- I = la pente du cours d'eau (-).

Ces dernières donnent des résultats corrects pour des profondeurs relatives supérieures à 7 environ. La profondeur relative est définie par le ratio R/D_{84} , où :

- R = le rayon hydraulique ;
- la granulométrie D_{84} = l'ouverture théorique du tamis telle que 84 % des particules ont un diamètre inférieur.

Mais ce domaine correspond à l'échelle des « petites rugosités » selon la classification proposée par Bathurst *et al.* (1981). Pour les plus faibles tirants d'eau (échelles des rugosités moyennes et larges), qui concernent la plupart des cours d'eau de montagne en écoulement de crue, ces formules surestiment les vitesses.

Pour les grandes rugosités, la formule de Manning-Strickler a été revue par Ferguson (2007). Cette formulation, dite « VPE » (Variable Power Exponent), permet de déterminer la vitesse à partir de la hauteur d'eau :

$$\frac{U}{\sqrt{gJR}} = \frac{a_1 a_2 (R/D_{84})}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 (R/D_{84})^{5/3}}}$$

Où :

- $a_1 = 6.5$ et $a_2 = 2.5$;
- U = la vitesse d'écoulement (m.s⁻¹) ;
- g = la pesanteur (m.s⁻²) ;
- J = la pente d'énergie prise à égale à la pente du cours d'eau dans notre cas (-) ;
- R = le rayon hydraulique (m).

Dans le même esprit, Rickenmann et Recking (2011) ont proposé un calcul permettant de déterminer la vitesse à partir du débit unitaire q (débit par unité de largeur en m².s⁻¹) :

$$\frac{U}{\sqrt{gJD_{84}}} = 1.44q^{*0.6} \left[1 + \left(\frac{q^*}{43.8} \right)^{0.82} \right]^{-0.24}$$

En utilisant deux nouvelles variables adimensionnelles :

$$U^* = U / \sqrt{gJD_{84}} \quad \text{et} \quad q^* = q / \sqrt{gJD_{84}^3}$$

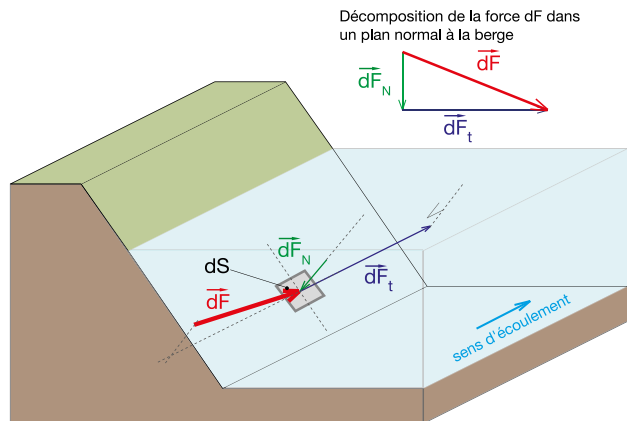
Où :

- U = la vitesse d'écoulement (m.s⁻¹) ;
- g = la pesanteur (m.s⁻²) ;
- J = la pente d'énergie prise à égale à la pente du cours d'eau dans notre cas (-) ;
- R = le rayon hydraulique (m) ;
- D_{84} = le diamètre correspondant à 84 % des matériaux de diamètre inférieur sur la courbe granulométrique (m).

→ L'action mécanique de l'eau

L'eau exerce un effort sur les parois du lit. La force dF exercée sur une unité de surface dS , peut être décomposée dans un plan normal à une paroi de la manière suivante :

- la force tractrice dF_t , composante parallèle à la paroi (fond ou berge) et dirigée dans le sens de l'écoulement ;
- la force normale dF_N , liée à la pression de l'eau par la relation $dP = dF_N.dS$ avec dP , pression élémentaire de l'eau sur dS . Cette composante est perpendiculaire à la paroi.



dS : surface élémentaire de la berge
 dF_N : pression élémentaire exercée par l'eau sur la surface dS
 dF_t : force tractrice élémentaire exercée par l'eau sur la surface dS
 dF : force élémentaire exercée par l'eau sur la surface dS

Fig. 2 - Détails des efforts exercés par l'eau sur les parois d'un tronçon de rivière rectiligne.

→ La contrainte tractrice (ou de cisaillement ou d'arrachement)

La force de frottement de l'eau, ou force tractrice, génère une contrainte sur le lit du cours d'eau. Cette contrainte tractrice τ représente la contrainte tangentielle de la colonne d'eau exercée sur la paroi du chenal :

$$\tau = \frac{dF_t}{dS}$$

Où :

- τ = la contrainte tractrice (N.m^{-2}) ;
- dFt = la force de frottement élémentaire de l'eau (N) ;
- dS = la surface élémentaire d'application de la force sur la paroi (m^2).

En écoulement uniforme, la contrainte tractrice au fond du lit peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot j$$

Où :

- τ = la contrainte tractrice (N.m^{-2}) ;
- ρ = la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}) ;
- g = l'accélération de pesanteur (m.s^{-2}) ;
- R = le rayon hydraulique (m) ;
- j = la perte de charge linéaire (adimensionnel).

Des hypothèses de calcul permettent de simplifier cette expression : la ligne d'énergie (j) est parfois remplacée par la pente (i) du cours d'eau pour simplifier les calculs (équivalent à se placer dans le cas d'un écoulement uniforme). Sur les cours d'eau suffisamment larges ($L > 20 R$), on peut remplacer le rayon hydraulique (R) par la hauteur d'eau (h).

Sur une berge immergée, la force de pesanteur s'ajoute à la force tractrice pour la mise en mouvement des matériaux. **Ainsi, plus la berge est inclinée, plus il est facile de mettre les particules en mouvement.**

Lorsque cette contrainte atteint un seuil critique, elle est responsable de la mise en mouvement des matériaux du fond du lit ou de la berge. Nous parlons alors de « contrainte tractrice critique ».

L'expression de la contrainte tractrice critique sur les berges fait intervenir l'angle de frottement interne φ du matériau constituant le sol et la pente de la berge β :

$$\tau_{\beta} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}} \times \tau$$

Où :

- τ_{β} = la contrainte tractrice critique sur une pente d'angle β avec l'horizontale (N.m^{-2}) ;
- φ = l'angle de frottement interne du sol ($^{\circ}$) ;
- τ = la contrainte tractrice moyenne exercée par le fluide sur la paroi (N.m^{-2}).

Il est d'usage d'évaluer la contrainte tractrice moyenne sur les berges équivalente à 0,75 fois la contrainte maximale sur le fond du lit, mais la validité de cette approximation reste à démontrer pour les rivières de montagne.

→ La poussée stabilisatrice du cours d'eau sur la berge

L'eau exerce une pression sur la berge (fig. 2). Elle correspond au poids de la colonne d'eau supportée. Pour une surface élémentaire, la pression élémentaire est :

$$dP = \rho \cdot g \cdot h \cdot dS$$

Où :

- dP = la pression de l'eau (N.m^{-2}) sur la surface dS (m^2) ;
- ρ = la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}) ;
- g = l'accélération de pesanteur (m.s^{-2}) ;
- h = la hauteur de la colonne d'eau (m).

→ La profondeur d'affouillement

Il existe deux types d'enfoncement du fond du lit : les incisions généralisées qui s'étendent sur un tronçon de cours d'eau et les affouillements localisés liés à une singularité hydraulique (rétrécissement, embâcle, etc.).

La formule d'Izard et Bradley retravaillée par Ramette permet de calculer la profondeur d'affouillement ou la profondeur sur laquelle les matériaux du lit risquent d'être déplacés (Ramette 1981). Cette formule n'est valable que pour un affouillement localisé au droit d'un rétrécissement, elle n'est pas applicable pour un tronçon homogène :

$$E = Y - h$$

$$\text{où } Y = 0.73 \times Q^{2/3} \times L^{-2/3} \times D_{50}^{-1/6}$$

Où :

- E = l'épaisseur d'affouillement (m) ;
- Y = la profondeur du fond du lit en mouvement sous eau (m) ;
- h = le tirant d'eau (m) ;
- Q = le débit liquide ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- L = la largeur du cours d'eau (m) ;
- D = le diamètre des matériaux du fond du lit (m).

À noter que cette formule n'est qu'indicative, et que la profondeur de mise en mouvement des matériaux lors des crues est peu connue, notamment sur les cours d'eau à forte pente.

3.1.2. Le transport solide

Le transport solide correspond au charriage des sédiments grossiers par les cours d'eaux au gré des crues. Il a un rôle morphogène important.

Il existe de nombreuses formules pour calculer le débit solide théorique des cours d'eau. La formule de Smart et Jaeggi (1983), par exemple, est adaptée aux rivières de montagne :

$$q_{sb} = 4 \times \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0,2} \times \frac{qi^{1,6}}{\rho_s - \rho_w} \times \left(1 - \frac{\theta_{cr}}{\theta} \right)^{3/2}$$

Où :

- q_{sb} = le débit solide volumique de charriage par unité de largeur ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ;
- D = le diamètre d'une particule (m) ;
- q = le débit liquide par unité de largeur ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

- i = la pente du fond du lit (%) ;
- ρ_s = la masse volumique du solide (kg.m^{-3}) ;
- ρ_w = la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}).

Le paramètre de Shields critique (θ_{cr}) et le paramètre de Shields (θ) sont définis ci-après.

Le débit solide calculé correspond à la capacité de transport solide du cours d'eau. Le débit solide mesuré peut être inférieur au débit calculé, notamment lorsque l'apport sédimentaire est insuffisant. La capacité de transport est atteinte lorsqu'il y a un équilibre entre érosion et dépôt.

Le transport solide apparaît dès que la contrainte qui s'exerce sur le lit est capable de mettre en mouvement les sédiments. Il est possible de déterminer ce seuil avec le nombre de Shields. Il s'agit d'une contrainte adimensionnelle qui représente le rapport des forces stabilisantes (le poids des matériaux dans l'eau) sur les forces déstabilisantes (la contrainte de fond) pour la mise en mouvement d'un matériau de diamètre (D) au fond du lit :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w) \times g \times D}$$

Où :

- θ = le nombre de Shields ;
- τ = la contrainte tractrice (N.m^{-2}) ;
- ρ_s = la masse volumique du solide (kg.m^{-3}) de la particule de diamètre D (m) ;
- ρ_w = la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}).

Le nombre de Shields critique (θ_{cr}), correspond à la valeur du paramètre de Shields de mise en mouvement des particules de diamètre D . Le paramètre de Shields critique de mise en mouvement du fond du lit peut être calculé en fonction de la pente, (formule de Recking *et al.* 2008) :

$$\theta_{cr} = 0.15 \times i^{0.275}$$

Où :

- θ_{cr} = le nombre de Shields critique ;
- i = la pente du fond (%).

Si $\theta < \theta_{cr}$, les particules restent immobiles. Si $\theta_{cr} > \theta$, les particules sont mises en mouvement.

3.1.3. Puissance des cours d'eau

La puissance d'un cours d'eau par unité de surface mouillée peut être définie comme suit :

$$\omega_a = \tau \times v$$

Où :

- ω_a = la puissance du cours d'eau (W.m^{-2}) ;
- τ = la contrainte tractrice du fond du lit (N.m^{-2}) ;
- v = la vitesse de l'eau (m.s^{-1}).

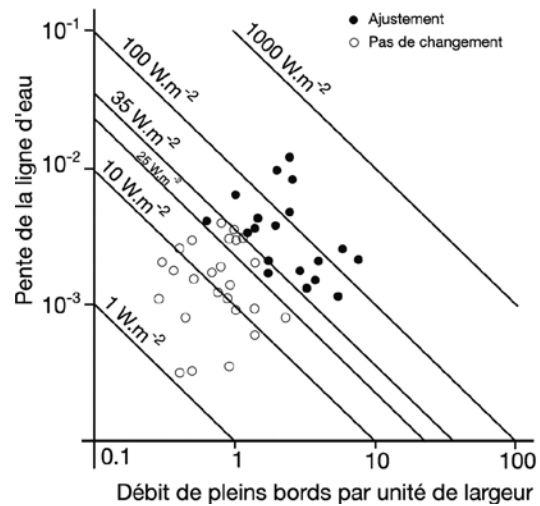


Fig. 3 - Indication sur l'existence d'un ajustement de cours d'eau pour un débit de pleins bords et une pente de la ligne d'eau donnés. La puissance est calculée en fonction de ces deux derniers paramètres (Malavoi *et al.* 2007, d'après Brookes et Gregory 1988).

La figure 3 montre un seuil de 35 W.m^{-2} en dessous duquel la rivière ne subit pas d'ajustement. Comme le font remarquer Malavoi *et al.* (2007), cette valeur est à relativiser car la possibilité d'ajustement du cours d'eau dépend aussi de la cohésion des berges.

3.1.4. Mécanisme d'évolution des berges

La stabilité des berges dépend à la fois de ses propriétés intrinsèques et des paramètres du milieu extérieur (les contraintes de frottement et les activités anthropiques). Les différentes propriétés des berges ont été listées par Mosselman (1992). Ainsi, la masse et la texture des matériaux, leurs résistances au cisaillement et à la traction, le niveau de la nappe d'accompagnement, la perméabilité, la stratigraphie, la géométrie et la végétation jouent sur leur équilibre.

Les berges subissent principalement trois processus d'évolution morphologique (Degoutte 2006) :

- l'érosion par le courant ;
- le glissement ;
- l'effondrement.

Bien que physiquement différents, ces processus sont indissociables les uns des autres et l'étude d'un mouvement d'une berge fait souvent apparaître ces phénomènes associés dans des proportions variables.

3.1.4.1. L'érosion

L'érosion est une des conséquences de la force tractrice (fig. 4). En s'érodant peu à peu, les berges se creusent en fonction de leur structure (résistance à l'arrachement, stratigraphie). À terme, l'équilibre est rompu, provoquant un glissement ou un effondrement. Les mécanismes d'éro-

sion sont d'autant plus forts que l'angle entre le courant principal et la berge est fort, et donc que l'on se trouve sur les berges concaves (Degoutte 2006).



Fig. 4 - Érosion de la berge et incision du lit mettant en danger le pont.

Dans le cas des rivières à fonds mobiles, les matériaux du fond du lit peuvent se déplacer lors des crues, provoquant un approfondissement temporaire du lit qui peut provoquer l'entraînement du pied de berge.

3.1.4.2. Le glissement

Le glissement en masse correspond au déplacement d'une partie de la berge le long d'une surface de cisaillement (fig. 5). Le processus de glissement résulte de la confrontation entre les forces déstabilisantes exercées par le poids de la berge au-dessus de la surface de cisaillement, et par d'éventuelles pressions interstitielles et les forces stabilisantes (liées au frottement et à la cohésion) le long de la surface de cisaillement.

Un glissement survient le plus généralement lors de la phase de décrue de la rivière. La saturation en eau du sol surcharge considérablement la berge, réduit les caractéristiques mécaniques du sol et y engendre des pressions interstitielles. Conjointement, la baisse du niveau d'eau réduit la poussée stabilisatrice qu'elle exerce sur la berge. Ce phénomène s'observe surtout sur les sols peu drainants (argileux, limoneux, etc.).

L'angle de stabilité d'un talus avec un sol peu cohérent et non saturé en eau correspond à son angle de frottement interne. Lorsque le sol est saturé en eau, l'angle de stabilité diminue presque du double.

Les causes de glissement de berges peuvent être : une augmentation de la pente du talus par érosion, une augmentation de la teneur en eau du talus, un affouillement du pied de berge, une incision du lit, une augmentation du poids de la berge par infiltration d'eau, une surcharge en sommet de berge (croissance des arbres, constructions trop proches du sommet).

L'érosion du pied (ou affouillement) est très souvent le mécanisme initiateur d'un glissement ou d'un effondrement ; et glissement et effondrement sont des mouvements de masse, comparés à l'érosion qui est un mouvement grain par grain.

Si l'incision du lit est généralisée sur le cours d'eau, des glissements vont apparaître sur un grand linéaire. Une opération de restauration des berges peut éventuellement être envisagée, mais celle-ci ne pourra intervenir qu'après la stabilisation du fond du lit (seuils, épis, etc.).

3.1.4.3. Conclusion et mise en garde

Ce début de chapitre fait une synthèse des différents mécanismes mettant en lien la force de l'eau avec la stabilité des berges et du fond du lit. Ces éléments ont pour objet d'aider à une meilleure compréhension des contraintes en jeu et de la façon dont les berges peuvent se dégrader.

Il faut garder à l'esprit que les grandeurs et les équations fournies ci-dessus ont été établies avec des hypothèses précises telles que, par exemple, l'écoulement en régime permanent ou des matériaux non cohésifs. Or, dans les conditions naturelles, ces hypothèses ne sont pas respectées et les valeurs obtenues n'ont ainsi qu'une portée limitée.

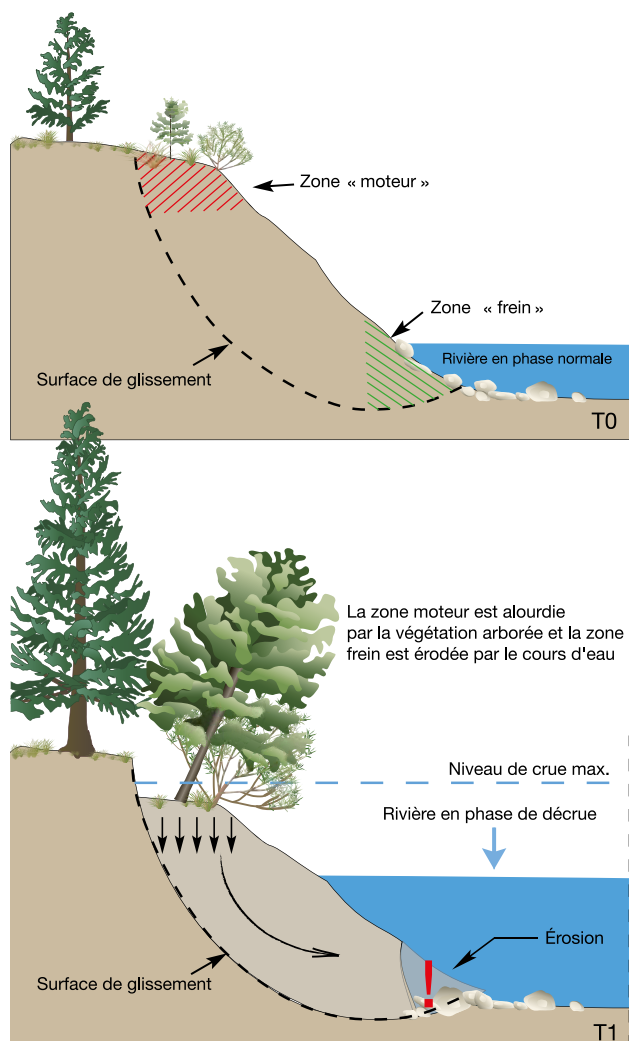


Fig. 5 - Mécanisme du glissement de berge lors d'une décrue.

3.2. Résistance mécanique des techniques de génie végétal sur les cours d'eau de montagne

3.2.1. Résistance des végétaux à l'écoulement

La conception des ouvrages de génie végétal est largement inspirée des modèles naturels, le principe étant de copier les structures végétales en place, qui résistent à l'érosion. La bonne intégration dans le paysage et les milieux naturels adjacents, et la résistance mécanique de l'ouvrage en découlent en partie. Ces modèles donnent aussi de précieuses indications sur les végétaux à utiliser. Ces derniers doivent être en mesure de résister aux différentes contraintes exercées par la rivière. Les plantes doivent avoir un système racinaire suffisamment développé pour se maintenir et protéger le sol contre l'érosion. Le port, le développement et la souplesse des tiges aériennes jouent également un rôle important dans la protection de la berge.

Les différentes espèces de saules présentent un caractère pionnier qui se traduit notamment par un besoin accru de lumière et une remarquable tolérance face à des substrats grossiers et peu fertiles... Elles supportent, temporairement, d'être en tout ou partie immergées et ont pour la majeure partie d'entre elles une forte capacité de reprise au bouturage et de régénération après perturbation exceptionnelle. Elles ont, par ailleurs, des systèmes racinaires très développés. L'ensemble de ces caractéristiques les destinent particulièrement aux ouvrages de génie végétal.



Fig. 6 - Plantes herbacées (*Deschampsia cespitosa*) plaquées au sol par le courant.

Depuis des temps anciens, les concepteurs ont ainsi retenu les saules sous forme de boutures, ramilles, plançons, branches pour construire ou participer à « l'armature » des ouvrages.

Il arrive malgré tout que les sollicitations de la rivière aient raison de la ténacité de ces espèces. Les saules ont ainsi fait l'objet d'études pour mieux appréhender leur comportement face aux forces hydrauliques. L'enjeu de ces recherches est d'améliorer la connaissance sur la résistance des ouvrages face aux contraintes mécaniques exercées par l'eau. L'objectif finalisé de ces travaux est de pouvoir construire des ouvrages plus résistants, ou avec une résistance suffisante, à travers une conception et une maintenance adaptées.

3.2.1.1. Élasticité et rigidité des végétaux

Les différentes strates de végétation présentes sur les berges réagissent différemment face aux crues :

- la strate herbacée, avec une taille faible par rapport au tirant d'eau en crue, est rapidement immergée ;
- les arbustes ont une taille comparable au tirant d'eau en crue et ne sont pas obligatoirement immergés ;
- la strate arborée, dépassant de l'eau, est rarement immergée.

Les espèces herbacées se plient rapidement au sol et offrent un écran de protection contre l'érosion, par effet de couverture (fig. 6).

Les arbres ont un comportement rigide. Ils résistent un temps au courant sans trop de dommage. Mais ils engendrent des turbulences locales susceptibles de déstabiliser le sol et les arbres eux-mêmes (fig. 7).

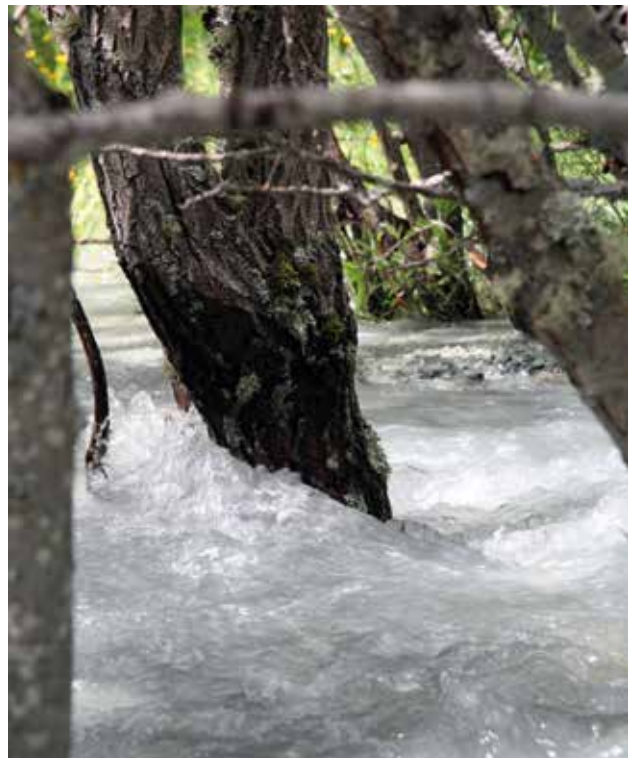


Fig. 7 - La ripisylve subissant une crue.

Les arbustes, quant à eux, adoptent un comportement différent selon le diamètre de leurs tiges et de l'espèce considérée. Oplatka (1998) a ainsi réalisé une série d'expériences dans un canal d'étalonnage pour tester le comportement des saules âgés d'environ cinq ans et provenant d'une berge de rivière. Il a ainsi observé qu'avec une augmentation de la vitesse, les saules se plient et leur système caulinaire s'étire et diminue en largeur (fig. 8). Il a estimé la surface exposée au courant et mis en évidence que cette surface diminue d'un facteur 4 à 5 lorsque la vitesse du courant passe de 0 à 1 m.s⁻¹. Entre 3 et 4 m.s⁻¹, la contraction continue mais avec un facteur plus faible. À partir de 5 m.s⁻¹, la contraction atteint une valeur limite.

D'autres expériences ont été menées pour tester l'influence du diamètre des tiges sur la flexibilité des saules et de quelques autres essences rivulaires. (Weitzer-Bruckner 2000).

Les résultats (fig. 9) mettent en évidence un diamètre limite d'environ 5 cm à partir duquel la tige adopte, en rapport avec la sollicitation, un comportement rigide. En dessous de ce diamètre, les tiges possèdent une flexibilité suffisante pour se coucher au sol et limiter l'érosion.

Une autre expérience réalisée dans un canal expérimental sur la rivière Wien à Vienne (Autriche) (fig. 10), démontre que la densité et la flexibilité des boutures âgées de trois mois peuvent protéger efficacement les sables et graviers contre l'érosion (Grestgraser 1998).

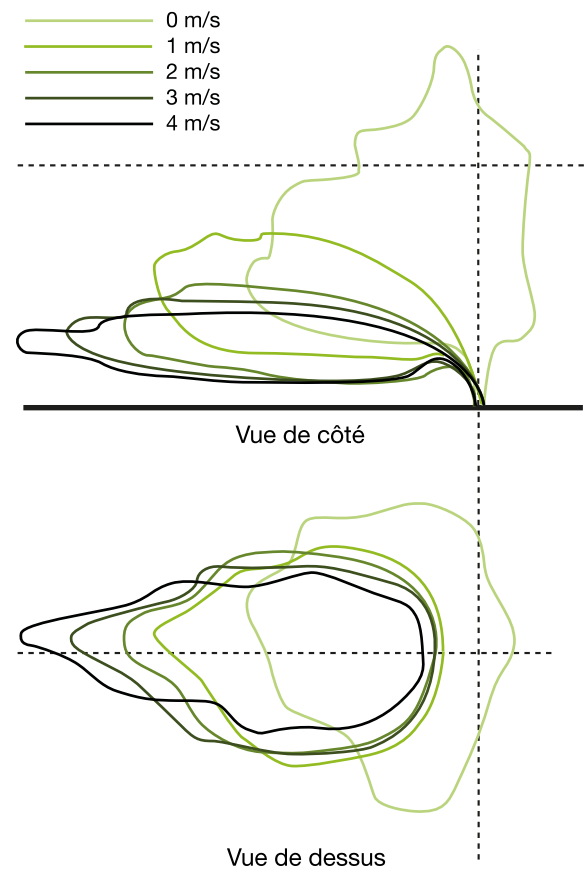


Fig. 8 - Schéma de courbure des saules en fonction de la vitesse du courant lors des expériences effectuées en canal par Oplatka (1998).

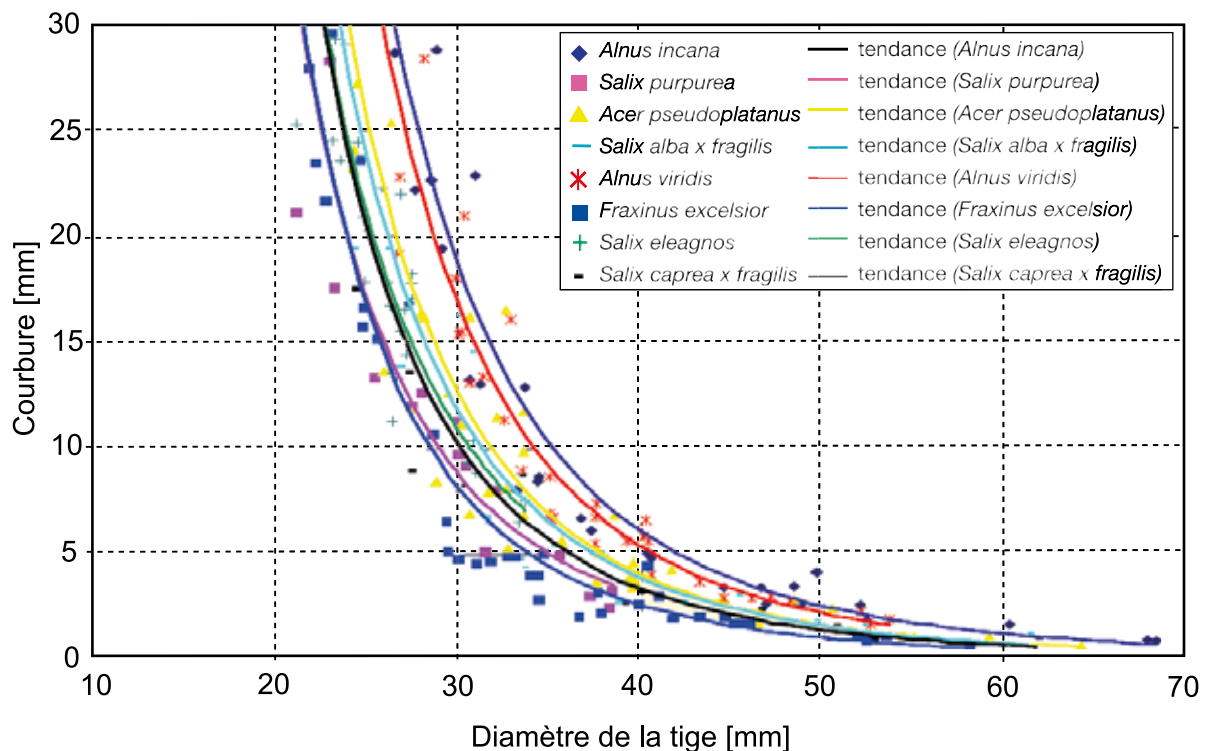


Fig. 9 - Comparaison de la courbure de différentes espèces d'arbres rivulaires sur des tiges d'un mètre soumises à une force latérale de 10 N (Weitzer et al. 1998, dans Gerstgraser 2000) – arbres âgés de 5 à 18 ans.

Comment résiste le végétal en cas de crue ? Risque-t-il d'être arraché et emporté par le courant ? Les expérimentations faites sur ce canal artificiel à Vienne ont ainsi apporté des réponses intéressantes quant à la résistance des saules immergés. Dans ce canal, construit dans le lit de la rivière, les chercheurs ont notamment implanté différents types d'ouvrages de génie végétal. En contrôlant le débit et en mesurant la vitesse de l'eau, ils ont développé des connaissances sur la résistance de ces ouvrages face aux crues.



Fig. 10 - Canal de test de l'Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftbau.

Pour en savoir plus, se référer au site de l'Universität für Bodenkultur Wien (en allemand) :

<http://www.baunat.boku.ac.at/8615.html?&L=1>

Notons aussi qu'une fois couchés, les arbustes immergés offrent une résistance à l'écoulement grâce à l'effet de peigne engendré par leurs branchages (tiges et feuilles). Ils ralentissent l'écoulement à proximité de la berge, ce qui favorise les dépôts sédimentaires.



Fig. 11 - Piégeage des sédiments fins par les ramilles anti-affouillement, placées ici sous un ouvrage de protection de pied de berge, perpendiculairement au courant.

3.2.1.2. Résistance des végétaux à la force d'arrachement

Les premières années de vie d'un aménagement en génie végétal sont déterminantes pour sa longévité. Les végétaux ne sont alors pas totalement implantés et la résistance mécanique de l'ouvrage n'a pas atteint son optimum. C'est une des raisons pour laquelle des matériaux non vivants (géotextiles, pieux, blocs) sont le plus souvent associés dans les aménagements.

➔ Force du courant et arrachement des saules

La force de traînée peut être estimée à partir de la formule de Newton (Oplatka 1998) :

$$S_w = \frac{1}{2} \times \rho_w \times C_d \times A \times v^2$$

Où :

- S_w = la force de traînée (N) ;
- ρ_w = la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}) ;
- C_d = le coefficient de résistance (-) ;
- A = la surface d'application de la force sur le végétal (m^2) ;
- v = la vitesse d'écoulement (m.s^{-1}).

Le coefficient de résistance C_d est considéré comme constant, égal à 0,6, à partir d'une vitesse d'écoulement de $0,55 \text{ m.s}^{-1}$ (Vollsinger *et al.* 2005, dans Stone *et al.* in press).

En réaction à cet effort, un couple résistant M_R et une force de résistance à l'arrachement R apparaissent au niveau du système racinaire (fig. 12).

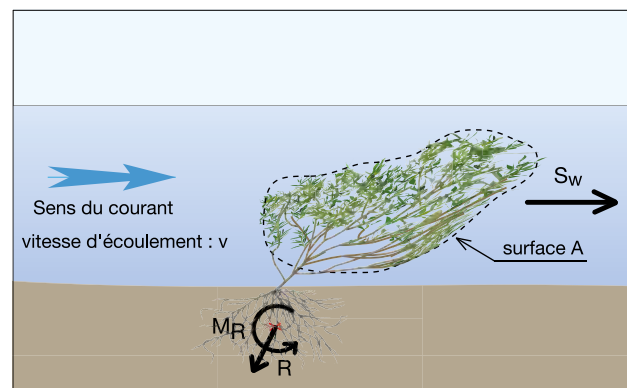


Fig. 12 - Efforts mécaniques engendrés par le courant sur un arbuste immergé. Avec R , la force de résistance à l'arrachement, et M_R , le couple résistant.

La résistance des végétaux à l'arrachement a fait l'objet d'expérimentations menées par Vollsinger *et al.* (2000) sur différentes espèces de saules âgés de 2 à 5 ans. L'expérience met notamment en évidence une différence de résistance entre les différentes espèces végétales. Il est important de noter que cette résistance est, dans tous les cas, 5 à 10 fois supérieure à la force S_w exercée par le courant (fig. 13).

Ainsi, la force exercée par le courant sur le végétal ne peut pas, à elle seule, arracher un arbuste. Lorsque le végétal est emporté avec son système racinaire, c'est généralement suite aux actions combinées d'un affouillement localisé, du transport solide et du courant. Un ouvrage de génie végétal ne cède pas à cause de l'arrachement par la force du courant sur la partie aérienne des végétaux, mais par érosion interne du substrat en lien avec les parties racinaires des plantes.

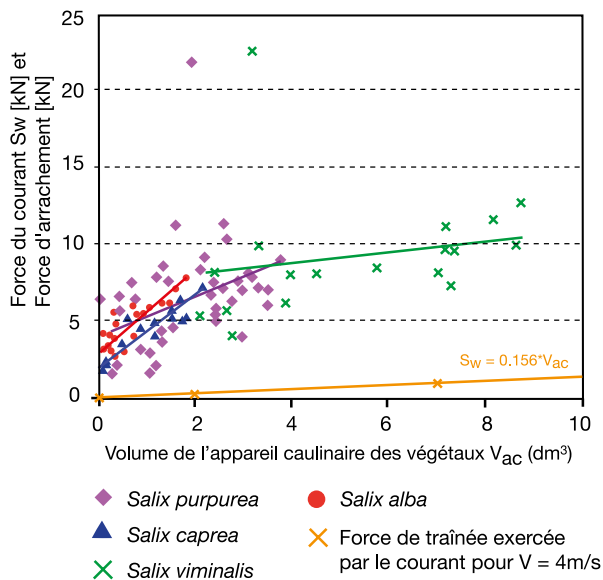


Fig. 13 - Résistance à l'arrachement de différentes espèces de saules par rapport à la force exercée par le courant sur les saules (d'après Vollsinger *et al.* 2000, dans Florineth 2007).

➔ Résistance au transport solide

On considère ici le transport solide comme le déplacement de particules (argiles, limons, sables, graviers, galets et blocs) dans les cours d'eau, pouvant s'effectuer soit par suspension, soit par déplacement sur le fond du lit du fait des forces tractrices liées au courant (on parle dans ce dernier cas de charriage). On exclut donc ici les torrents à lave.

Le transport solide (surtout le charriage) est certainement le phénomène le plus dangereux pour les végétaux. Il agit comme une bande abrasive occasionnant recouvrements, blessures ou encore cassures de parties aériennes.

Dans les cours d'eau de montagne où le transport solide est plus violent qu'en plaine, le charriage de gros blocs est suffisamment puissant pour casser ou écorcer des troncs d'arbres (fig. 14).



Fig. 14 - Charriage des sédiments et résistance des végétaux aux contraintes mécaniques.

3.2.2. Résistance mécanique des ouvrages de génie végétal sur les cours d'eau de montagne

Contrairement aux pratiques du génie civil, qui reposent sur l'emploi exclusif de matériaux inertes, le dimensionnement des ouvrages de génie végétal ne s'appuie pas sur des règles de calculs normées. L'emploi de matériel vivant en est une raison essentielle.

Les connaissances du comportement mécanique des ouvrages de génie végétal s'affinent, mais leurs variabilités ne permettent pas de tirer des conclusions définitives. Ainsi, le dimensionnement est essentiellement empirique et repose sur le savoir-faire des spécialistes.

Toutefois, lorsqu'une étude hydraulique du cours d'eau est disponible, la contrainte tractrice est retenue pour étayer la décision. Il s'agit d'un paramètre classique pour apprécier les interactions hydrauliques et structurales. Des retours d'expériences ont aussi permis de faire le lien entre la contrainte tractrice et la résistance des ouvrages. Pour structurer ce savoir et fournir une aide à la conception, une synthèse des valeurs rencontrées dans la littérature spécialisée a été réalisée. Le tableau 1 (Frossard et Evette 2009) dresse un large panel des valeurs de résistance des différentes techniques.

Les valeurs de référence dans le tableau mettent en évidence les disparités entre les auteurs et révèlent la large gamme de valeurs de résistance pour certaines techniques. Toutefois, des tendances se dessinent. Les couches de branches à rejets présentent une résistance importante par rapport aux autres techniques et notamment par rapport aux fascines, aux boutures de saule et aux tressages (= clayonnages).

D'après le tableau 1, les ouvrages les plus résistants aux contraintes tractrices sont les couches de branches à rejets avec enrochements en pied de berge ($\tau_{lim} = 300-450 \text{ N.m}^{-2}$) et les caissons végétalisés ($\tau_{lim} = 600 \text{ N.m}^{-2}$). Ces valeurs ont une gamme de résistance équivalente ou supérieure à certains enrochements ($\tau_{lim} = 250 \text{ N.m}^{-2}$, correspondant à des blocs en vrac de 30 cm de diamètre) ou aux enrochements végétalisés ($\tau_{lim} = 300-350 \text{ N.m}^{-2}$).

Par conséquent, les techniques de génie végétal ont une résistance importante aux contraintes de traction.

Par ailleurs, les ouvrages de génie végétal se fortifient avec le temps. Leur résistance est minimale suite à la construction, c'est à ce moment que l'ouvrage est le plus vulnérable aux crues. Les années suivantes, la végétation se développe (système racinaire et tiges aériennes) et apporte son rôle protecteur à la berge.

Tab. 1 - Contraintes tractrices calculées pour des crues données pour diverses techniques de génie végétal.

Technique	Contrainte tractrice [N/m ²]		
	À la réalisation	1 à 2 ans après	3 ou 4 ans après
Enherbement	4 ⁽³⁾ -20 ⁽³⁾	25-30 ⁽³⁾	30 ⁽³⁾ -100 ⁽²⁾
Boutures	10 ⁽³⁾	60 ⁽³⁾ -150 ⁽¹⁾	60 ⁽³⁾ -165 ⁽¹⁾
Boudin d'hélophytes	10 ⁽³⁾ -30 ⁽²⁾	20-30 ⁽³⁾	50 ⁽³⁾ -60 ⁽¹⁾
Clayonnages	10 ^(2,3)	10-15 ⁽³⁾	10 ⁽³⁾ -120 ⁽¹⁾
Fascines	20 ⁽³⁾ -60 ⁽²⁾	50 ⁽³⁾ -60 ⁽³⁾	80 ⁽²⁾ -250 ⁽⁴⁾
Saules		50-70 ⁽⁴⁾	100-140 ⁽⁴⁾ 800 (20 ans) ⁽⁴⁾
Plantation d'arbre	20 ⁽²⁾		120 ⁽²⁾
Lit de plants et plançons	20 ^(2,3)	120 ⁽³⁾	140 ^(2,3)
Couche de branches à rejet	50 ^(2,3) -150 ⁽³⁾	150 ⁽³⁾ -300 ⁽³⁾	300 ^(2,3) -450 ⁽³⁾
Caissons végétalisés	500 ⁽³⁾	600 ⁽³⁾	600 ⁽³⁾
Enrochements	Végétalisés	100 ⁽³⁾ -200 ⁽²⁾	100 ⁽³⁾ -300 ⁽³⁾
	Nus	250 ⁽²⁾	250 ⁽²⁾

1 : Faber 2004 ; 2 : Schiechl et Stern 1996 ; 3 : Venti *et al.* 2003 ; 4 : Lachat 1994.

→ Limites de l'utilisation de la contrainte tractrice



Remarque sur l'usage des données : **les valeurs ont été calculées pour des crues subies par des ouvrages non détériorés.** Le faible nombre d'échantillons ne permet pas d'envisager une approche statistique. **Il s'agit donc d'évaluations ponctuelles et indicatives, ne fixant en aucun cas les limites d'emploi des techniques.**

Par conséquent, il est possible d'installer des ouvrages exposés à des contraintes supérieures ou inférieures à celles qui figurent dans le tableau, sans toutefois avoir de garanties sur le résultat. La résistance d'un ouvrage peut en effet fluctuer en fonction de la nature du sol, de l'altitude et des conditions météorologiques, de la conception de l'ouvrage, des modalités de mise en œuvre de l'ouvrage et du matériel végétal, ou encore de la variabilité génétique des végétaux utilisés.

Gerstgraser (2000) a mis en évidence des différences d'approximation dans les modes de calcul selon les auteurs, qui conduisent à augmenter l'incertitude sur les valeurs relatives.

Le calcul de la contrainte tractrice ne prend pas en compte les différences de rugosité de la berge, ni l'effet de la végétation sur le champ de vitesse. Dans certains cas, une forte rugosité générée par un couvert arbustif dense

peut ralentir le courant et donc réduire les forces d'arrachement sur une protection de berge, alors que le même type de protection avec une rugosité plus faible n'aurait pas tenu. Le calcul de la contrainte tractrice est le même dans les deux cas, mais la tenue de l'ouvrage va varier en fonction du type de couverture végétale. Enfin, le calcul de la force tractrice n'est théoriquement valable que pour des tronçons rectilignes. Or, si un ouvrage est construit en partie convexe ou concave, le calcul de la force tractrice est le même, mais l'ouvrage aura plus de chance d'être arraché en rive concave.

Les valeurs de contraintes tractrices recensées dans le tableau 1 sont utilisées pour étayer le choix des techniques. Elles ne doivent être utilisées qu'à titre indicatif.

3.2.3. Pente des berges et résistance des ouvrages

Coucher la berge (réduire sa pente) est une solution efficace pour lutter contre l'érosion et les glissements. De plus, le fait de coucher les berges conduit généralement à une diminution des coûts directs des ouvrages. Mais bien souvent, cette solution ne peut pas être envisagée, particulièrement en zone urbaine ou semi-urbaine, lorsque la pression foncière est forte, ou dans les vallées étroites de montagne où l'espace est plus restreint qu'en plaine. En fonction des enjeux à protéger et de l'espace disponible, une pente minimum sera retenue, conditionnant ainsi le choix de la technique de restauration.

→ Conclusion

La volonté de dimensionner les ouvrages de génie végétal en fonction de leur résistance mécanique est relativement récente. Pour le génie civil, en revanche, de nombreux modèles mécaniques permettent de dimensionner finement les ouvrages en fonction des contraintes en jeu. De tels outils n'existent pas en ce qui concerne le génie végétal. En effet, il existe une homogénéité dans les matériaux de constructions traditionnels (béton, acier, etc.) qui fait défaut dans le monde vivant, ce dernier étant souvent plus complexe à modéliser sous forme d'équation.

À ce jour, c'est le savoir-faire et l'expérience du concepteur qui prévaut dans la justification et le dimensionnement des ouvrages de génie végétal, et les calculs ne sont là que pour étayer un choix « empirique ».

3.2.4. Vieillessement des ouvrages

3.2.4.1. Le retour d'expériences Géni'Alp

Dans le cadre du projet Géni'Alp, un retour d'expériences a été mené afin de collecter des informations sur les techniques de protection de berges employées sur des cours d'eau de montagne des Alpes et d'évaluer leur résistance. Il s'est également agi d'analyser les succès et échecs des différentes techniques.

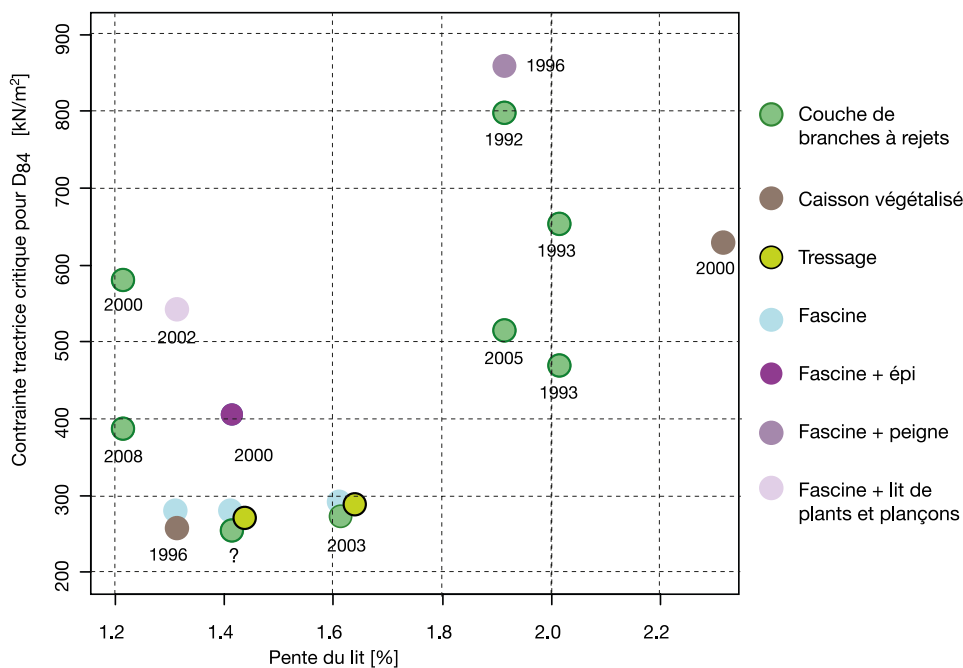


Fig. 15 - Différentes techniques de génie végétal utilisées dans les 18 ouvrages du retour d'expériences Géni'Alp, en fonction de la pente du cours d'eau et de la contrainte tractrice pour D_{84} (l'année de réalisation est indiquée).

Les sites ont été sélectionnés principalement sur l'Arc alpin, mais aussi dans d'autres massifs, sur des cours d'eau dont la pente est supérieure à 1 %. Treize sites et dix-huit ouvrages en France et en Italie sont ici présentés. Ces ouvrages ont globalement bien « réussi ».

Chaque ouvrage a fait l'objet d'une analyse descriptive et historique, de relevés topographiques, et d'une analyse de la granulométrie du fond du lit.

Une synthèse est proposée sous forme graphique et reprend, pour chaque ouvrage, la pente du lit, la contrainte tractrice pour mettre en mouvement la granulométrie D_{84} , la technique employée et l'année de construction (fig. 15). La contrainte tractrice calculée pour D_{84} correspond à la contrainte pour laquelle 84 % des matériaux sont mis en mouvement, ce qui veut dire que le lit du cours d'eau est alors profondément remanié. Elle est calculée à partir de l'expression suivante :

$$\tau_{crit} = \theta_{crit} \times g \times (\rho_w - \rho) \times D_{84}$$

Où :

- θ_{crit} = le nombre de Shields critique ;
- g = la pesanteur ;
- ρ_w = la masse volumique du transport solide ;
- ρ = la masse volumique de l'eau ;
- D_{84} = le diamètre des grains.

Ce retour d'expériences a mis en évidence que des techniques de génie végétal pur (sans enrochement de pied de berge) et des techniques mixtes (avec enrochement de pied de berge) tiennent depuis 15 à 20 ans sur les berges de cours d'eau ayant des pentes de plus de 2 % et charriant des blocs de grosse dimension. On peut ainsi noter la bonne tenue d'un ouvrage en pure technique végétale (fascine + peigne), réalisé en 1996 par le Saterce (service du Conseil Général de la Savoie) sur l'Isère, près de Bourg-Saint-Maurice (fig. 16).

Des couches de branches à rejets avec enrochement de pied de berge sur des rivières alpines avec des pentes de l'ordre de 2 % résistent depuis une vingtaine d'années en Italie (comme l'ouvrage de Riffiano décrit ci-après, ou celui d'Oulx, chap. II.4.1.5). Ce dernier a déjà résisté à de fortes crues. Ces techniques largement répandues en Italie, notamment sous l'impulsion de F. Florineth, sont toujours utilisées. Elles sont réalisées avec des tiges de gros diamètre qui font souvent de 5 à 10 cm et ne sont pas recouvertes de géotextiles.

On peut également noter un ouvrage intéressant, puisque constitué uniquement de génie végétal (épaves en fascines et fascines de pied de berge), sur l'Adour, à Montgaillard (Hautes-Pyrénées - France - chap. II.4.2.2, plus spécifiquement dédié aux différentes techniques de génie végétal utilisables en rivière de montagne).

3.2.4.2. Le cas d'un ouvrage de couches de branches à rejets à Riffiano (Italie)

La Passer est une rivière du Sud Tyrol en Italie. Elle prend sa source à 3 479 m d'altitude à proximité de la frontière austro-italienne. Sur le tronçon étudié, le lit majeur est occupé par des terres agricoles, avec une production intensive de pommes à couteau. Suite à des crues importantes, le gestionnaire a décidé de protéger ces vergers avec des techniques de couches de branches à rejets, combinées avec un enrochement de pied de berge (fig. 17 à 23).

Cet ouvrage datant de 1992 a fait l'objet d'une étude menée par l'Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, visant à analyser le vieillissement des couches de branches (Stangl et Weinbacher 2006).

Les caractéristiques du cours d'eau au droit de l'ouvrage sont données dans le tableau 2.



Fig. 16 - Ouvrage de génie végétal à Bourg-Saint-Maurice : (a) en 1996 ; (b) en 2011. Si la fascine inférieure est immergée et n'a pas repris, des arbres se sont développés à partir de la fascine supérieure.



Fig. 17 - Vue générale de l'ouvrage de couches de branches à rejets avec enrochement en pied de berge, sur la rive droite de la rivière Passer à Rifiano : (a) situation à la fin des travaux en 1992 ; (b) état en 2011.

Tab. 2 - Caractéristiques de la rivière Passer au droit de l'ouvrage.

Pente du profil en long	1,9 %
D ₈₄	279 mm
Débit de la crue centennale	13 m ³ /s
Altitude	444 m
Longueur de l'aménagement	110 m environ

Observations de terrain

L'état général de l'ouvrage est bon, même s'il est possible d'apercevoir localement une légère érosion en pied de berge derrière l'enrochement. L'ouvrage s'intègre parfaitement dans le paysage à tel point qu'il est difficile de le déceler autrement que par la présence des enrochements. Les saules ont largement colonisé l'espace. Cependant la renouée du Japon (*Reynoutria japonica*) et le robinier (*Robinia pseudoacacia*), deux espèces néophytes à comportement invasif, sont présents en sommet de berge.

Mise en place de l'ouvrage

Comme le montre la figure 18, on peut observer la mise en place de couches de branches à rejets avant la pose de l'enrochement de pied de berge. À noter l'importance du diamètre et de la longueur des branches utilisées. Ces dernières sont de véritables petits arbres. Cependant, il

est souvent d'usage d'utiliser du matériel de plus petit diamètre afin de limiter les possibilités d'affouillement entre les branches.

Observations 15 ans après la mise en place

La figure 23 illustre la structure souterraine des couches de branches à rejets. La berge est protégée par une succession de troncs vivants le long de la berge. Chacun de ces troncs est ancré profondément grâce à un système racinaire dense.

L'intérêt de ces trois photos (fig. 20, 21 et 22) et de la figure 23 est de mettre en évidence l'importance de l'ancrage racinaire et de la protection apportée à la berge par les couches de branches, 15 ans après leur installation.

La berge apparaît ainsi protégée par un dense treillis de saules vivants. Ces troncs de saules vivants et couchés sur le sol se succèdent, alignés parallèlement les uns aux autres et perpendiculairement au cours d'eau le long de la berge. Certains de ces troncs affleurant le sol de la berge peuvent atteindre 30 cm de diamètre au bout de 15 ans. Comme on peut le constater sur les photos, ils développent un système racinaire dense et profond qui va protéger le sol et la berge contre l'érosion. La berge est ainsi protégée par une sorte de carapace souple et vivante.

Ces structures végétales vivantes expliquent la forte résistance mécanique à l'érosion, telle qu'elle a été observée (tab. 1).



Fig. 18 - Mise en place de couches de branches à rejets.



Fig. 19 - Branches et leurs racines mises à nu artificiellement sur un ouvrage de type couches de branches, 15 ans après sa mise en place.



Fig. 20 - Gros plan sur une branche à rejets, avec une mire pour repère, 15 ans après sa mise en place.



Fig. 21 - Extraction d'une branche des couches de branches à rejets, avec ses racines, 15 ans après sa mise en place.

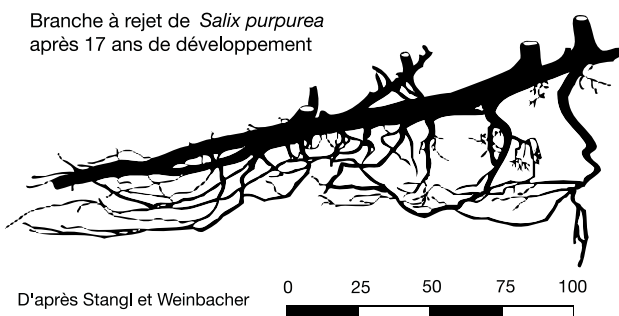


Fig. 22 - Coupe d'une branche à rejets une quinzaine d'années après sa mise en place.

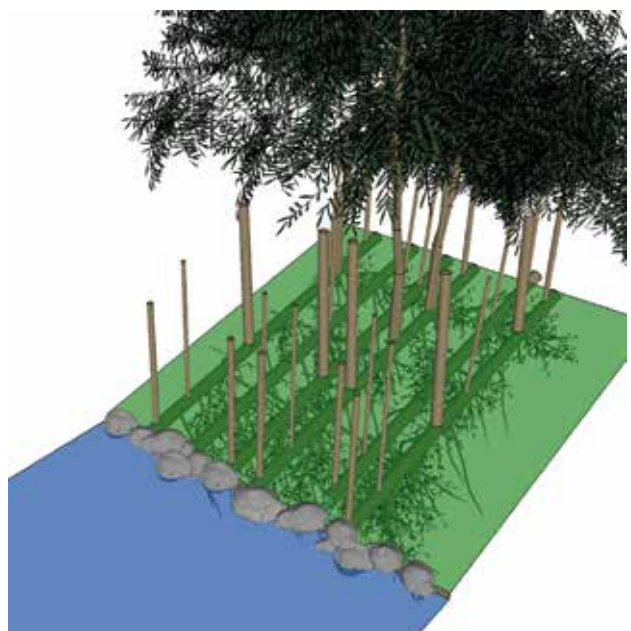


Fig. 23 - Schéma de principe sur le vieillissement de couches de branches à rejets avec enrochement en pied.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Le présent chapitre n'a pas pour objet de décrire en détail les modalités de réalisation des techniques classiques, comme les fascines, lits de plants et plançons, etc., en donnant des profils types généraux. En effet, ces techniques et leur mise en œuvre sont déjà très bien décrites dans les guides francophones existants (Lachat 1994 ; Zeh 2007 ; Adam *et al.* 2008).

Nous présentons ici une série d'exemples portant sur des ouvrages de génie végétal réalisés sur des rivières à forte pente, ou offrant des perspectives en ce sens. Cinq des six chantiers pilotes réalisés dans le cadre du projet Géni'Alp sont aussi présentés. Nous insistons néanmoins sur certains détails techniques, soit parce qu'ils sont particulièrement importants ou peu abordés jusque-là, soit parce qu'ils présentent un intérêt particulier dans le contexte des rivières à forte pente et/ou d'altitude.

Sont ainsi présentées différentes techniques végétales (fascines, lits de plants et plançons, couches de branches à rejets) souvent associées avec des enrochements de pied de berge et parfois avec des épis (en fascines ou en enrochement).



Fig. 1 - Mise en place des plançons de saule sur un des chantiers pilotes de Géni'Alp.

Deux chantiers de génie végétal pur sont ensuite présentés, bien qu'ils ne concernent pas des cours d'eau de montagne. Toutefois, il s'agit de cours d'eau de pente supérieure à 1 % avec un transport solide important. Ces ouvrages sur lesquels on a une dizaine d'années de recul illustrent l'utilisation possible de techniques purement

végétales qui peuvent s'appliquer sur des rivières de montagne présentant des conditions de pente similaires.

Enfin, un paragraphe est consacré aux enrochements végétalisés, même si l'utilisation de ces techniques répond difficilement à la définition de génie végétal. En effet, il nous est apparu intéressant de développer un paragraphe sur ces techniques car, dans certains contextes, on n'a parfois pas d'autre alternative que d'utiliser de l'enrochement et, quitte à y recourir, il est préférable sur un plan environnemental de le végétaliser. Sans parler des enrochements existants qui constituent un héritage vieux parfois de plusieurs décennies, qu'il faut gérer et dont la végétalisation *a posteriori*, permet d'atténuer certains désagréments visuels et environnementaux. Le niveau d'information technique sur les ouvrages est variable et fonction des données disponibles (il existe par exemple moins d'informations sur les ouvrages anciens).

4.1. Techniques végétales et techniques mixtes en cours d'eau de montagne

Ces techniques sont présentées à travers six réalisations. Les trois premières et la dernière sont des chantiers pilotes réalisés dans le cadre du projet Géni'Alp sur des cours d'eau avec des pentes allant de 3 à 10 %.

- **le Pamphiot à Anthy-sur-Léman** (Haute-Savoie - France), associant fascines, caisson et lits de plants et plançons ;
- **l'Avançon d'Anzeindaz à Bex et Gryon** (Vaud - Suisse), associant enrochements de pied de berge, épis et seuils, également en enrochements, avec lits de plants et plançons et couches de branches à rejets ;
- **la Petite Gryonne à Ollon** (Vaud - Suisse), associant fascines de pied de berge, lits de plants et plançons, caissons végétalisés et des seuils en bois et enrochements ;
- **le Rio di Bardonecchia à Oulx** (Piémont - Italie), associant couches de branches à rejets avec enrochement de pied de berge ;
- **l'Arve à Cluse** (Haute-Savoie - France), associant enrochement ou fascines de pied de berge, lits de plants et plançons et boutures ;
- **le Bens à Saint-Hugon** (Isère - France), associant enrochement de pied de berge avec caissons végétalisés et lits de plants et plançons.

4.1.1. Chantier d'Anthy-sur-Léman

Ce chantier a été réalisé dans le cadre du projet Géni'Alp et a vu la mise en œuvre de fascines et de lits de plants et plançons. Sur la partie amont de l'ouvrage, il n'y a pas de fascines et les lits de plants et plançons démarrent directement en pied de berge.

Ce chantier présente un intérêt particulier car les ouvrages de protection de berge mis en place sont en techniques purement végétales, alors que la pente du profil en long est importante. De plus, la technique retenue de lits de plants et plançons sans protection de pied de berge est originale.

4.1.1.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : France
Commune : Anthy-sur-Léman (Haute-Savoie)
Altitude : 410 m
Latitude-longitude : 46°21'40" N, 06°26'44" E
Maître d'ouvrage : SYMASOL
Maître d'œuvre : BIOTEC
Enjeu sécuritaire : bâtiment
Type de dégradation de berge : érosion + glissement de terrain

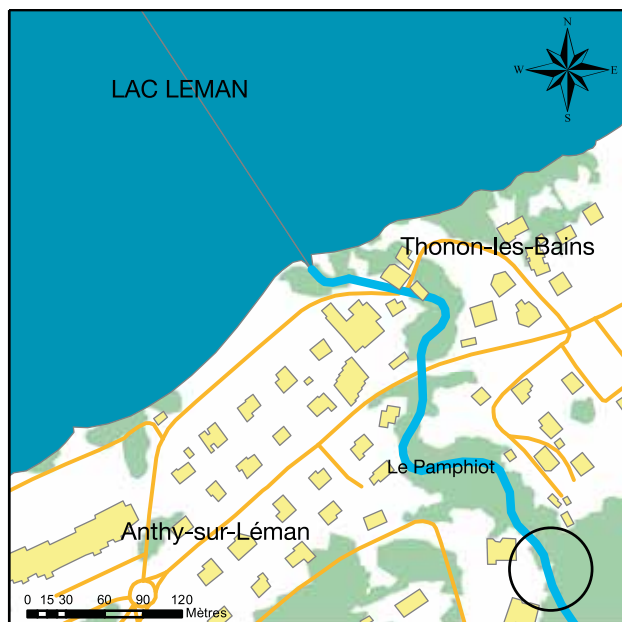


Fig. 2 - Plan de situation du projet d'Anthy-sur-Léman.

Le cours d'eau : le Pamphiot

Pente de profil en long : 3,4 %
Débit pris en compte pour le dimensionnement de l'ouvrage : 13 m³/s [crue centennale]

Contexte et enjeux

Le Pamphiot subit de graves phénomènes d'érosion de berge et de glissements de terrain tout au long de la

partie aval de son cours jusqu'à son embouchure dans le lac Léman. Sur la commune d'Anthy-sur-Léman, une construction est menacée par un glissement de terrain.

Ce type de glissement représente un faciès d'érosion présent sur de nombreux cours d'eau de montagne. Le traitement de ce glissement par des techniques de génie végétal pur sur un cours d'eau à forte pente présente un intérêt particulier en termes d'exemplarité et de reproductibilité. L'érosion de berge de ce cours d'eau (dont le profil en long a une pente de 3,4 %) a donc été traitée avec des techniques purement végétales.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : fascines + boutures de saules, lits de plants et plançons, caisson en rondins végétalisés (mesure complémentaire intervenue pendant le chantier)
Orientation de l'ouvrage : est
Emplacement de l'ouvrage : rive gauche
Longueur de l'aménagement : 40 m
Date de réalisation : 2011
Montant total de l'investissement 35 320 € HT (y compris la pose du caisson bois végétalisé)

4.1.1.2. Description technique de l'ouvrage

➔ Zone amont – Partie glissement de terrain

Description de l'érosion

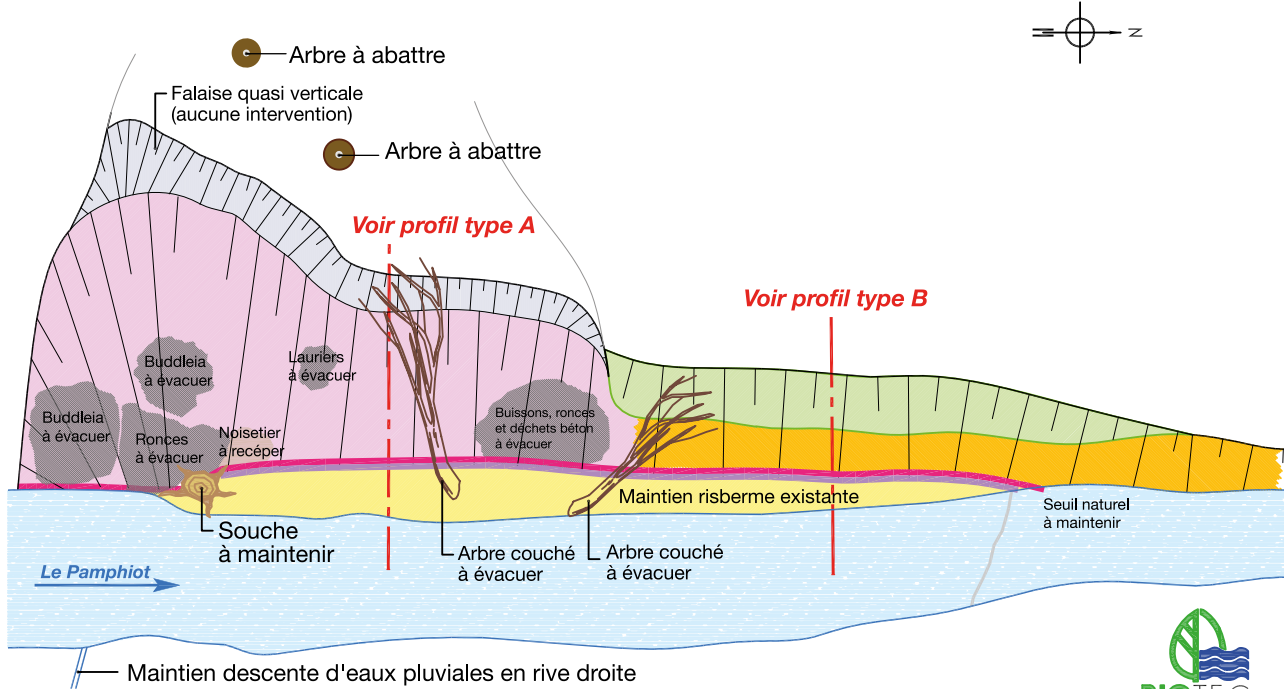
À quelques centaines de mètres de son embouchure au Léman, la berge rive gauche du Pamphiot présente, en léger extradors de courbure, un glissement de terrain en contrebas d'une construction. Sur une hauteur d'environ 5 m, le glissement présente un profil de pente environ égal à 1V/1H, au-dessus duquel se trouve une érosion en falaise verticale de 3 à 4 m de hauteur (fig. 3).






Le glissement, qui s'étend sur environ 20 m de longueur, s'opère sur une ancienne moraine de texture granulométrique variée, avec la présence d'un suintement à sa base, côté aval. Les matériaux constituant la base du glissement sont plus fins et de texture nettement argileuse.



Fig. 3 - État des lieux avant intervention.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Chantier sur le Pamphiot - Anthy-sur-Léman
Situation générale**Légende végétalisation ligneuse**

-  Fascine de saules (liste des plantes n° 1)
-  Lit de plançons (liste des plantes n° 2)
-  Lit de plants et plançons (liste des plantes n° 3)
-  Boutures de saules (liste des plantes n° 4)
-  Plantations d'arbustes (liste des plantes n° 5)

Travaux préliminaires

- Installations de chantier
- Implantation des ouvrages, piquetage et marquage des travaux

Travaux forestiers et de confortement

- Abattage de quelques grands arbres pour apport de lumière et limitation des effets de bras de leviers (marquage lors des travaux)
- Enlèvement d'embâcles, souches et espèces non indigènes sur l'emprise des travaux
- Débroussaillage de buissons et arbustes sur l'emprise des travaux
- Travaux de confortement (voir situation schématique)

Travaux de suivi et garantie des végétaux

- Contrôle et surveillance des ouvrages
- Fauchage et arrosage nécessaire au bon développement des végétaux
- Élimination des essences exotiques indésirables en bordure de cours d'eau

Fig. 4 - Plan de masse des travaux sur le Pamphiot
(source : BIOTEC).

Remarques

Afin de limiter des effets de bras de levier néfastes sur les racines des végétaux, et de favoriser la lumière nécessaire à la croissance, quelques abattages complémentaires ont été réalisés, ainsi que l'évacuation des différents buissons, ronciers, buddleias et autres embâcles de bois morts présents sur le secteur des travaux. Les saules sont des espèces pionnières qui ont besoin de lumière. Le manque de lumière est un facteur important d'échec dans la réalisation d'ouvrages de génie végétal.

La coupe et l'élagage des arbres susceptibles de faire de l'ombre aux ouvrages en milieu de journée augmentent grandement leurs chances de réussite (abattage d'une dizaine de sujets de 20-25 m de haut) (BIOTEC 2011).

Techniques retenues

Vu la pente du Pamphiot, qui lui donne un caractère torrentiel, il était nécessaire de faire appel à des techniques souples, qui supportent certaines déformations liées aux mouvements de terrain. Les techniques choisies doivent tolérer de légères déformations, qu'elles soient liées au glissement ou aux forces hydrauliques. La technique des lits de plançons constitue ainsi la base des éléments projetés. Cette technique est renforcée par la mise en place d'une fascine de saules à double rangée de pieux en pied de berge, sur la partie aval. Cette technique a pour objet d'augmenter la stabilité du pied de berge (fig. 5).

Sur la partie amont de l'ouvrage, aucun ouvrage de pied de berge n'est proposé, c'est le premier lit de plançons qui vient protéger le pied.

Il a été décidé de ne traiter que la partie inférieure du glissement afin de stabiliser son évolution. L'intervention sur la partie supérieure à évolution lente présentait peu d'intérêt pour des coûts importants.

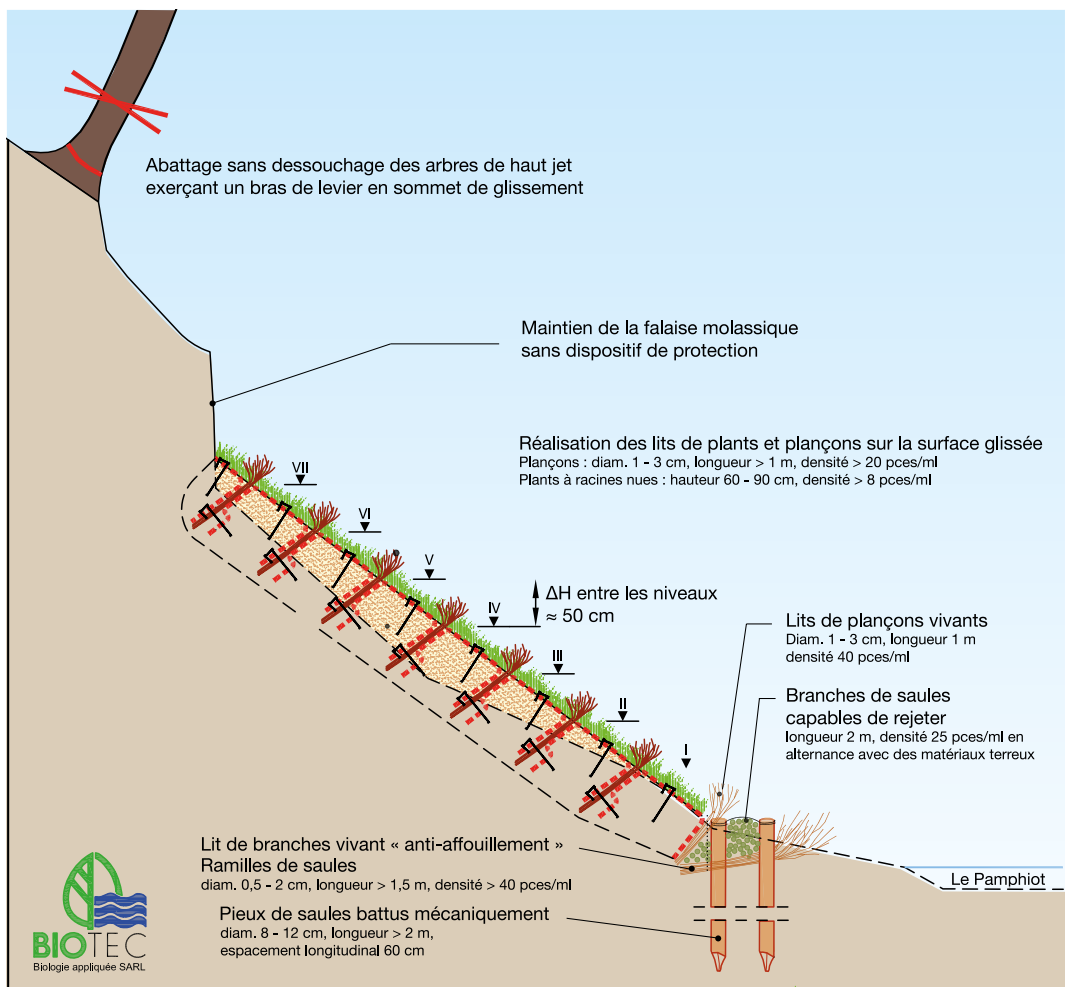


Fig. 5 - Coupe transversale sur le site amont, la fascine de pied de berge initialement envisagée n'a finalement pas été retenue (source : BIOTEC).



Fig. 6 - Le site après travaux : le premier lit de plançon en pied de berge et le caractère « fluide » des matériaux sont visibles.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

➔ Zone aval – Partie érosion de berge

Description de l'érosion

Toujours en rive gauche et à l'aval de la lentille de glissement, on trouve une érosion de la berge gauche sur une quarantaine de mètres (fig. 7). Cette érosion n'est pas dynamique et est vraisemblablement active uniquement lors d'épisodes pluvieux très importants. Le processus érosif est plus marqué sur les quinze premiers mètres à la suite du glissement alors que la partie aval, constituée de blocs/cailloux de plus gros diamètre, est plus stable. Sur cette partie, de nombreux embâcles occupent le lit (BIOTEC 2011).

Techniques retenues

Toute la partie aval est protégée en pied de berge par une fascine de saule. La berge étant plus stable et la pente plus douce, la technique du lit de plants et plançons n'a pas été retenue ici. Au-dessus de la fascine et dans la moitié inférieure de la berge, des boutures de plusieurs espèces de saules ont été installées. Enfin, sur la moitié supérieure de la berge, moins humide, des essences forestières arbustives ont été mises en places (BIOTEC 2011).

Aléas de chantier : la poche d'argile

Le chantier s'est déroulé à l'automne 2011. À la suite d'un épisode pluvieux, les suintements au-dessus de la couche d'argile se sont amplifiés. Le sol s'est donc mis à glisser au milieu de l'ouvrage (fig. 9). Le géotextile et le premier lit de plants et plançons ont glissé dans le cours d'eau de par la fluidité des argiles gorgées d'eau. Après plusieurs essais, il a été décidé de mettre en place un caisson végétalisé sous les lits de plants et plançons à l'endroit et à la hauteur de la poche d'argile. De cette manière, une structure bois solide et un géotextile permettent de contenir les matériaux fluants, dépourvus de consistance (fig. 11).



Fig. 7 - Partie aval du chantier : (a) avant travaux, la berge érodée retient les embâcles ; (b) pendant les travaux, mise en œuvre de la fascine vive et bouturage de la berge.



Fig. 8 - Détail de la fascine avec les branches anti-affouillement.



Fig. 9 - Mise en place d'un caisson végétalisé pour maintenir la poche d'argile.

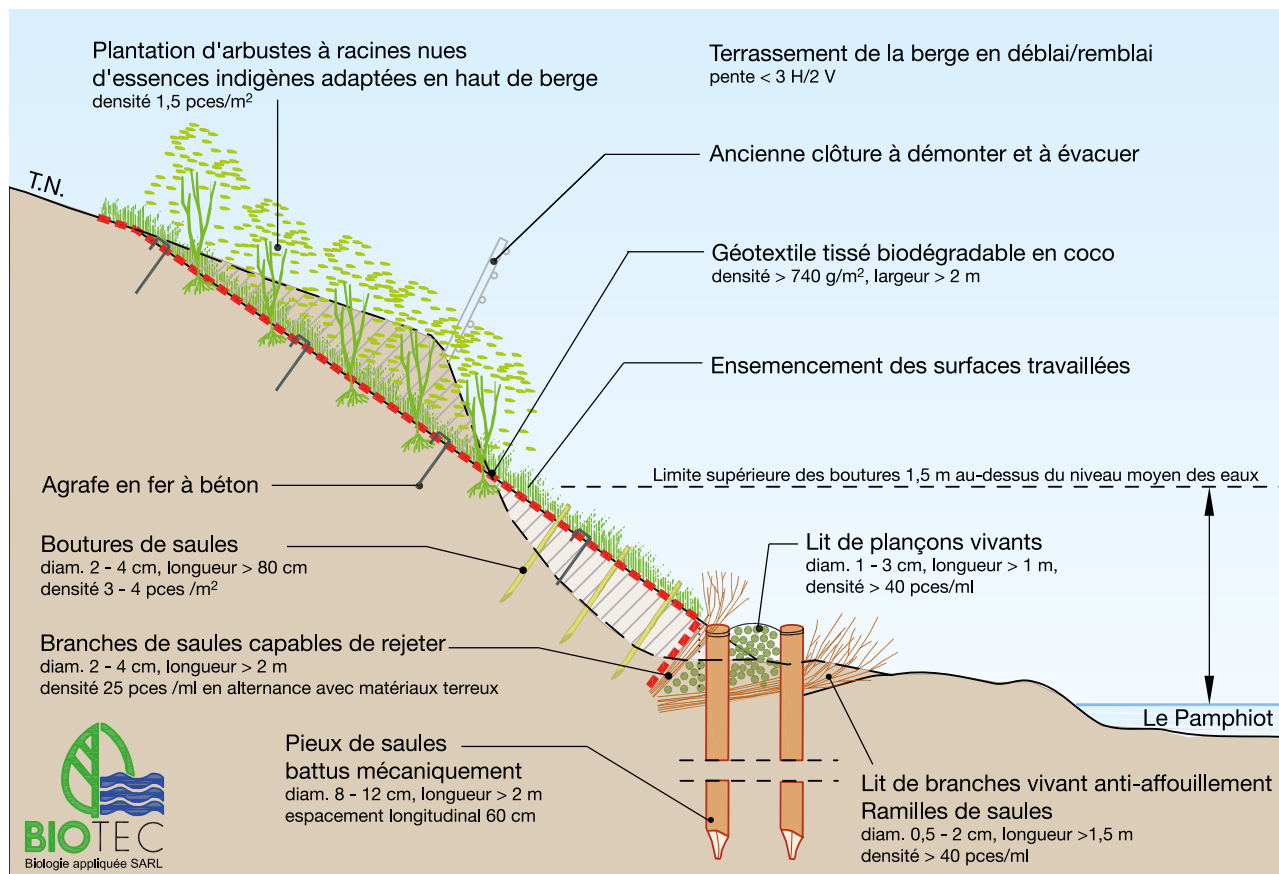


Fig. 10 - Coupe transversale de la zone aval (source : BIOTEC).



Fig. 11 - Chantier terminé au droit de la poche d'argile.

4.1.1.3. Végétation

➔ Espèces proposées dans le cahier des charges (CCTP) pour les ouvrages (BIOTEC 2011)

Lits de plants et plançons

Tab. 1 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants et plançons : (a) plançons de saules ; (b) plants.

(a) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines

(b) Espèces	
<i>Cornus sanguinea</i>	Cornouiller sanguin
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier
<i>Euonymus europaeus</i>	Fusain d'Europe
<i>Salix caprea</i>	Saule marsault
<i>Sambucus nigra</i>	Sureau noir
<i>Viburnum lantana</i>	Viorne lantane
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne aubier

Recueil d'expériences techniques

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants



Fig. 12 - Vue de l'ouvrage au printemps suivant l'implantation.

Fascine de saule

Tab. 2 - Liste des espèces utilisées dans la fascine de saule : (a) pieux vivants ; (b) branches anti-affouillement (ramilles de saules) ; (c) branches de la fascine.

(a) Espèces	
<i>Salix alba</i>	Saule blanc

(b) Espèces	
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant

(c) Espèces	
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant

Végétalisation de la partie supérieure des berges

Tab. 3 - Liste des espèces utilisées sur la partie supérieure de la berge : (a) boutures de saules ; (b) plants.

(a) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines

(b) Espèces	
<i>Cornus sanguinea</i>	Cornouiller sanguin
<i>Crataegus laevigata</i>	Aubépine épineuse
<i>Crataegus monogyna</i>	Aubépine à un style
<i>Euonymus europaeus</i>	Fusain d'Europe
<i>Ligustrum vulgare</i>	Troëne commun
<i>Lonicera xylosteum</i>	Camerisier à balai
<i>Prunus spinosa</i>	Prunellier
<i>Rosa canina</i>	Églantier
<i>Sambucus nigra</i>	Sureau noir
<i>Viburnum lantana</i>	Viorne lantane
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier

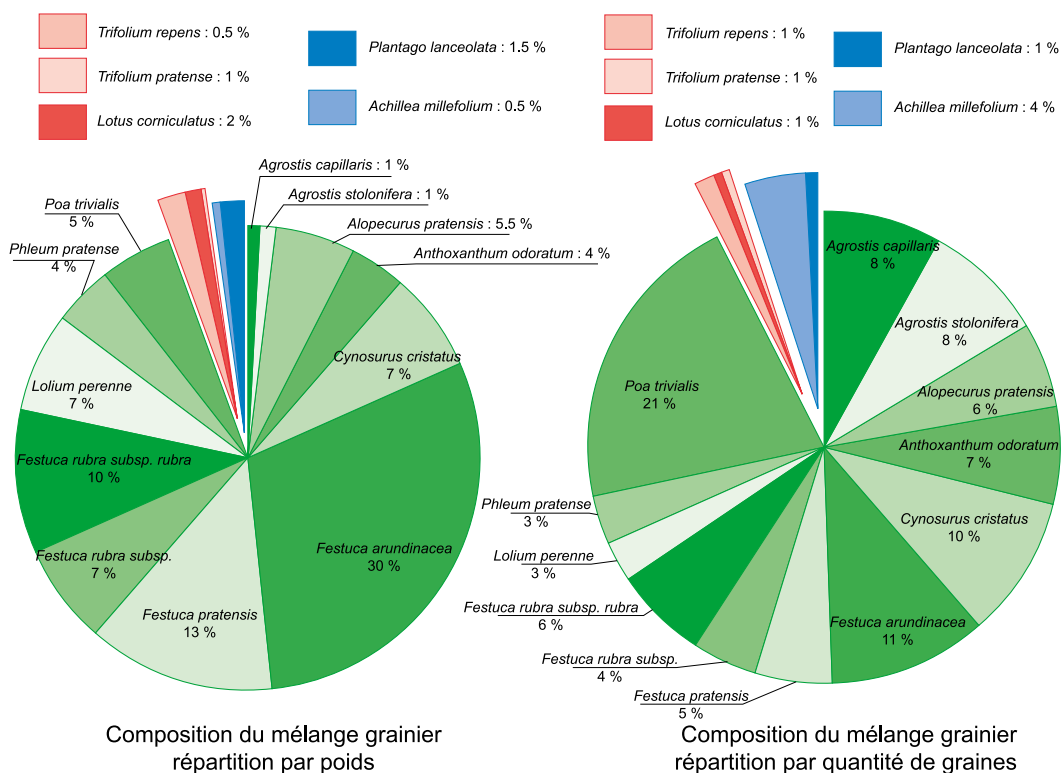


Fig. 13 - Mélange grainier prévu au CCTP sur les surfaces ensemencées (source : BIOTEC).

4.1.2. Chantier d'Ollon

Cet aménagement a été réalisé dans le cadre du projet Géni'Alp et met en œuvre une combinaison de techniques de génie biologique pur, de techniques mixtes et de génie forestier. La pente moyenne du profil en long du tronçon aménagé est de l'ordre de 10 %, et des techniques de protection de pied de berge avec du génie végétal sont appliquées sur un secteur à près de 8 % de pente.

4.1.2.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : Suisse

Commune : Ollon (Vaud)

Altitude : 1 323 m

Latitude-longitude : 46°18'20" N, 07°03'33" E

Maître d'ouvrage : commune d'Ollon

Maître d'œuvre : hepia

Enjeux sécuritaires : encombrement de la voûte d'un pont et stabilité d'un chemin

Type de dégradation de berge : dégradations de berges par phénomènes conjoints de glissement et érosion de berges

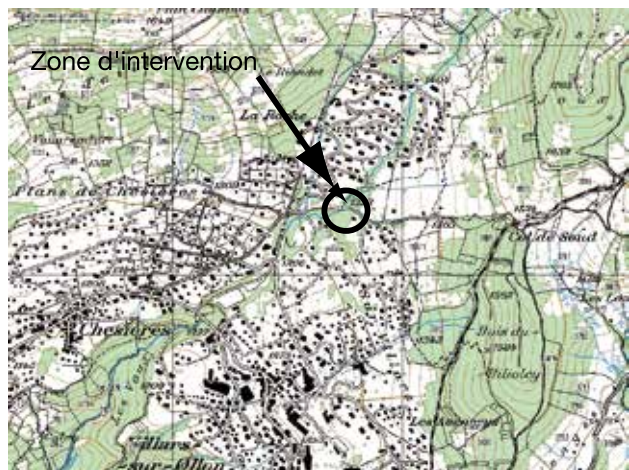


Fig. 14 - Plan de situation de l'ouvrage d'Ollon.

Le cours d'eau : la Petite Gryonne

Pente du profil en long : 7 à 10 %

Débit de crue centennale : 17 m³/s

Contexte et enjeux

L'aménagement se situe immédiatement en amont d'un pont voûté qui passe sous le chemin de la Cousse (carrossable avec revêtement bitumineux), sur la partie haute de la station de Villars-sur-Ollon (fig. 15). En amont du pont, une herse a été mise en place, permettant d'arrêter les embâcles avant qu'ils n'aillent obstruer la voûte. Cependant, une instabilité généralisée de la berge gauche en amont engendre des apports excessifs de matériaux gravo-terreux dans le lit, qui voit sa section se rétrécir par endroit. Lors des crues, ces matériaux gravo-terreux sont mobilisés, ne sont pas arrêtés par la herse et sont susceptibles d'obstruer le pont. La morphologie de la berge gauche est constituée d'une succession de petits glissements et de niches d'érosion en alternance. En

berge droite, quelques niches d'érosion et des portions de berges sans végétation (consécutivement à des dépôts de matériaux) menacent la stabilité d'un chemin.

Sur le tronçon aménagé, le cours d'eau est relativement encaissé et les possibilités d'élargissement du lit sont faibles. L'encaissement est de plus en plus marqué d'amont vers l'aval, au fur et à mesure qu'on s'approche du pont, l'entrée de ce dernier étant précédée d'un enrochement existant, sur environ 5 m linéaires. La pente du profil en long est variable mais toujours au-dessus de 5 %, pour dépasser localement les 15 %.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées :

Berge droite : caissons en rondins, végétalisés.

Berge gauche : fascine de saules à double rangée de pieux pour la protection du pied de berge, surmontée de 3 niveaux de lits de plants et plançons. Puis passage à un ouvrage mixte avec enrochement de pied de berge surmonté également de 4 niveaux de lits de plants et plançons.

Mise en place d'un seuil en rondins à l'aval immédiat du tronçon aménagé avec des caissons.

Orientation de l'ouvrage : berge droite : sud-est ; berge gauche : nord-ouest.

Date de réalisation : mai 2012

Montant total de l'investissement : 83 000 CHF



Fig. 15 - Le site lors de l'état des lieux, noter le pont à l'aval.

4.1.2.2. Description technique de l'ouvrage

Fascine de saules à double rangée de pieux

Malgré une granulométrie grossière du fond du lit, typique des cours d'eau de montagne, le pied de la berge gauche est constitué de matériaux argileux, qui ont tendance à fluer. Cette texture de sol permet le battage mécanique de pieux, donc, *a priori*, l'installation d'une protection de berge en génie végétal pur. Le choix s'est porté sur une fascine de saules à double rangée de pieux qui doit fixer le pied de berge et le protéger à la fois de l'érosion, mais également des coulées de matériaux argileux provenant de la berge. L'implantation de cette fascine se fait légèrement en retrait du pied de berge initial, dont la limite était influencée par les coulées, ce qui permet un léger élargissement du lit mineur par rapport à la situation initiale avant travaux. Compte tenu que sur cette section de cours d'eau, le profil en long présente une pente de près de 8 %, la fascine doit être particulièrement résistante.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Une double rangée de pieux de robiniers d'une longueur de 2 m et battus mécaniquement est installée en pied de berge (fig. 16). Le noyau central, constitué des branches de saules capables de rejeter et de matériaux terreux, est particulièrement large (40-50 cm) et posé sur un lit de ramilles anti-affouillement, posées perpendiculairement au courant. Derrière la fascine, des branches de saules en densité élevée (25 pièces/m) sont dressées et appuyées sur cette dernière. Elles contribuent à renforcer la transition entre l'ouvrage de protection de pied de berge et la zone de lits de plants et plançons. Les zones de transition entre deux techniques représentent en effet toujours des points de faiblesse, qu'il faut particulièrement soigner.



Fig. 16 - Fascine à double rangée de pieux en cours de réalisation.

Lits de plants et plançons

Au-dessus de la fascine, la berge est stabilisée avec 3 niveaux de lits de plants et plançons, renforcés avec un treillis de coco d'une densité de 740 g/m² (fig. 17). Cette technique très souple et d'une charge très limitée convient particulièrement pour des terrains instables qui seront vraisemblablement encore soumis à quelques mouvements et déformations. La grande densité de végétaux mise en œuvre avec cette technique, et les développements racinaires denses qui se développent rapidement en profondeur compte tenu de l'enfouissement partiel des branches de saules et des plants forestiers, doivent permettre un effet de drainage important, par phénomène d'évapotranspiration. Enfin, ces structures de végétation dense, placées perpendiculairement à la pente, forment des barrages contre les phénomènes de ruissellement et de ravinement.



Fig. 17 - Fascine pour la protection du pied de berge surmontée de lits de plants et plançons.

Enrochement de pied de berge

Afin de se raccorder à l'enrochement existant qui précède le pont, et pour mieux s'adapter à l'encaissement progressif du cours d'eau vers l'aval, la fascine s'arrête après 20 m pour laisser la place à un enrochement de pied de berge dans un premier temps, puis d'un enrochement plus imposant, pour retrouver le niveau de l'ouvrage existant. Les enrochements sont également accompagnés en berges par 4 niveaux de lits de plants et plançons.

Caissons en rondins, végétalisés

En rive droite, la présence d'un chemin en sommet de berge ainsi qu'une pente sévère du talus nécessitent un aménagement qui fasse office d'ouvrage de soutènement. Raison pour laquelle le choix s'est porté sur des caissons en rondins, dont la structure bois (rondins de mélèze) produit immédiatement cet effet de soutènement (fig. 18). Pour être protégé de tout phénomène d'affouillement, le caisson est ancré à une profondeur de 1 m sous le niveau du fond du lit. Sur ce premier mètre, le caisson est uniquement rempli avec des matériaux graveleux relativement grossiers. Au-dessus, il l'est cette fois avec des matériaux graveleux-terreux permettant la végétalisation des structures bois. À noter que pour éviter tout risque d'évidement du caisson en cas de crue, ces matériaux de remplissage sont contenus dans un géotextile. À l'arrière du caisson, une chemise drainante constituée de matériaux graveleux a été mise en place.



Fig. 18 - Caissons en rondins, végétalisés, pour soutenir le chemin en rive droite.

Seuil en rondins

Compte tenu de la pente du profil en long et du fait que sur un certain linéaire les berges gauche et droite sont stabilisées, produisant ainsi un effet de chenalisation, cette stabilisation des berges crée ainsi un risque d'incision du lit. Pour écarter ce risque, un seuil de fond est mis en place à l'aval immédiat du tronçon aménagé par un caisson en rive droite et une fascine en rive gauche (fig. 18 et 21). Ce seuil permet de fixer le niveau du fond du lit. Sur un cours d'eau de largeur modeste, le choix d'un seuil en rondins est possible. Le fort ancrage latéral améliore la stabilité de l'ouvrage. Là aussi, le bois utilisé est du mélèze.

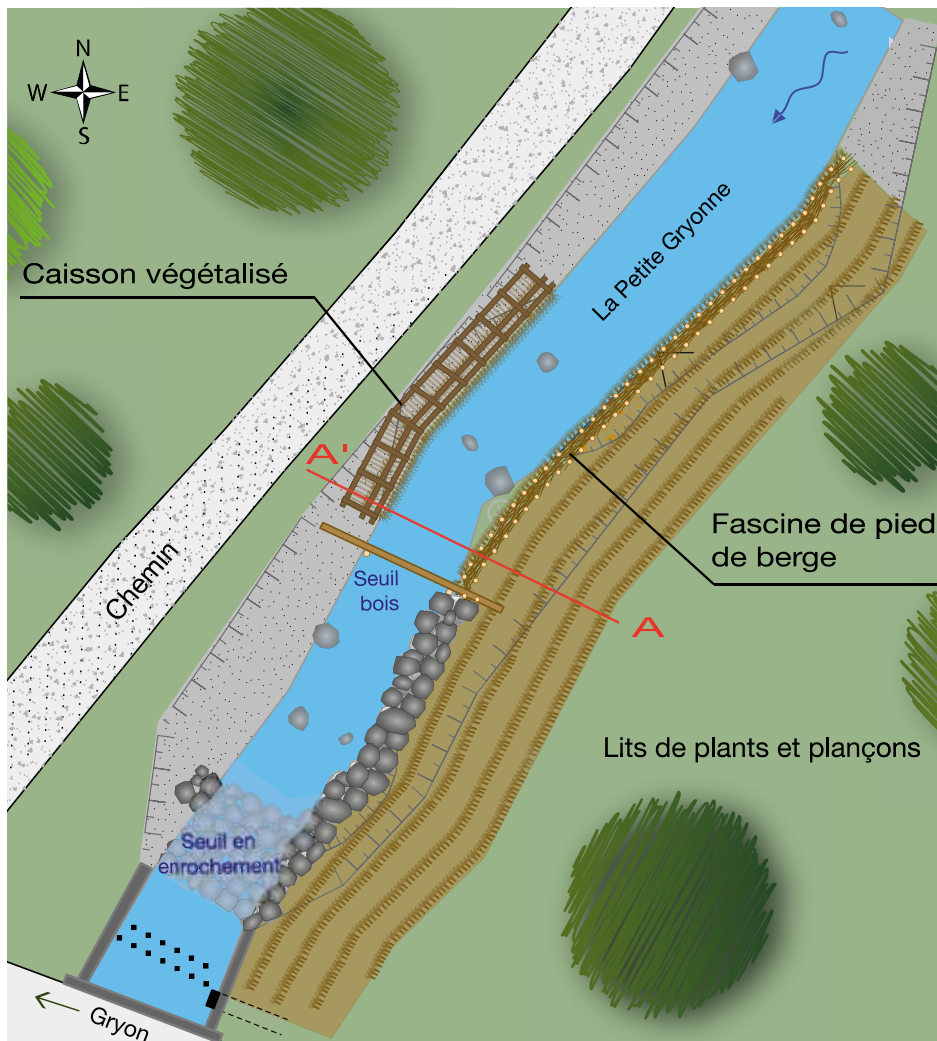


Fig. 19 - Vue d'ensemble du projet.

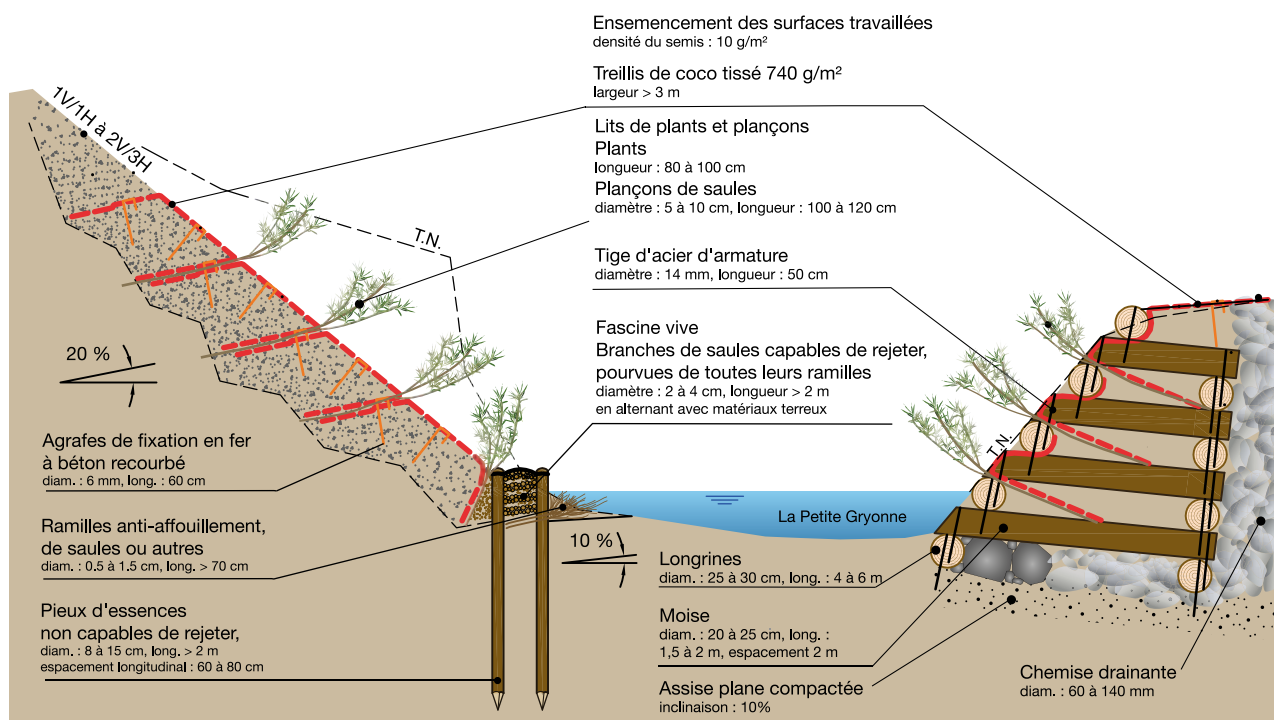


Fig. 20 - Coupe AA' montrant le caisson et la fascine surmontée de lits de plants et plançons.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants



Fig. 21 - Seuil en rondins pour stabiliser le profil en long. À droite, passage à un enrochement de pied de berge à l'aval du seuil.

4.1.2.3. Végétation

En ce qui concerne les saules, le choix s'est porté sur les espèces les plus structurantes des ripisylves des étages montagnard et subalpin inférieur. L'altitude du site ne justifie pas encore l'utilisation d'espèces typiquement alpines. La totalité des saules a été prélevée en milieu naturel aux environs de 1 500 m d'altitude, ce qui a permis de gérer l'avancement de la végétation, malgré la date relativement tardive des travaux. De plus, les branches de saules ont été prélevées 15 jours avant les travaux et entreposées au contact de l'eau, dans de grands conteneurs, ce qui a freiné quelque peu leur développement, en attendant leur mise en place.

La végétation des caissons et des lits de plants et plançons a été enrichie avec des espèces majoritairement buissonnantes et arbustives afin de ne pas trop charger les talus à terme. Le choix des essences s'est inspiré des formations forestières de montagne, notamment des sous-bois ou des clairières. Les espèces présentant une bonne aptitude à la formation de racines adventives ont été privilégiées, à l'exemple du sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) ou du sureau à grappes (*Sambucus racemosa*), puisqu'elles produisent ainsi un meilleur effet d'ancrage dans les ouvrages. Dans les niveaux supérieurs de la berge gauche, comme la pente n'est pas excessive et que l'on se trouve éloigné du lit mineur, quelques sujets d'espèces arborescentes, comme le frêne (*Fraxinus excelsior*) ou l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), ont également été intégrés.

Compte tenu de la date tardive pour des travaux de génie végétal, l'ensemble des plants initialement prévus en qualité racines nues (plants forestier) a été livré en mottes ou en pots.

Fascine de pied de berge

Tab. 4 - Liste des espèces utilisées comme branches de la fascine.

Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Lits de plants et plançons

Tab. 5 - Liste des espèces utilisées sous forme de plançons : (a) niveau inférieur ; (b) moyen inférieur ; (c) moyen supérieur ; (d) supérieur.

(a) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(b) Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(c) Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(d) Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Tab. 6 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants : (a) niveau moyen inférieur ; (b) niveau moyen supérieur ; (c) niveau supérieur.

(a) Espèces	
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier
<i>Lonicera xylosteum</i>	Chèvrefeuille des haies
<i>Prunus padus</i>	Merisier à grappes
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier
(b) Espèces	
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier
<i>Lonicera xylosteum</i>	Chèvrefeuille des haies
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Sambucus racemosa</i>	Sureau à grappes
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier
(c) Espèces	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore
<i>Betula pendula</i>	Bouleau
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne
<i>Lonicera alpigena</i>	Camérisier des Alpes
<i>Lonicera nigra</i>	Camérisier noir
<i>Salix appendiculata</i>	Saule à grandes feuilles
<i>Sambucus racemosa</i>	Sureau à grappes
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs
<i>Viburnum lantana</i>	Viorne lantane

CaiSSon végétalisé

Tab. 7 - Liste des espèces utilisées sous forme de plançons : **(a)** niveau inférieur ; **(b)** moyen ; **(c)** supérieur.

(a) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(b) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(c) Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Tab. 8 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants : **(a)** niveau moyen ; **(b)** niveau supérieur.

(a) Espèces	
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier
<i>Lonicera xylosteum</i>	Chèvrefeuille des haies
<i>Prunus padus</i>	Merisier à grappes
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier
(b) Espèces	
<i>Sambucus racemosa</i>	Sureau à grappes
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs
<i>Viburnum lantana</i>	Viorne lantane
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier

Boutures de saules indigènes

Des boutures de saules ont été mises en place à la fin du chantier entre les blocs.

Tab. 9 - Liste des espèces de saules utilisées dans les enrochements de pied de berge.

Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Mélange grainier

Après réglage des talus, les surfaces travaillées sont ensemencées avec un mélange grainier spécifique (qualité : écotypes CH). Le semis est réalisé à une densité de 10 g/ m².

Le mélange vise un large spectre d'utilisation pour toutes les parties de berge du pied jusqu'au sommet, ainsi qu'en complément de tous les ouvrages en génie végétal, de même que pour la remise en état après chantier. La surface à ensemencer étant relativement modeste, cela ne justifie pas l'utilisation de mélanges plus spécifiques.

L'enjeu de protection a fait opter pour un mélange à dominance de graminées et de quelques fabacées (vitesse d'installation et densité de la couverture herbeuse). Toutefois, le mélange reste relativement diversifié et contient quelques espèces peu utilisées dans les interventions courantes.

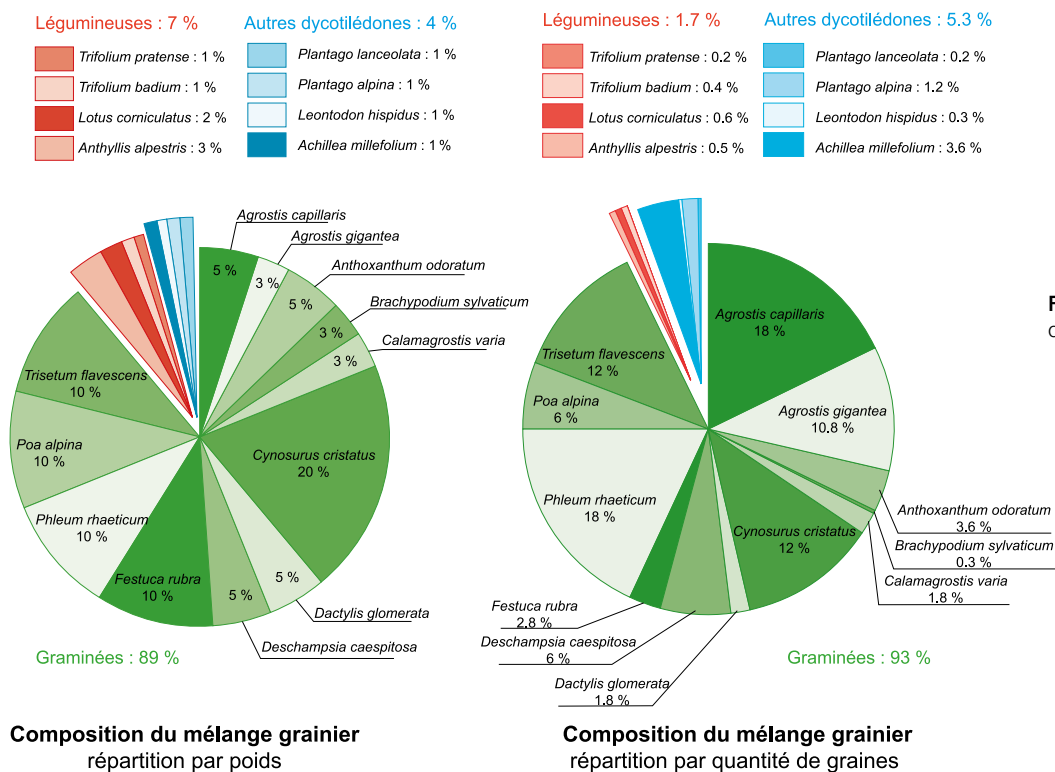


Fig. 22 - Composition du mélange grainier.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

4.1.3. Chantier de pont de Cergnement

Ce chantier a été réalisé dans le cadre du projet Géni'Alp et a vu la mise en œuvre de techniques mixtes associant lits de plants et plançons avec couches de branches à rejets avec enrochement de pied de berge et épis, ainsi que deux seuils également en enrochement. La pente du cours d'eau est supérieure à 5 %. L'intérêt de ce chantier est donc de tester ces techniques sur un cours d'eau avec de très fortes contraintes mécaniques.

4.1.3.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : Suisse
Communes : Bex et Gryon (Vaud)
Altitude : 1 248 m
Latitude-longitude : 46°16'56" N, 07°06'55" E
Maître d'ouvrage : communes de Bex et Gryon
Maître d'œuvre : hepia
Enjeu sécuritaire : stabilité d'un pont
Type de dégradation : érosion + incision



Fig. 23 - Plan de situation de l'ouvrage du pont de Cergnement.

Le cours d'eau : l'Avançon d'Anzeindaz

Pente du profil en long : 5 à 10 %
Débit moyen de crue centennale : 57 m³/s

Contexte et enjeux

La route communale qui franchit le pont de Cergnement est le seul accès possible aux véhicules pour atteindre le hameau de Solalex. Il s'agit d'un alpage important. En effet, le pastoralisme est encore très vivace dans ce secteur. Ce site est également très touristique, notamment pour la randonnée, l'escalade (Miroir d'Argentine) et le ski de randonnée. Deux restaurants très fréquentés en période estivale y figurent également.

Une érosion en extrados empiète sur un pâturage. Les abords immédiats du pont de Cergnement sont aussi soumis à une forte érosion (fig. 24 et 25). Une incision du lit menace les piles de l'ouvrage.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées :

1^{er} tronçon : lits de plants et plançons + épis + enrochement

2^e tronçon : couches de branches à rejets + enrochement

Orientation de l'ouvrage : sud-est

Emplacement de l'ouvrage : rive droite

Date de réalisation : 2011

Montant total de l'investissement : 110 000 CHF



Fig. 24 - Le site à l'aval du pont lors de l'état des lieux.



Fig. 25 - Partie aval du projet.

4.1.3.2. Description technique de l'ouvrage

Compte tenu des contraintes fortes et notamment de la pente du profil en long qui présente des valeurs extrêmes pour l'utilisation du génie végétal, l'utilisation de techniques mixtes s'est révélée incontournable. Non seulement par la mise en œuvre d'un enrochement de pied, mais également par l'utilisation d'ouvrages de protection indirecte, tels que les seuils et les épis.

Le chantier a débuté par la réalisation des seuils (enrochement bétonné pour le premier et libre pour le second) pour la stabilisation du profil en long et la lutte contre le phénomène d'incision sous le pont (fig. 26). Le seuil situé plus en aval contribue également à prévenir l'affouillement au pied des futurs aménagements de berge.

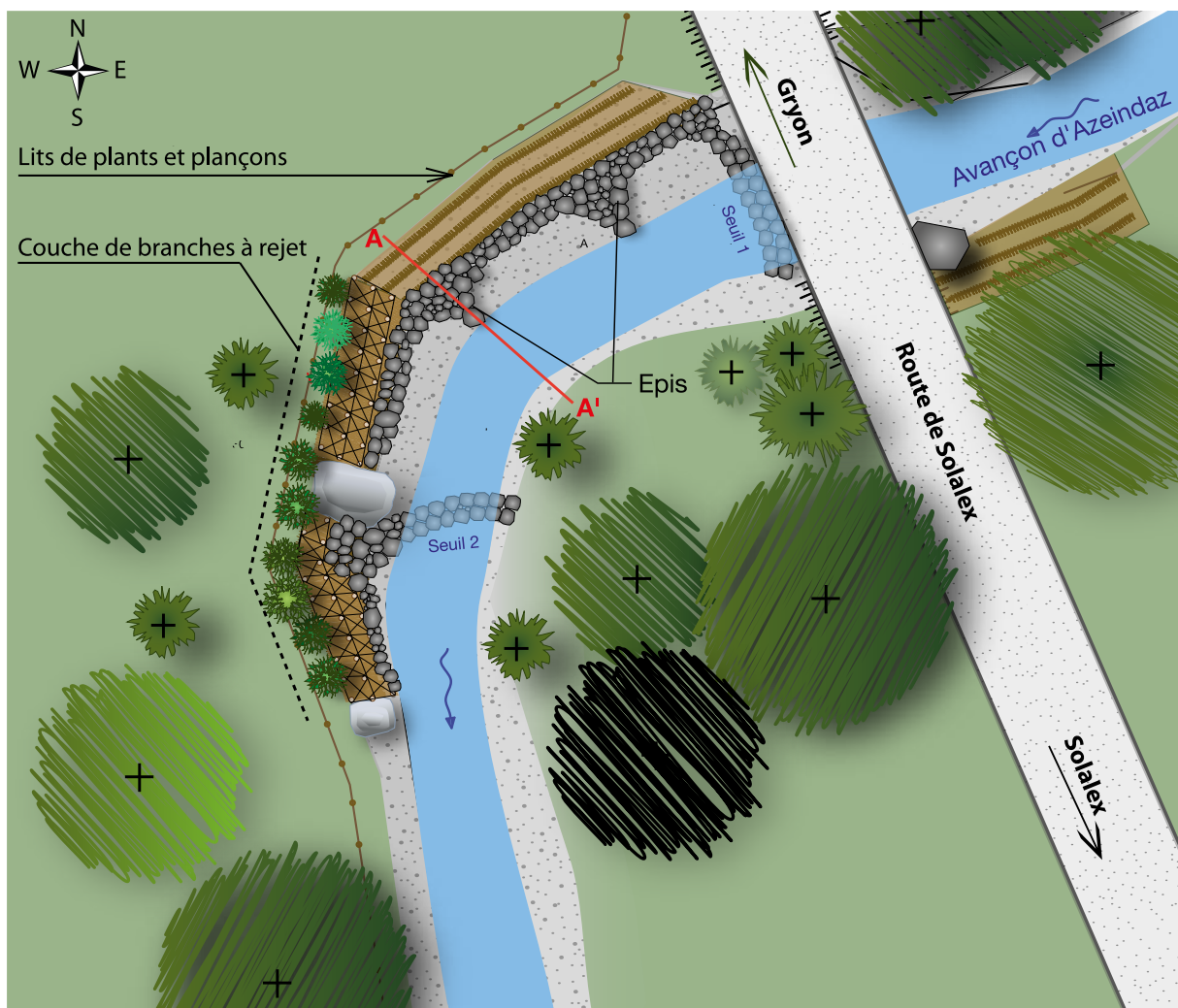


Fig. 26 - Vue d'ensemble du projet.

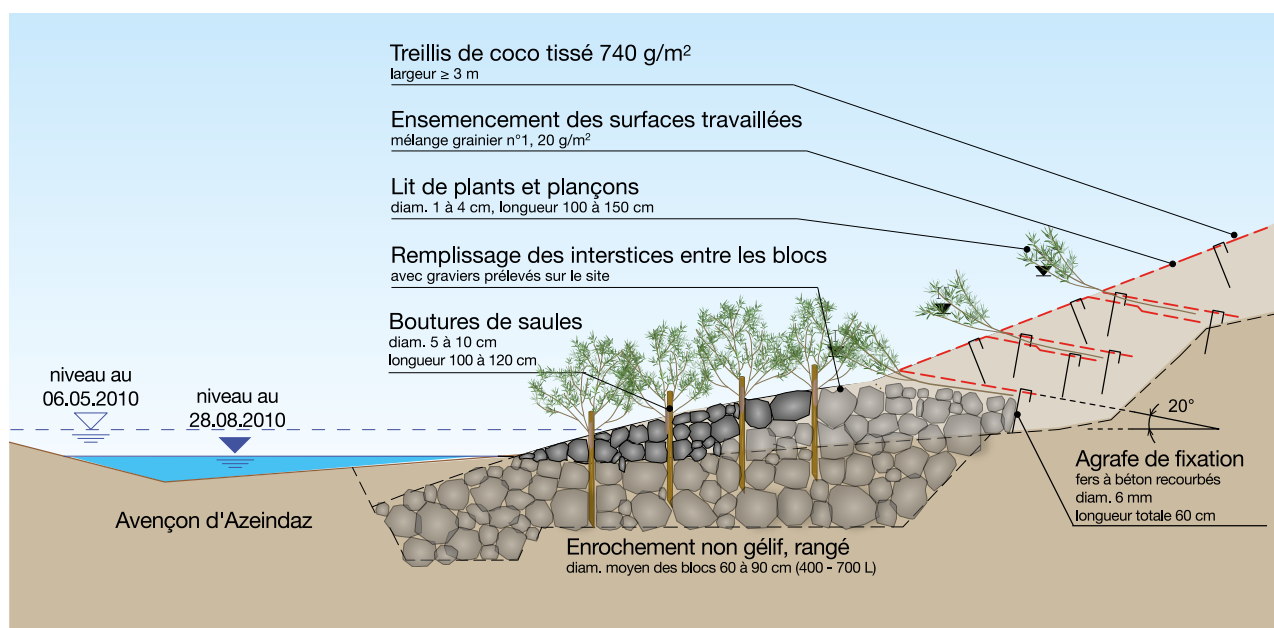


Fig. 27 - Coupe AA' montrant l'épi en enrochement surmonté d'un lit de plants et plançons.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Seuil amont

La crête du seuil est légèrement incurvée pour concentrer le courant, notamment en période de basses eaux, mais également pour ne pas trop élever le niveau du lit en amont tout en protégeant les berges. Latéralement, le seuil remonte pour protéger les piles du pont. La pente du seuil côté aval ne doit pas être lisse, mais au contraire rugueuse et irrégulière pour permettre son franchissement par la faune piscicole (fig. 29).

Seuil aval

La crête du seuil est au niveau du lit avant travaux, il s'agit de stabiliser le niveau entre les deux seuils. Les seuils sont constitués de blocs de 700 à 1 000 litres.

Enrochements de pied

La base de l'enrochement est ancrée à une profondeur d'un mètre dans le lit. L'enrochement est séparé des matériaux constitutifs de la berge par un géotextile synthétique filtre. Ce détail d'aménagement prolonge la durée de vie d'un enrochement, car il prévient la dislocation des blocs provoquée par la migration des sédiments fins constituant la berge. En effet, en cas de crue, ces sédiments sont mis en suspension, subissent une forme d'aspiration et sont entraînés par le courant.

Les écoulements internes qui se produisent dans les sols sont de nature à entraîner les matériaux constitutifs de la berge (érosion interne). Cela concerne notamment les particules de sol situés derrière les enrochements. Les dispositifs de type filtre (géotextiles ou couches de transition) visent à bloquer ces phénomènes. La stabilité des sols vis-à-vis de ces mécanismes est liée au respect des règles de transition d'un sol à l'autre.

L'enrochement est solidement ancré en profondeur, seule une rangée de blocs reste visible au-dessus du niveau du lit mineur. Ainsi, la berge aménagée devrait présenter un faciès comparable à ce qui est observable sur les berges naturelles de ce cours d'eau de montagne.

Épis en enrochements

Constitués de blocs de 400 à 700 litres, ils présentent une forme plongeante et émergent à peine de la surface du lit mineur. Leur fonction est avant tout de protéger le pied de berge de l'affouillement en cas de crue.

Il était prévu de mettre en place des pieux vivants (diam. 10-15 cm ; l. 200-250 cm) entre les blocs au fur et à mesure du montage des épis. Ces épis devaient être enfoncés dans le fond du lit pour atteindre l'eau et le substrat.

Toutefois, les contraintes de chantier n'ont pas permis d'installer les boutures en même temps que les enrochements, ces dernières ont donc été mises en place entre les blocs à la fin du chantier (fig. 27).

Lits de plants et plançons

Les lits de plants et plançons, installés dans le premier tronçon plus ou moins rectiligne immédiatement à l'aval du pont, reposent sur un enrochement de pied. En effet, il s'agit certainement de la technique qui se marie le mieux avec l'enrochement. Ils présentent une inclinaison de 20° par rapport à l'horizontale. Les plants et les branches ne dépassent pas la berge de plus de 25 à 30 cm (fig. 28).

Couches de branches à rejets

Les couches de branches à rejets sont implantées dans la courbe plus en aval, partie la plus sollicitée lors des crues puisque, à cet endroit, la berge est susceptible de connaître une attaque frontale du courant. Les blocs rocheux de taille importante sont conservés. Ils contribuent activement au maintien de la berge.



Fig. 28 - Lit de plants et plançons en cours de réalisation. Dans le lit, les deux épis en enrochement sont visibles.

La berge est reprofilée au-dessus des enrochements de pied pour obtenir une pente de 1V/3H. La densité des branches est de 30-40 par mètre linéaire, leur longueur est supérieure ou égale à 2 m et leur diamètre est compris entre 1 et 3 cm.

Les pieux ont une longueur supérieure à 1 m, un diamètre de 5 à 10 cm et sont battus mécaniquement. L'espacement longitudinal et latéral des pieux est compris entre 80 et 100 cm. Ils sont fixés à l'aide de fils de fer en tension, puis on procède à un battage final des pieux pour bien plaquer le dispositif au sol (fig. 30).



Fig. 29 - Seuil en enrochement bétonné à l'aval du pont.



Fig. 30 - Détails sur l'enrochement de pied de berge et les couches de branches à rejets.

4.1.3.3. Végétation

En ce qui concerne les saules, le choix s'est porté sur les espèces les plus structurantes des ripisylves des étages montagnard et subalpin inférieur. L'altitude du site ne justifie pas encore l'utilisation d'espèces typiquement alpines. Une certaine tolérance aux substrats grossiers et filtrants est également recherchée, compte tenu que dans ce projet, l'ensemble des ouvrages de génie végétal repose sur une base en enrochement.

En ce qui concerne les autres ligneux, la priorité a été accordée aux espèces en station, présentant une bonne aptitude à la formation de racines adventives. Cette propriété est notamment importante pour les lits de plants et plançons, où le développement rapide d'un enracinement

dense et en profondeur est recherché. L'obtention d'un aménagement diversifié en espèces, multi-strates et bien intégré dans le milieu naturel a également orienté le choix des ligneux. Enfin, les espèces strictement arborescentes, présentant une hauteur importante à l'état adulte, ont été écartées pour des raisons de stabilité de la berge à long terme ainsi que d'entretien (pâturage adjacent).

Lits de plants et plançons

Tab. 10 - Liste des espèces utilisées sous forme de plançons : (a) niveau inférieur ; (b) niveau moyen ; (c) niveau supérieur.

(a) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(b) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
(c) Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Tab. 11 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants : (a) niveau moyen ; (b) niveau supérieur.

(a) Espèces	
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc
<i>Alnus viridis</i>	Aulne vert
<i>Prunus padus</i>	Merisier à grappes
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Viburnum opulus</i>	Viorne obier
(b) Espèces	
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc
<i>Laburnum alpinum</i>	Aubours des Alpes
<i>Sambucus racemosa</i>	Sureau à grappes
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs

Tab. 12 - Liste des espèces utilisées sous forme de couches de branches à rejets.

Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Tab. 13 Liste des espèces utilisées sous forme de pieux.

Espèces	
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Mélange grainier

Après régalinge, les surfaces travaillées laissées nues sontensemencées par un mélange grainier spécifique (qualité : écotypes CH). Le semis est réalisé à une densité de 15 g m².

Le mélange vise un large spectre d'utilisation, aussi bien pour le pied de berge (dans les interstices entre les blocs), les berges aménagées en génie végétal ou encore la remise en état du pâturage après travaux, en sommet de

berge. En effet, la surface relativement modeste à ensemen- cer (environ 500 m²) ne justifie pas l'élaboration de plusieurs mélanges plus ciblés (fig. 32).

L'enjeu de protection a fait opter pour un mélange à domi- nance de graminées et de quelques fabacées (vitesse d'installation et densité de la couverture herbeuse). Toutefois, le mélange reste relativement diversifié et contient quelques espèces peu utilisées dans les inter- ventions courantes.

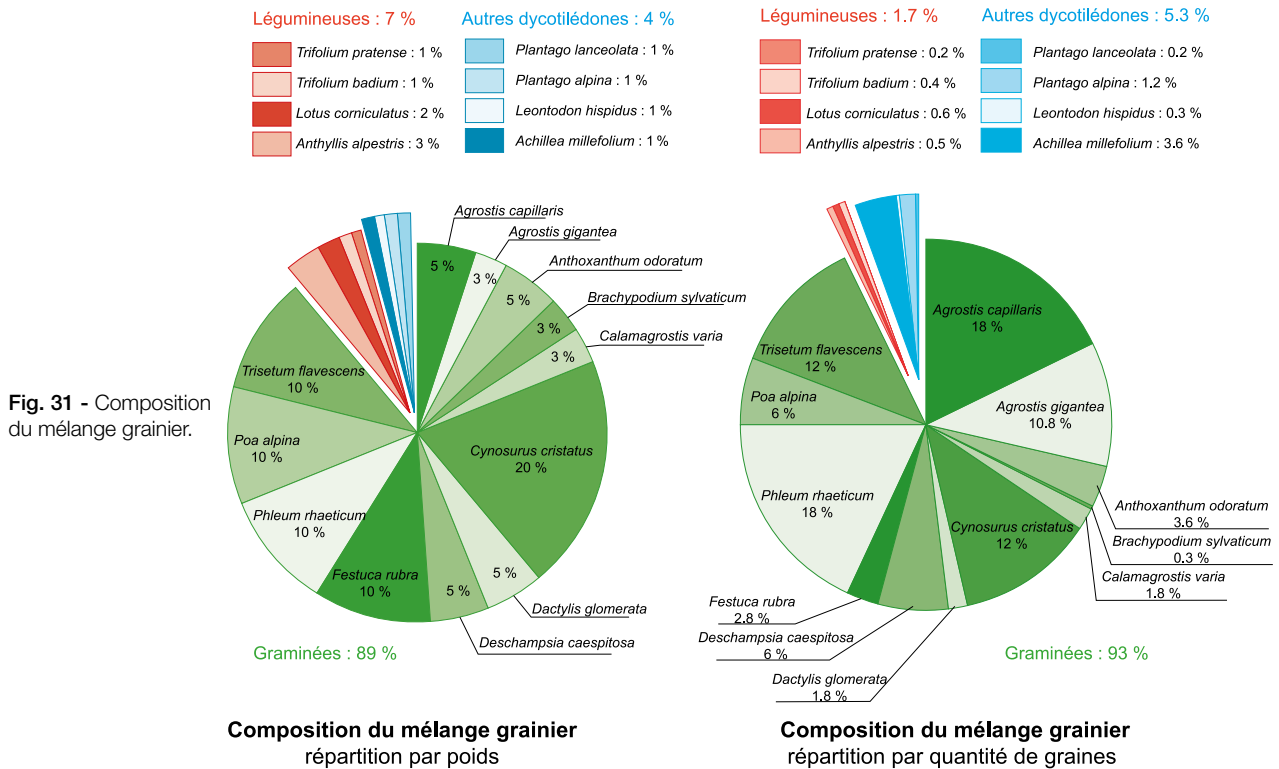


Fig. 32 - Vue générale de l'aménagement en fin de chantier.

Boutures entre les enrochements

Tab. 14 - Liste des espèces utilisées sous forme de boutures dans les épis.

Espèces	
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

Plants en godets ou à racines nues pour le haut de berge

Tab. 15 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants en godets ou à racines nues pour le haut de berge.

Espèces	
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier
<i>Laburnum alpinum</i>	Aubours des Alpes
<i>Lonicera xylosteum</i>	Chèvrefeuille des haies
<i>Sambucus racemosa</i>	Sureau à grappes
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs
<i>Viburnum lantana</i>	Viorne lantane

4.1.4. Chantier de Cluses

L'exemple décrit ici sur l'Arve, à Cluses, est représentatif d'une contrainte classique pour le génie végétal appliqué en cours d'eau de montagne (ou dans le fond des vallées internes des Alpes). Il s'agit de l'exposition aux crues printanières, inhérentes au régime hydrologique nival, autrement dit qui interviennent lorsque la fonte des neiges se produit dans les parties hautes du bassin versant. Ces crues printanières correspondent à la pleine période de démarrage de la végétation. Or, si les végétaux supportent relativement bien des immersions prolongées en cas de crues hivernales (fréquentes en régime pluvial), à savoir pendant le repos de la végétation, il n'en va pas de même en pleine période de végétation. Ces immersions printanières sont d'autant plus préjudiciables dans le cas de nouveaux aménagements, avec de jeunes plants, donc bas et moins résistants. Cette contrainte est souvent accentuée par des variations journalières importantes de débit, donc de hauteur d'eau, entre le jour et la nuit. Et il est bien clair que ces phénomènes sont accentués par l'endiguement, qui réduit le gabarit d'écoulement, donc amplifie les effets liés aux variations de débits. Sur l'Arve, ce type de crue peut être violent et surtout rapide, car le temps de réponse d'un événement météorologique survenant dans le bassin versant peut être très bref.

4.1.4.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : France
Commune : Cluses (Haute-Savoie)
Altitude : 473 m
Latitude-longitude : 46°04'10" N, 06°33'22" E

Maître d'ouvrage : SM3A (Syndicat mixte d'aménagement de l'Arve et de ses abords)

Maître d'œuvre : BIOTEC

Enjeu sécuritaire : zone urbaine

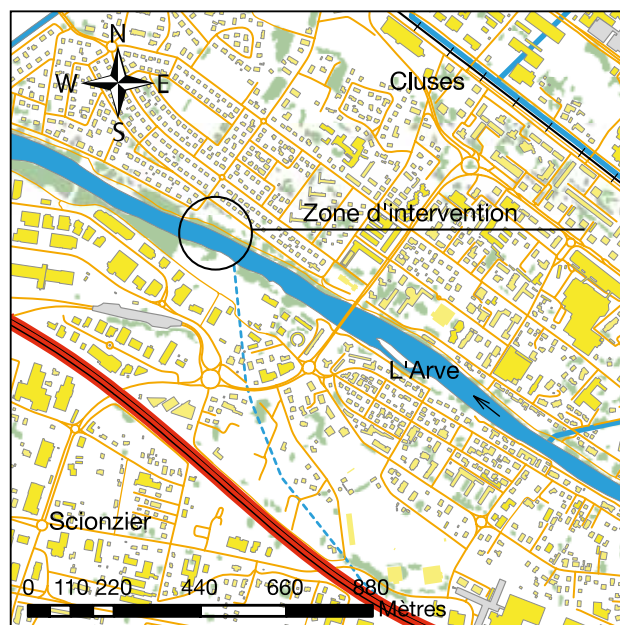


Fig. 33 - Plan de situation du chantier de Cluse.

Le cours d'eau : l'Arve

Pente de profil en long : 0,3 %

Débit de crue centennale : 528 m³/s

Contexte et enjeux

En raison de l'endiguement et d'une exploitation exagérée des matériaux alluvionnaires pendant la deuxième moitié du 20^e siècle, l'Arve a subi un phénomène important d'incision du lit. Ce phénomène a également induit une dégradation de l'état des berges qui, au fur et à mesure de l'approfondissement du lit, ont adopté un profil toujours plus incliné, donc toujours plus sensible à l'érosion. C'était le cas dans la traversée de Cluses, au niveau du parc public de la Sardagne où de vieux arbres penchés, pesant de tout leur poids, provoquaient des effets de bras de levier sur une berge très pentue et déjà dégradée. À cette situation précaire d'un point de vue mécanique s'ajoutait une qualité paysagère et écologique médiocre, notamment en raison de l'installation massive par endroits, de plantes exotiques envahissantes.

Les gestionnaires de l'Arve ont, depuis quelques années, entrepris de contrecarrer le phénomène d'incision et de rehausser le niveau du lit par la mise en place d'ouvrages transversaux, sous la forme de seuils imposants en blocs, répartis sur le profil en long. À cette première démarche devait logiquement succéder la restauration des berges. Dans le cas du parc de la Sardagne, l'intervention se justifiait d'autant plus que la berge se situe à l'aval immédiat d'un de ces ouvrages, donc dans une zone au courant parfois turbulent suite au ressaut hydraulique du seuil de Sardagne.

L'alternance des brusques montées d'eau et décrues provoque également un effet de ressuyage et de succion des matériaux constituant la berge, au demeurant très hétérogènes, donc présentant une faible cohésion. De ce fait, et

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

compte tenu de l'état de dégradation de la berge, l'usage d'un chemin piétonnier, sis en sommet, et celui du parc public lui-même étaient remis en cause à moyen terme. Les objectifs de l'aménagement proposé étaient donc de préserver durablement les usages existants en rive, tout en participant à la mise en valeur du site sur les plans écologiques et paysagers.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : enrochement + lits de plants et plançons, fascines + boutures de saules et plants forestiers
Orientation de l'ouvrage : sud-ouest
Emplacement de l'ouvrage : rive droite
Longueur de l'aménagement : 280 m
Date de réalisation : 2005
Montant total de l'investissement : 427 600 € TTC

4.1.4.2. Description technique des ouvrages

L'aménagement concerne la berge droite de l'Arve en aval du seuil de Sardagne sur un linéaire approchant les 300 m. Le degré de protection des berges est décroissant d'amont en aval, au regard de la diminution significative des contraintes hydrauliques, de la diminution de la pente des berges et de l'élargissement progressif du lit et du gabarit d'écoulement. Le projet se décline en trois profils types différents, d'amont en aval :

Aménagement type A (95 m)

Un enrochement de pied de berge, construit et rangé avec des blocs posés un à un, également muni d'un sabot parafouille, est monté jusqu'au niveau de la crue annuelle (cote 470.97 m NGF). Au-dessus de l'enrochement, trois niveaux de lits de plants et plançons sont mis en place, renforcés par la pose d'un treillis de coco. Les remous et turbulences liés au ressaut hydraulique induit par le seuil ne permettent pas de descendre plus bas que cette cote de la crue annuelle, avec les techniques végétales. Enfin, le sommet de berge est terminé par un talutage (2V/3H), la couverture des matériaux terreux avec un treillis de coco et des plantations de plants forestiers. Ces plants contribuent à diversifier le cortège d'espèces ligneuses, constituant un nouveau cordon boisé. L'ensemble de l'aménagement (enrochement, lits de plants et plançons et sommet de talus) est également ensemencé par projection hydraulique, avec un mélange grainier d'espèces indigènes adaptées.

Aménagement type B (135 m)

Le principe d'aménagement est identique au premier tronçon, à la différence près que l'éloignement progressif du seuil permet d'arrêter l'enrochement plus bas et de donner plus de place aux techniques végétales. Ainsi, sur ce tronçon, le sommet de l'enrochement est calé au niveau de la cote du débit moyen de l'Arve au cours des mois d'avril, mai et juin (470.08 NGF), à savoir pendant les crues printanières correspondant à la fonte des neiges sur les hauteurs du bassin versant, notamment dans la vallée de Chamonix. Jusqu'à cinq niveaux de lits de plants et plançons succèdent à l'enrochement, puis la finition de la berge se fait à l'identique du premier tronçon (fig. 35).

Aménagement type C (50 m)

L'élargissement du gabarit d'écoulement de l'Arve permet ici de taluter la berge en pente douce (1V/5H) et d'approcher un profil d'équilibre facilitant la tenue mécanique des sols et leur stabilisation uniquement avec des végétaux. Ainsi, le pied de berge est aménagé d'une fascine de saules à double rangée de pieux. L'altimétrie de cet ouvrage de protection de pied de berge est calée en fonction de l'observation de la limite inférieure des ligneux existants, notamment en rive gauche (469,6 NGF). Compte tenu du fait que l'on se trouve sur un cours d'eau dynamique qui charrie beaucoup d'alluvions, la fascine est pourvue d'un lit de ramilles anti-affouillement placé sous les branches, perpendiculairement au courant. L'utilité de ce dispositif est de piéger les sédiments fins au pied de la fascine (par double effet de frein et de filtre). Ainsi, non seulement l'affouillement de l'ouvrage est évité, mais en plus, on favorise la sédimentation. À terme, se forme un bourrelet de sables et graviers fins qui protège la fascine.

Cet ouvrage de pied de berge est également muni de plançons dressés verticalement à l'arrière de la fascine. Ils permettent d'obtenir plus rapidement le développement de réseaux racinaires en profondeur et de renforcer la zone de transition entre deux techniques (ici entre la fascine et l'aménagement du talus de berge), qui constitue souvent un point de faiblesse. À l'arrière de la fascine et en complément de celle-ci, des boutures de saules sont plantées à densité élevée. Elles permettent d'obtenir un ourlet buissonnant et arbustif relativement large et dense, constitué de tiges souples. Cet ourlet est à même de freiner efficacement le courant en cas de crue, de favoriser ainsi la sédimentation et d'absorber les contraintes hydrauliques. De la mi-berge jusqu'au sommet, le talus est simplement couvert d'un treillis de coco et planté avec des plants forestiers d'espèces typiques des bords de l'Arve, qui contribuent au développement d'une ripisylve équilibrée, diversifiée et stable.



Fig. 34 - Mise en place des plants sur le premier lit de plants et plançons au début du printemps 2005.

4.1.4.3. Végétation

Pas d'informations disponibles.

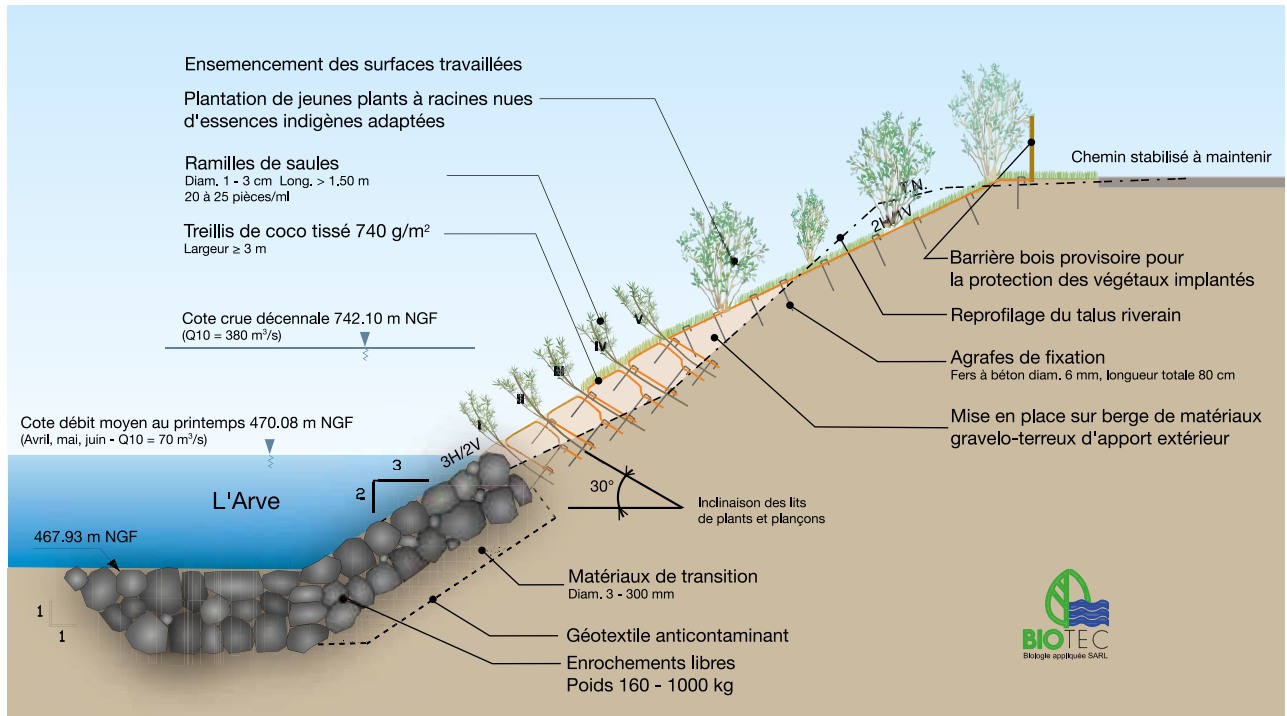


Fig. 35 - Coupe transversale sur l'ouvrage (aménagement de type B).



Fig. 36 - Le géotextile est déroulé sur le premier lit de plants et plançons.



Fig. 38 - L'ouvrage à la fin des travaux (aménagement de type A).



Fig. 37 - Fin de la mise en place des lits de plants et plançons (aménagement de type A).



Fig. 39 - L'ouvrage trois ans après la fin des travaux.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

4.1.5. Chantier d'Oulx

Les techniques mixtes associant les couches de branches à rejets avec enrochements de pied de berges ont fait leurs preuves sur certains cours d'eau des Alpes. Ce sont des techniques qui présentent une forte résistance et qui sont adaptées à des cours d'eau dynamiques. C'est le cas de l'ouvrage de Riffiano (chap. II.3.2.4.2) ou de celui d'Oulx (détaillé ci-après).

4.1.5.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : Italie (Val de Suse)

Commune : Beaulard

Altitude : 1 166 m

Latitude-longitude : 45°03'12" N, 06°44'31" E

Maître d'ouvrage : Consorzio Forestale Alta Valle Suza

Maître d'œuvre : Consorzio Forestale Alta Valle Suza

Enjeux sécuritaires : champs et protection d'enjeux indirects en rive droite et en rive gauche

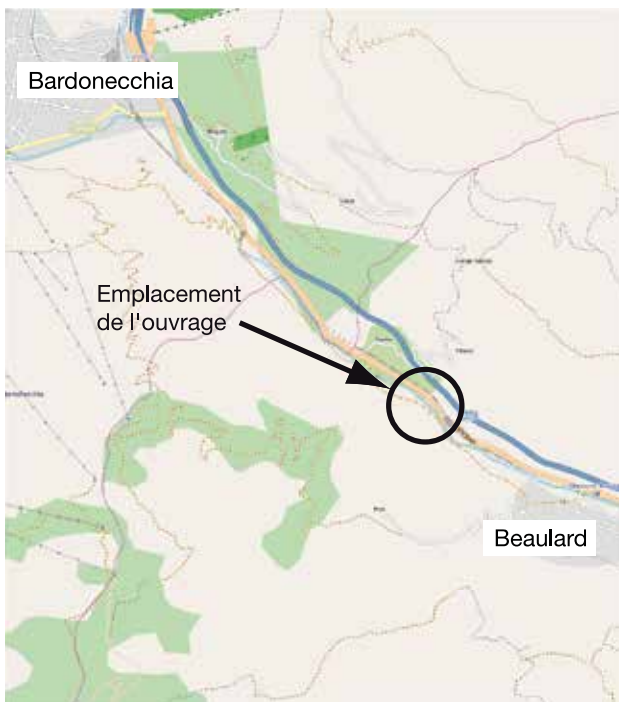


Fig. 40 - Plan de situation de l'ouvrage.

Le cours d'eau : le Rio di Bardonecchia

Pente du profil en long : 2 %

Débit : NC



Fig. 41 - Vue générale au niveau de l'aménagement.

Contexte et enjeux

Le site présentait une érosion hydraulique affectant un champ en rive droite. L'érosion était provoquée par la présence d'un mur en béton en rive gauche. Ce mur protège la route et provoque un rétrécissement de la section du cours d'eau.

La largeur du cours d'eau est particulièrement rétrécie sur ce tronçon à cause de la route et de la voie de chemin de fer en rive gauche ; ces infrastructures sont protégées par un mur de soutènement en béton (fig. 41).

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : couches de branches à rejets avec enrochement en pied de berge relié par des câbles et pieux métalliques. Plantations en haut de berge

Date de création : 1993

Emplacement de l'ouvrage : rive : linéaire

Orientation de l'ouvrage : nord-ouest

Longueur de l'aménagement : 60 m

4.1.5.2. Description technique de l'ouvrage

Il s'agit d'un ouvrage mixte, reposant sur deux rangées d'enrochements de pied fixés par un câble métallique à un pieu métallique (2 m). Des boutures de saules ont été mises en place dans l'enrochement. L'ouvrage avait été conçu sans géotextile, comme c'est souvent le cas dans cette région de l'Italie pour les couches de branches à rejets.

Les enrochements ont été fixés sur les pieux métalliques côté rivière, mais aujourd'hui, sur les nouveaux ouvrages, les fixations métalliques sont placées côté berge pour assurer leur protection contre le transport solide et cacher leur aspect disgracieux.

Les blocs employés sont de gros diamètre (1 m environ).



Fig. 42 - L'observation de la fixation du câble montre que le bloc a tourné sur lui-même au cours d'une crue.



Fig. 43 - L'enrochement de pied de berge relié par un câble.

On est là aussi en présence d'un ouvrage mixte associant génie végétal et enrochement de pied de berge, et qui résiste après 20 ans d'existence et le passage de crues importantes comme en témoigne le bloc de taille importante qui a tourné sur lui-même (fig. 42).

4.1.5.3. Végétation

Pas d'informations disponibles.

4.1.6. Chantier du Bens à Saint-Hugon

Les caissons végétalisés offrent une bonne résistance mécanique, permettent d'avoir des pentes de berges élevées et supportent des charges importantes. Dans le cadre du projet Génie'Alp, un caisson a été mis en place pour protéger une berge sur un torrent de pente supérieure à 7 %, permettant ainsi de tester cette technique dans un torrent avec des contraintes mécaniques très élevées.

4.1.6.1. Présentation générale de l'ouvrage de Saint-Hugon (caisson)

Le site

Pays : France
 Commune : La Chapelle-du-Bard (Isère)
 Altitude : 1 248 m
 Latitude-longitude : 45°23'11" N, 06°10'50"E
 Maître d'ouvrage : ONF
 Maître d'œuvre : ONF
 Appui technique : Irstea
 Enjeux sécuritaires : route forestière, plate-forme de stockage
 Type de dégradation de berge : érosion

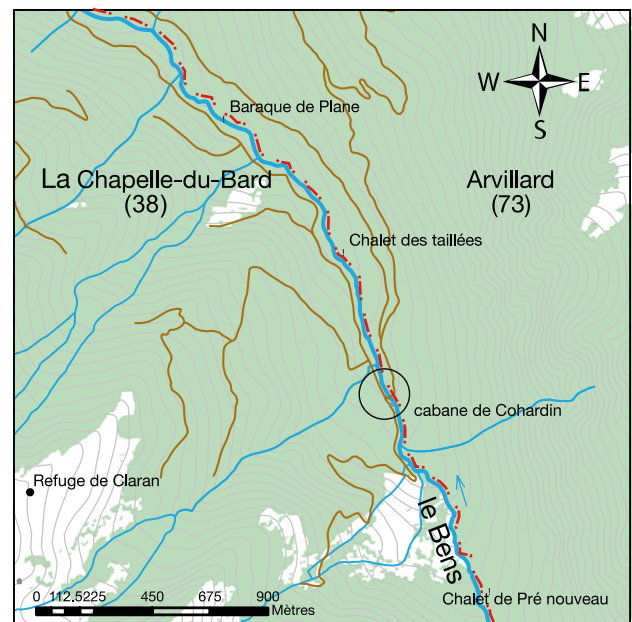


Fig. 44 - Plan de situation du projet sur le Bens.

Le cours d'eau : le Bens

Pente de profil en long : 7,2 %
 Débit moyen de la crue décennale : 9 m³/s

Contexte et enjeux

Il s'agit de protéger une route forestière en sommet de berge devant supporter des surcharges importantes (grumiers). L'objectif était de tester les techniques de caisson végétalisé sous l'effet de contraintes hydromécaniques importantes.

Dans un contexte de berges très raides (pente supérieure à 2V/3H), l'exiguïté de la vallée ne permet pas de disposer d'un espace suffisant pour incliner l'ouvrage. La présence

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

d'arrivées d'eau permanentes (ruisseau et eaux de drainage de la piste) impose la mise en place d'un ouvrage adapté.

L'érosion se trouve dans une courbe juste dans l'axe d'un écoulement amont totalement rectiligne.



Fig. 45 - État initial avant travaux.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : caisson végétalisé et lits de plants et plançons en partie supérieure

Orientation de l'ouvrage : ouest

Emplacement de l'ouvrage : rive gauche

Longueur de l'aménagement : 24 m

Date de création : 2011

Montant total de l'investissement : 34 113 €

4.1.6.2. Description technique

Le caisson végétalisé à doubles parois

Il s'agit d'une structure bois constituée de plusieurs étages. Chaque étage est composé de deux rangées parallèles de rondins (longrines : rondins les plus longs et parallèles au sens d'écoulement des eaux) et de traverses ou moises (rondins plus courts et perpendiculaires au sens d'écoulement du cours d'eau).

Le positionnement de l'ouvrage répond à des exigences précises conditionnant sa longévité et sa résistance mécanique. Ainsi, le niveau de crue annuelle doit arriver à la hauteur du premier étage du caisson et la géométrie de l'ouvrage doit suivre le profil en long du cours d'eau : une forme en escalier a été retenue. La structure est suffisamment en recul dans la berge pour ne pas occasionner un rétrécissement de la section d'écoulement. Pour ce faire, un relevé topographique précis ainsi qu'une étude hydraulique ont été menés.

Le calcul hydraulique des lignes d'eau et des forces tractrices sur un torrent en « step pool » de pente supérieure à 7 % comme le Bens est à la limite des connaissances scientifiques actuelles.

Les modèles naturels, en amont, au droit et en aval des zones d'érosion, nous montrent une succession de seuils et de bassins. On trouve également en abondance des blocs de rocher en pied de berge. Ces blocs sont naturellement agencés pour former :

- des sortes d'épis rugueux ;
- des « escaliers » ;
- des assises et soutien de berge.

Il convient de prendre exemple sur ces modèles pour bâtir le projet.

La présence d'un enrochement latéral et en base de l'ouvrage protège la structure contre le phénomène d'affouillement. La profondeur d'ancrage (sous le lit) de l'enrochement a été calée sur la hauteur des seuils naturels présents dans le cours d'eau, ceci afin que l'ouvrage résiste même si un de ces seuils venait à se rompre en crue. Cette assise est constituée de blocs soigneusement agencés devant lesquelles sont disposés des épis en blocs plus volumineux.

Le remblai de la structure est composé de matériaux grossiers côté cours d'eau (1/4 de la largeur du caisson) afin de protéger le géotextile de l'abrasion en cas de crue et des rayons ultra-violet. Le 3/4 restant est remblayé à l'aide des matériaux issus du déblai pour permettre le développement des végétaux. Les boutures doivent traverser l'ensemble de la structure pour maximiser leur contact avec les matériaux terreux.

L'emploi de géotextiles de différentes natures se justifie par les diverses conditions d'utilisation. En pied, le géotextile doit être synthétique pour pallier l'absence de végétation. Le géotextile coco tissé à 940 g/m² est utilisé pour les étages supérieurs du caisson et celui à 740 g/m² est employé pour les lits de plants et plançons.

Remarques générales sur la végétalisation des caissons bois

La végétation, une fois bien installée, fournit un ombrage suffisant permettant de maintenir un taux d'humidité élevé au contact du bois, assurant ainsi une meilleure durabilité de la structure en bois. De plus, les végétaux produisent un effet de drain biologique par évapotranspiration, qui est bénéfique pour la stabilité de l'ouvrage à long terme, sans compter une meilleure intégration de l'aménagement dans le milieu naturel.

Mode opératoire

L'ouvrage, ici destiné à renforcer les berges des cours d'eau, a une structure semblable à certains des ouvrages à doubles parois utilisés pour réaliser des seuils et barrages (chap. II.5). Il fonctionne comme une structure poids, c'est-à-dire dont le poids propre de l'ouvrage assure sa stabilité. Il est rempli de matériaux inertes pris sur place et associés à du géotextile synthétique et biodégradable, afin de limiter les phénomènes de lessivage ou de vidange.

Tab. 16 - Critères de pré-dimensionnement des caissons végétalisés de soutènement de berge.

Hauteur de l'ouvrage	$1 \text{ m} < H < 4 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans la berge	$P < 2 \text{ m}$
Diamètre des longrines (fonction de la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \text{ min} < 15 \text{ cm}$
Diamètre des traverses (fonction de la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \text{ min} < 15 \text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 14 \text{ mm}$
Largeur de la base de l'ouvrage	$b < H/2$
Fruit (inverse de la pente) du parement de l'ouvrage	0,2

D'une manière générale, les ouvrages peuvent fonctionner seuls ou être végétalisés. Dans ce second cas, qui présente de multiples avantages pour l'ouvrage, la végétalisation peut s'opérer au fur et à mesure de la construction, en intégrant à chaque étage des plants en racines nues et des branches de saules, comme on le ferait pour des lits de plants et plançons. Si la construction se réalise hors des périodes favorables à la végétalisation, cette dernière peut se faire *a posteriori*, par bouturage entre les pièces de bois. Dans une telle configuration, la structure de l'ouvrage a pour objectif d'assurer un rôle de soutien immédiat, mais temporaire de la berge, le temps que la végétation soit suffisamment enracinée et puisse assurer seule cette fonction.

Les caissons végétalisés présentent une rugosité latérale plus forte que certains ouvrages en enrochement ou les murs en béton. Ceci contribue à limiter les désordres liés au report d'érosion vers l'aval, couramment observés avec des ouvrages de rugosité inférieure.



Fig. 46 - Construction du support du caisson en enrochement.

Préparation du terrain

Le caisson doit reposer sur une assise stable, régulière et nivelée. Cette assise doit également être consolidée, résistante et ne pas trop se déformer. Dans un lit présentant une granulométrie avec majoritairement des éléments grossiers (cailloux, galets), la préparation de cette assise peut se faire directement en terrassant le sol en place ou en mettant en place un enrochement.

Pour une meilleure stabilité de l'ouvrage, l'assise doit présenter une pente de 5 à 10 % orientée côté berge pour un fruit total du parement de l'ordre de 0,2.

Mise en œuvre et phasage

Sur l'assise de fondation ainsi réalisée, on procède au montage des longrines et traverses (aussi appelées moises). Ici, les longrines au contact de l'enrochement ont été clouées dans les blocs à l'aide de tiges métalliques afin d'assurer une meilleure résistance de l'ouvrage, étant donné les fortes contraintes mécaniques imposées par le torrent.

À chaque étage de longrines, un géotextile est mis en place, dans lequel des matériaux terreux de remplissage doivent être tassés mécaniquement (godet de la pelle hydraulique ou rouleau). Un travail manuel complémentaire est nécessaire pour combler des vides sous les rondins.

Les traverses placées perpendiculairement sur les longrines sont fixées à l'aide de tiges d'acier d'armature dont le diamètre est de 14 mm au minimum.

Intercalés entre les longrines, des plançons de saules (ou des plants en racines nues d'autres espèces) sont couchés en rangs serrés. Les branches, de diamètre de 2 à 5 cm, peuvent avantageusement traverser toute l'épaisseur du caisson.

D'une manière générale, il est préférable de ne pas végétaliser la partie inférieure du caisson pour laquelle on pourra prévoir un parement en enrochement sec ou en géotextile synthétique. En effet, l'expérience montre que la végétation de la partie inférieure du caisson est souvent



Fig. 47 - L'ossature de l'ouvrage, avec les longrines parallèles au cours d'eau et les moises perpendiculaires.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants



Fig. 48 - REMPLISSAGE DU CAISSON AVEC LA TERRE VÉGÉTALE DU SITE.



Fig. 49 - MISE EN PLACE DES PLANÇONS ET PLANTS DANS LE CAISSON.

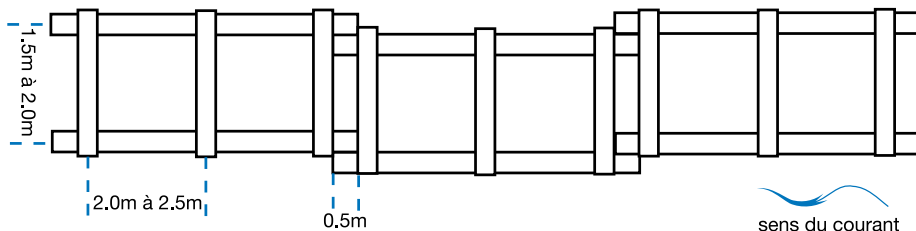


Fig. 50 - ASSEMBLAGE DE DEUX CAISSONS.

dominée par celle des parties supérieures et déperit avec le temps (cela dépend toutefois fortement de l'exposition du caisson et de son inclinaison). Le dépérissement des végétaux des parties inférieures du caisson risque alors d'entraîner une vidange de celui-ci.

Lorsque des arrivées d'eau en amont de l'ouvrage sont détectées, un dispositif de drainage est à prévoir. Il peut être réalisé alors par une chemise drainante constituée de galets, de graviers ou de tout-venant grossier. Les plantes jouent cependant un rôle non négligeable de drainage grâce à leur système racinaire.

Si l'aménagement est réalisé sur un tronçon de grande longueur comprenant plusieurs éléments, on peut réaliser la continuité de l'ouvrage avec une reprise entre chaque élément sur un minimum de 50 cm.

En sommet d'ouvrage, un géotextile biodégradable (type toile de coco ou de jute) peut être installé afin de protéger les semences et/ou les boutures du ruissellement. Ce géotextile doit être fixé à l'aide d'agrafes plantées dans le remblai.

Il convient de noter que la technique des caissons végétalisés doubles parois permet d'une part une stabilisation et une protection immédiates des berges (avant même une reprise efficace de la végétation). Elle permet d'autre part de traiter des berges quasiment verticales et de reprendre des surcharges importantes (poids lourds, etc.).

Il s'agit d'une structure souple supportant des petites déformations (notamment les tassements différentiels).

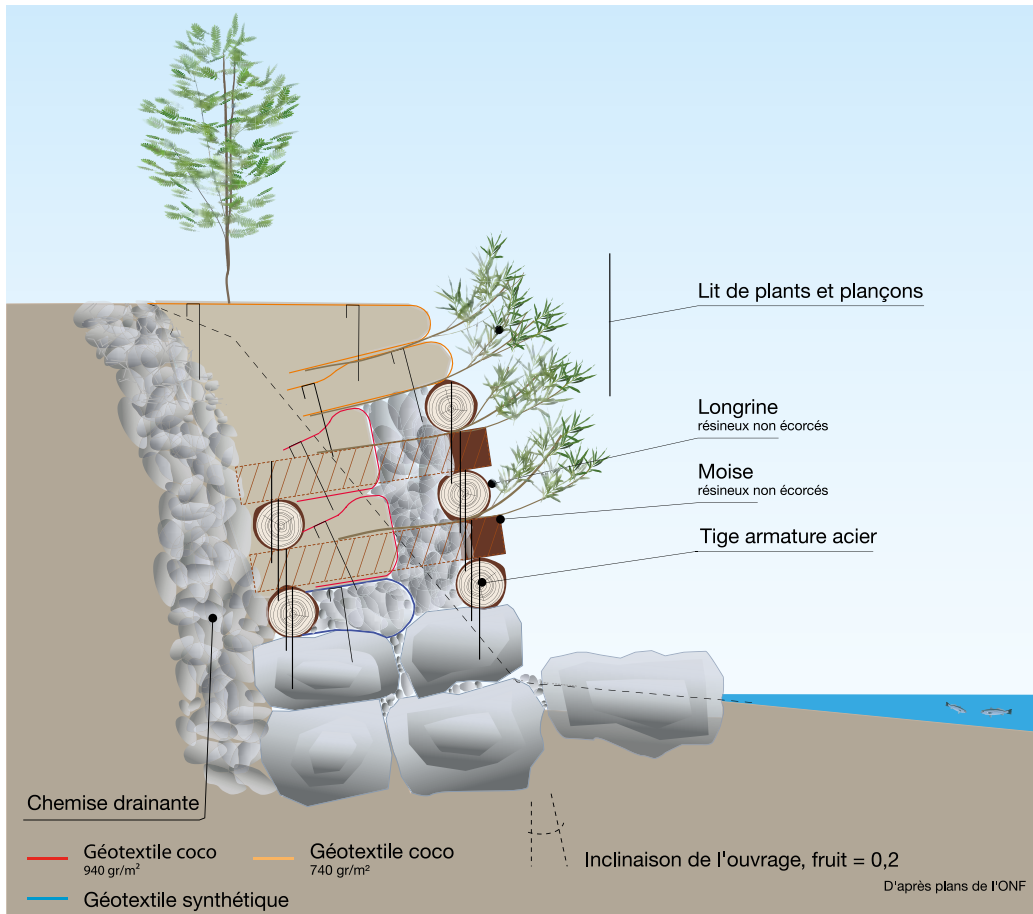


Fig. 51 - Coupe transversale de principe du caisson doubles parois végétalisé.



Fig. 52 - L'ouvrage à la clôture du chantier.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

4.1.6.3. Les critères de choix des végétaux

L'analyse botanique du site est essentielle afin d'implanter les végétaux adaptés au milieu particulièrement exigeant (altitude, vallée encaissée).

Aux abords de la berge, les strates herbacées, arbustives et arborées ont été étudiées.

Le choix des ligneux s'est porté sur les espèces les plus structurantes des ripisylves de ce secteur, à savoir le saule appendiculé (*Salix appendiculata*) et l'aulne vert (*Alnus viridis*). On trouve néanmoins à proximité quelques pieds de saule à trois étamines (*Salix triandra*). En ce qui concerne les boutures et les plançons, le saule appendiculé ayant un faible taux de reprise, il a été décidé de faire appel à d'autres espèces de saules pour garantir un bon taux de reprise. Ont ainsi été rajoutés le saule pourpre (*S. purpurea*) et le saule drapé (*S. elaeagnos*) en pied de berge et dans le caisson sur matériaux grossiers et filtrants. Dans les lits de plants et plançons les saules noircissant (*S. myrsinifolia*) et à trois étamines (*S. triandra*) ont été préférés.

Conformément au modèle naturel du torrent dont les berges sont couvertes de blocs et entrelacées de saules, des boutures sont insérées dans l'embrochement de pied de berge.

La partie inférieure du caisson n'est pas végétalisée. Les boutures auraient peu de chance de survivre à long terme en raison de la concurrence exercée par la végétation installée sur la partie supérieure.

En ce qui concerne les autres ligneux, la priorité a été accordée aux espèces présentes dans le secteur, disponibles en pépinière et présentant une bonne aptitude à la stabilisation des sols.

Il a été décidé de ne pas mettre en place de couverture herbacée pour garantir le caractère autochtone de cette dernière. Ce choix est rendu possible par les conditions suivantes :

- l'absence d'espèces exotiques envahissantes à proximité, susceptibles d'envahir le site ;
- la présence d'un géotextile et d'une forte densité de ligneux permettant dès le départ une bonne résistance à l'érosion ;
- l'utilisation de la terre végétale locale, préalablement stockée, contenant semences locales et rhizomes, et permettant une rapide recolonisation naturelle, notamment par les épilobes et pétasites (fig. 53).



Fig. 53 - L'ouvrage après une saison de végétation.

[Enrochements de pied de berge et bas du caisson végétalisés](#)

Tab. 17 - Liste des espèces utilisées sous forme de boutures.

Espèces	
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre

[Lits de plants et plançons \(dans le caisson et au-dessus\)](#)

Tab. 18 - Liste des espèces utilisées sous forme de plançons.

Espèces	
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines

Tab. 19 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants.

Espèces	
<i>Alnus viridis</i>	Aulne vert
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Sambucus nigra</i>	Sureau à grappes

[Plantations en haut de berge](#)

Tab. 20 - Liste des espèces utilisées sous forme de plants en haut de berge.

Espèces	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore
<i>Prunus padus</i>	Cerisier à grappes
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs

4.2. Techniques purement végétales sur des cours d'eau de pente supérieure à 1 %, mais hors contexte montagnard

Les deux ouvrages présentés ici sont vieux d'une dizaine d'années. Ils ne concernent pas des cours d'eau de montagne à proprement parler, même si leur pente est supérieure à 1 % et leur transport solide important. Ils illustrent toutefois l'utilisation de techniques purement végétales qui peuvent s'appliquer sur des rivières de montagne présentant des conditions de pente et de transport solide similaires.

Il s'agit de l'Ardèche, à Pont-de-Labeaume, avec un ouvrage constitué de couches de branches à rejets sans protection de pied de berge ; et de l'Adour, à Montgaillard, avec un ouvrage associant épis en fascines, fascines de pied de berge et couches de branches à rejets.

4.2.1. Chantier de Pont-de-Labeaume

Cet ouvrage a été réalisé en 1999 et est constitué de couches de branches à rejets sans ouvrage de protection de pied de berge.

Ce chantier présente un intérêt particulier, car l'ouvrage de protection de berge mis en place est en technique purement végétale, alors que la pente du profil en long (1,2 %) et le transport solide sont importants. De plus, la technique retenue, couches de branches à rejets sans protection de pied de berge, est originale.

4.2.1.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : France
Commune : Pont-de-Labeaume (Ardèche)
Altitude : 300 m
Latitude-longitude : 44°39'58" N, 4°17'23" E
Maître d'ouvrage : NC
Maître d'oeuvre : Centre de formation professionnelle forestière (CFPF)
Enjeu sécuritaire : terrain communal de loisirs
Type de dégradation de berge : érosion générale

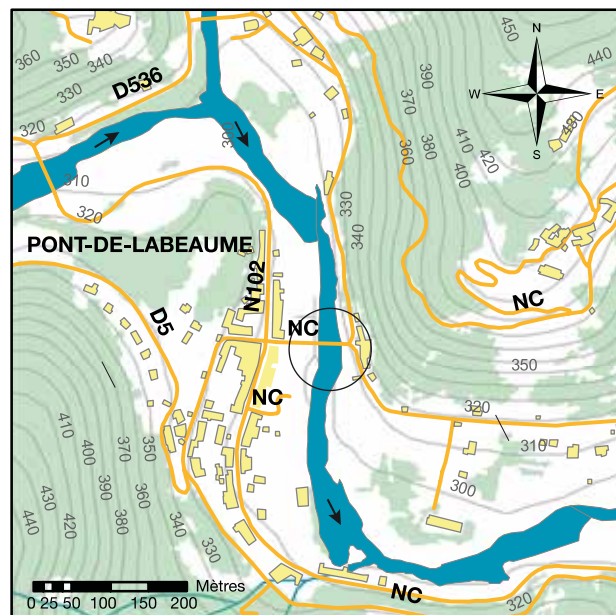


Fig. 54 - Plan de situation de l'ouvrage de Pont-de-Labeaume.

Le cours d'eau : l'Ardèche

Pente de profil en long : 1.2 %
Débit moyen annuel : 17 m³/s

Contexte et enjeux

Cette zone avait été préalablement protégée par des enrochements qui n'avaient pas tenu. L'idée a été d'éviter tout point dur face aux contraintes d'arrachement très importantes développées par le cours d'eau. Le choix s'est ainsi porté sur la mise en place de couches de branches à rejets. Celles-ci ont été conçues sans protection de pied de berge afin de ne pas créer de point dur.

Cet ouvrage est situé dans un intrados de méandre, il n'est donc pas dans la situation la plus exposée. Il est néanmoins situé sur l'Ardèche, rivière de taille respectable, connaissant des crues importantes, un transport solide marqué et une pente supérieure à 1 %.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : couches de branches à rejets
Orientation de l'ouvrage : ouest
Emplacement de l'ouvrage : rive gauche
Longueur de l'aménagement : 62 m
Date de création : 1999
Montant total de l'investissement : NC

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants



Fig. 55 - L'ouvrage en mars 1999 après réalisation.



Fig. 56 - L'ouvrage en mai 2011. La végétation s'est généreusement implantée.

4.2.1.2. Description technique de l'ouvrage

Cet ouvrage a été mis en place en 1999 (fig. 55). Il a résisté à plusieurs crues dont une forte (supérieure à la vicennale avec un débit instantané de $485 \text{ m}^3/\text{s}$) en 2003.

Le profil de l'ouvrage est donné sur la figure 57. L'ouvrage comprend deux étages de couches de branches à rejets. Les couches de branches à rejets présentent une pente de 1V/3H. Elles sont constituées d'une densité de branches de 20 pièces au mètre linéaire, disposées perpendiculairement à la rivière. La partie inférieure des branches (plus gros diamètre) est enfoncée sous le niveau du lit pour être constamment en contact avec l'eau et pour éviter le déchaussement lors des crues. Le lit de branches est recouvert d'une couche de terre d'environ 5 cm d'épaisseur. Le tout est recouvert d'un géotextile coco de 740 g/m^2 (CFPF 1999).

Les pieux qui viennent fixer l'ensemble des couches de branches sont espacés de 80 cm dans les sens horizontaux et verticaux. La rangée inférieure des pieux est placée 20 cm au-dessus de la partie inférieure des branches.

Des fils de fer galvanisés sont tendus entre les pieux et fixés sur ceux-ci par des crampillons. Afin d'optimiser la reprise et le maintien des branches de saules, un second battage a été effectué une fois les pieux ligaturés (CFPF 1999).

Il est ainsi important de noter qu'une technique de génie végétal pure, sans protection de pied de berge, a pu résister aux crues tumultueuses de l'Ardèche pendant plus de dix ans (fig. 56).

4.2.1.3. Végétation

Pas d'informations disponibles.

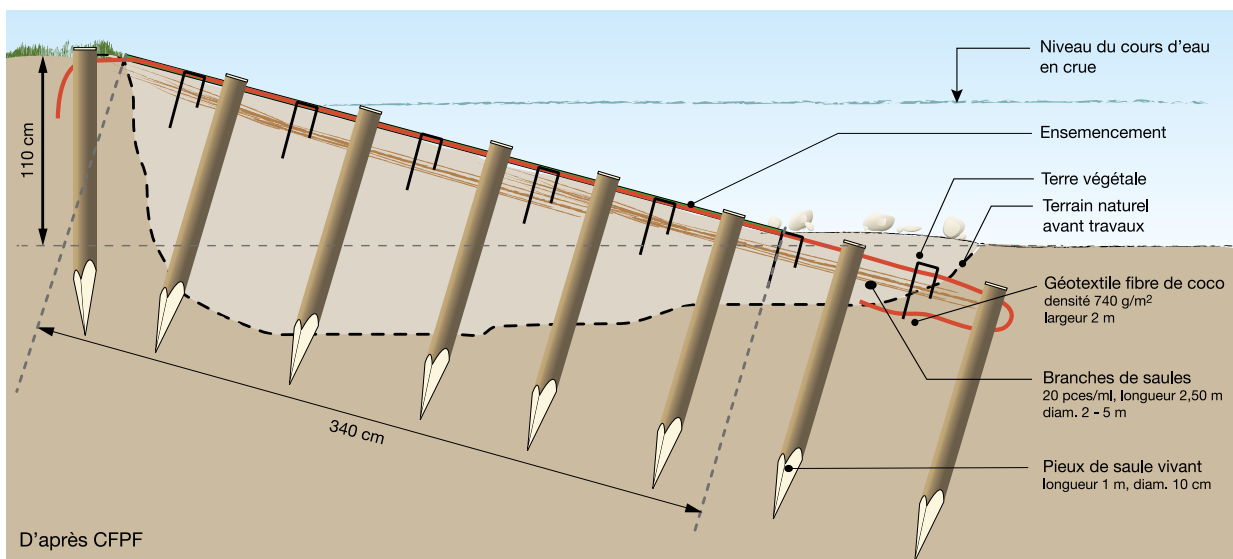


Fig. 57 - Coupe transversale sur les couches de branches à rejets.

4.2.2. Chantier de Montgaillard

Le chantier de Montgaillard date de 1999. Il est construit sur un cours d'eau dynamique et la technique des épis en fascines est intéressante, car relativement peu utilisée.

4.2.2.1. Présentation générale de l'ouvrage

Le site

Pays : France
Commune : Montgaillard (Hautes-Pyrénées)
Altitude : 445 m
Latitude-longitude : 43°07'11" N, 0°06'54" E
Maître d'ouvrage : Communauté de communes de la Haute Bigorre
Maître d'œuvre : CFPF
Enjeu sécuritaire : chemin
Type de dégradation de berge : érosion générale

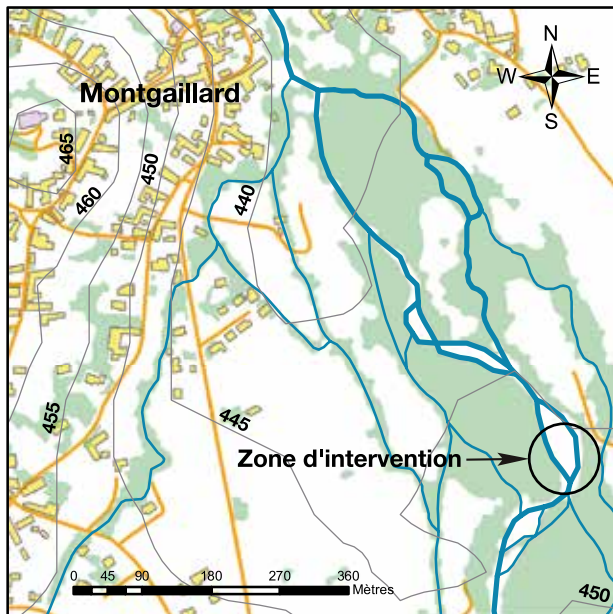


Fig. 58 - Plan de situation de l'ouvrage de Montgaillard.

Le cours d'eau : l'Adour

Pente de profil en long : > 1,4 %
Crue la plus importante depuis la construction de l'ouvrage : 2003 ($Q_{\text{crue}} = 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Contexte et enjeux

Il s'agit d'une zone à très forte valeur piscicole, et une érosion menaçait de voir le cours d'eau partir vers des terres agricoles (maïs) avec, en conséquence, une mise en suspension de matériaux fins et un risque d'arrivée d'intrants agricoles. Cet ouvrage a été réalisé à la demande de la Fédération de pêche. L'érosion menaçait également un chemin rural et des terres agricoles (fig. 59). L'Adour, sur le secteur de Montgaillard, est une rivière dynamique avec une pente moyenne supérieure à 1,4 % et un transport solide important ($D_{84} = 156 \text{ mm}$).



Fig. 59 - La berge de l'Adour avant les travaux.

Description succincte de l'ouvrage

Techniques employées : épis en fascine + fascines de berge et couches de branches à rejets
Orientation de l'ouvrage : ouest
Emplacement de l'ouvrage : rive droite en extrados
Longueur de l'aménagement : 70 m
Date de création : 2000
Montant total de l'investissement : NC

4.2.2.2. Description technique de l'ouvrage

L'érosion, forte en extrados de méandre, ne permettait pas de mettre en place une simple technique végétale de type fascine en pied de berge. Cette dernière n'aurait pas résisté aux contraintes en présence. Il a donc été décidé de mettre en place une série d'épis, eux-mêmes constitués de fascines de saules fixées par deux rangées de pieux en châtaignier. Sur la berge elle-même sont installées des couches de branches à rejets, protégées par une fascine en pied (fig. 60).

Fascines

Les deux rangées de pieux sont espacées de 45 cm, les pieux sont longitudinalement espacés de 80 cm. Une première couche de branches anti-affouillement est placée sous la fascine. Puis, l'espace situé entre les deux rangées de pieux est rempli d'un mélange de branches de saules et de matériaux terreux. La mise en place des fascines se fait de l'aval vers l'amont du cours d'eau. La partie inférieure des branches (partie avec le plus gros diamètre) est placée à l'aval vers le talus, et recouvre l'extrémité fine des branches du fagot suivant.

Les fascines sont ligaturées sur chaque pieu au moyen d'un fil de fer recuit.

L'arrière de la fascine est remblayé et une seconde couche de branches anti-affouillement vient protéger la transition entre la fascine et les couches de branches à rejets. Ces espaces de transition entre techniques représentent en effet, d'une manière générale, des points de fragilité. Le géotextile est alors déroulé et les couches de branches mises en place selon les mêmes modalités décrites pour l'ouvrage de Pont-de-Labeaume (CFPF 2000).

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Épis

L'avantage du fil de fer recuit, par rapport au fil de fer galvanisé, est de permettre son oxydation et donc sa disparition au bout de quelques années.

Pour les mêmes raisons, des cordes en fibre végétale peuvent aussi être employées.

Un épi est un ouvrage transversal au courant, ancré dans la berge, ne barrant qu'une partie du lit de la rivière et au moins partiellement submersible. Un épi étant toujours un obstacle à l'écoulement, il est généralement plus néfaste qu'utile s'il est isolé. C'est donc souvent une série d'épis successifs qui est réalisée. Un des objectifs de ce type de réalisation est d'obtenir à terme un comblement et une végétalisation progressifs des « casiers » constitués par les intervalles entre les épis (Degoutte 2006).

Les épis modifient les vitesses et la direction du courant sur les bords du cours d'eau. Aussi, selon leur implantation ou leur orientation, on peut définir les secteurs du

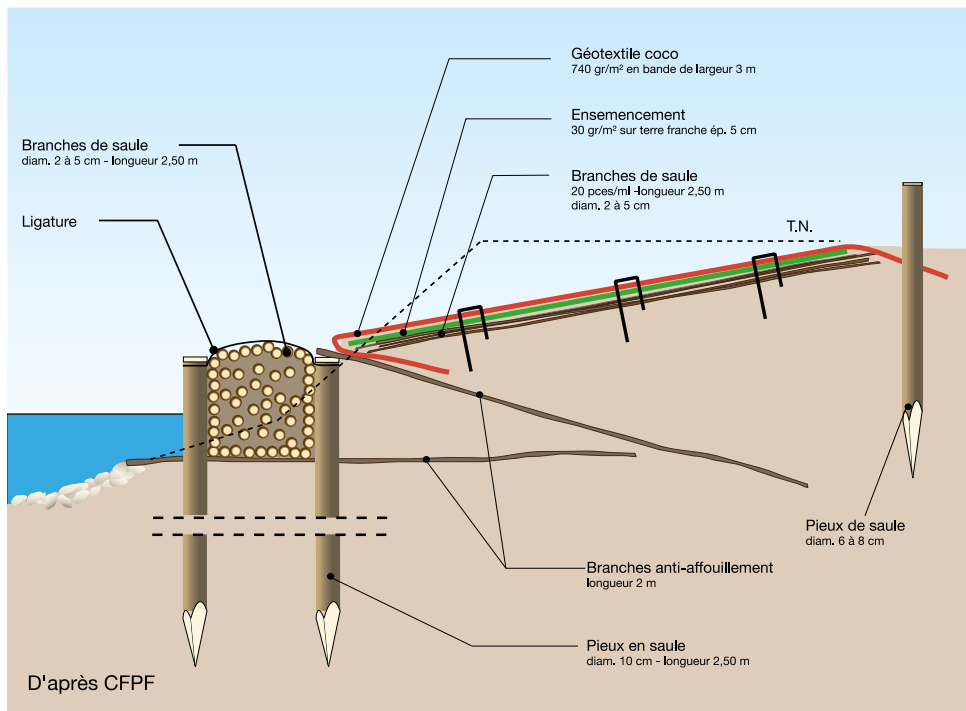


Fig. 60 - Profil type de l'ouvrage de Montgaillard.

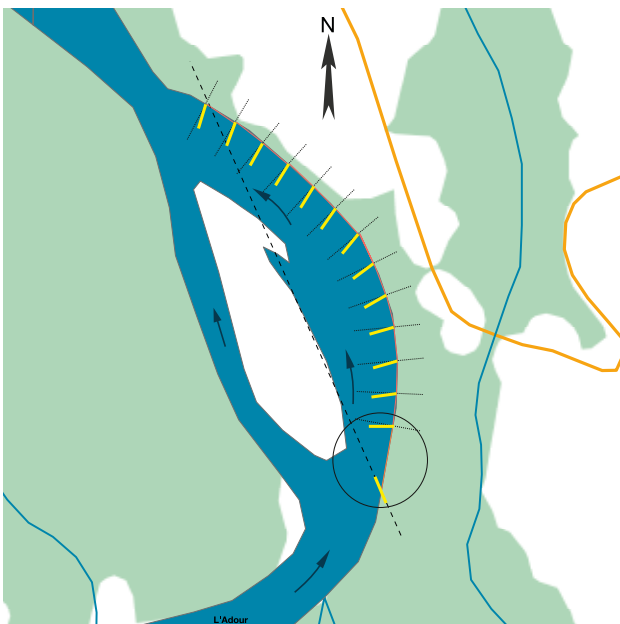


Fig. 61 - Principe de l'aménagement et disposition des épis.

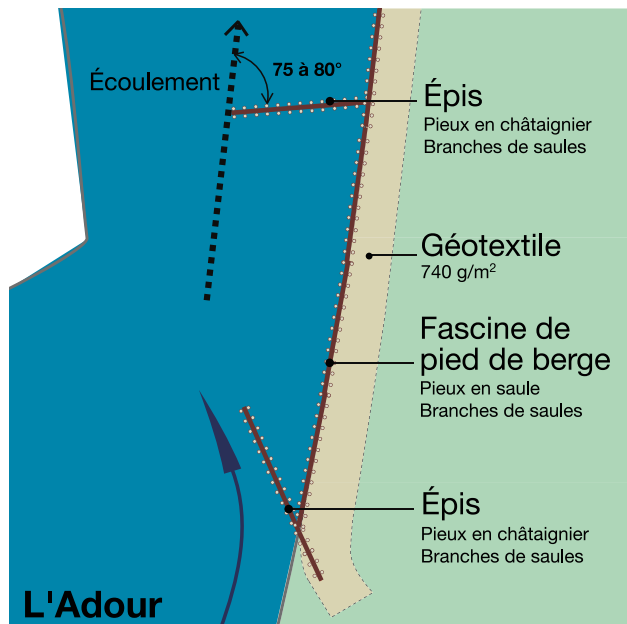


Fig. 62 - Vue générale sur la berge restaurée.



Fig. 63 - Berge de l'Adour pendant les travaux (automne 1999). Remarquez la succession d'épis plongeurs, végétalisés.



Fig. 64 - La berge de l'Adour juste après les travaux (automne 1999). L'effet des épis sur le courant est perceptible.



Fig. 65 - La berge de l'Adour deux ans après les travaux. En période de hautes eaux, les épis sont immergés.



Fig. 66 - La berge de l'Adour quatre ans après les travaux. Les épis sont toujours visibles.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

lit que l'on souhaite approfondir par affouillement et ceux que l'on vise à remblayer par sédimentation.

Les épis mis en place à Montgaillard ne sont pas perpendiculaires à l'axe d'écoulement. Le premier épi (amont) d'une série est le plus sollicité par le courant et par les corps flottants. On réalise donc un premier épi à l'amont de l'ouvrage, orienté vers l'aval et baptisé épi de rejet ou épi déflecteur (fig. 61 et 62). Les épis situés plus en aval sont eux orientés vers l'amont, faisant un angle de 75 à 80° avec l'axe d'écoulement. L'objet de cet angle est de repousser vers l'intrados la fosse de dissipation qui se crée en crue à l'aval de l'épi. En effet, en crue, l'eau passe par surverse sur les épis et crée des perturbations importantes susceptibles de provoquer des érosions qu'il vaut mieux éloigner de la berge (fig. 64).

Des mesures avec une lunette de chantier sont nécessaires afin de caler l'ouvrage.

Les épis sont réalisés selon le même principe que les fascines (matériaux terreux exclus), les pieux sont cependant en châtaignier (essence peu putrescible et qui ne rejette pas).

La tête des épis doit être située un peu au-dessus du niveau des basses eaux. Ceci implique que ces épis présentent une pente importante (épis fortement plongeants vers le centre de la rivière). L'espacement entre les épis est de 1,5 fois leur longueur soit 9 m dans ce cas particulier (CFPF 2000).



Fig. 67 - La berge de l'Adour douze ans après les travaux. Le milieu alluvial est reconstitué et les traces d'une intervention ne sont quasiment plus perceptibles, critère absolu d'une intervention réussie.

Remarques générales

Cet ouvrage est réalisé en techniques végétales pures sur une rivière à pente élevée avec un transport solide important. L'ouvrage résiste depuis 2000, alors qu'il a connu une crue juste après les travaux et a supporté une crue légèrement inférieure à la décennale en 2003. Il est par ailleurs régulièrement totalement submergé, au moins une fois par an. Dix ans après, les épis sont toujours partiellement présents, des sédiments se sont déposés entre chaque épi, laissant se développer une strate herbacée comprenant quelques héliophytes. Son intégration paysagère et environnementale est excellente comme le montre la figure 67.

4.2.2.3. Végétation

Tab. 21 - Liste des espèces utilisées sous forme de branches de saules.

Espèces	
<i>Salix atrocinerea</i>	Saule roux
<i>Salix caprea</i>	Saule marsault
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines

Tab. 22 - Liste des espèces utilisées sous forme de pieux.

Espèces	
<i>Salix alba</i>	Saule blanc
<i>Salix fragilis</i>	Saule fragile

4.3. Enrochements végétalisés

L'enrochement végétalisé ne constitue pas une technique de génie végétal en tant que telle, car le végétal ne participe pas directement à la résistance mécanique de la berge (chap. I.3.1). Toutefois, les enrochements végétalisés correspondent à des modèles naturels sur certains torrents à forte pente, et leur utilisation peut ainsi se justifier dans ce cas.

Sur les rivières de plaine ou de piémont, les enrochements ne correspondent pas à la granulométrie des berges naturelles, ils sont à éviter au maximum sur le plan environnemental.

Aussi, les enrochements bruts s'avèrent être des zones préférentielles de développement des espèces exotiques envahissantes comme la renouée du Japon ou le buddleia (chap. II.6). Et la présence d'enrochements bruts constitue souvent des « verrues » sur le plan paysager.

Par ailleurs, dans les vallées alpines urbanisées, les ripisylves constituent parfois le seul corridor biologique permettant la circulation des espèces le long de la vallée. Or, lorsque les berges sont enrochées, l'absence de végétation entraîne une discontinuité des corridors biologiques. En effet, les températures élevées observées en été sur les rochers et l'absence de végétation rendent ces milieux peu propices à l'accueil et à la circulation des espèces animales et végétales.

Les rôles majeurs de corridor écologique, de rempart contre les exotiques envahissantes et de qualité paysagère assurés par les ripisylves amènent à se questionner sur la possible végétalisation de ces enrochements bruts. La meilleure solution sur le plan environnemental serait d'enlever les enrochements et de reconstruire des berges plus naturelles avec des techniques de génie végétal. Cependant, cette solution est parfois inenvisageable en raison des enjeux (infrastructures, etc.), de l'espace disponible et des contraintes hydrauliques (seuils, etc.). Aussi, la végétalisation d'enrochements présente un intérêt certain pour traiter l'énorme parc d'enrochements existant.

À ce jour, si des expériences existent à l'étranger (Italie, Autriche, Canada, etc.), la revégétalisation d'enrochement n'est que très peu utilisée en France et en Suisse. Seules quelques réalisations ponctuelles existent sur ce territoire. Il existe donc peu de retours d'expériences dans ce domaine, alors que les besoins peuvent être considérés comme importants au regard des longueurs de berges de cours d'eau enrochées sans végétation.

Si l'enrochement sur les rivières de plaine et de piémont est souvent un pis-aller sur le plan environnemental, lorsqu'on fait le choix d'en poser, autant le végétaliser. En effet, ils gagnent ainsi sur le plan de l'intégration paysagère et de l'accueil de la biodiversité, même si on ne retrouve pas la diversité que l'on peut observer sur une berge naturelle.

Nous abordons ainsi dans ce chapitre des expérimentations et chantiers menés sur des travaux de végétalisation d'enrochements existants et sur la végétalisation à l'avancement d'enrochements neufs.

4.3.1. Expérimentation sur les enrochements du seuil de l'Arve de Vougy-Marignier en Haute-Savoie



Revégétalisation d'enrochements

De fortes pressions anthropiques (digues de protection, remblai de la voie ferrée, autoroute, etc.) ont contribué à « chenaliser » l'Arve sur pratiquement 70 % de son linéaire (107 km). L'enfoncement généralisé du lit depuis les années 1970-1980 n'a fait qu'accroître ce phénomène. Ces modifications importantes du fonctionnement morphologique de la rivière ont nécessité la mise en place d'un grand nombre d'ouvrages de protection et de correction (seuils) à base d'enrochements. Ces enrochements totalisent un linéaire de 140 km.



Fig. 68 - Vue de la berge sud de l'Arve au niveau du seuil de Vougy-Marignier. État de l'enrochement avant les travaux de végétalisation.

Ce projet réalisé pendant l'hiver 2010-2011 a consisté à mettre en œuvre différents procédés de revégétalisation d'enrochements sur plusieurs parcelles expérimentales afin de comparer et d'évaluer la réussite de ces différentes techniques. Les résultats de l'expérimentation permettent de proposer des techniques pour la végétalisation d'enrochements existants, dans les cas où la suppression pure et simple des protections de berge apparaît impossible en raison des contextes locaux (espace disponible, contraintes mécaniques, enjeux à protéger).

Le linéaire concerné par le projet est constitué de 200 m d'enrochement sur chaque berge, chacune large de 8 m. L'expérimentation porte au total sur 3 200 m². Les deux berges sont traitées de manière identique avec cinq techniques de végétalisation différentes. La reprise végétative et la diversité floristique seront suivies afin d'évaluer la pertinence de chaque technique.

Les deux berges sont exposées respectivement nord et sud. L'influence de l'exposition est ainsi prise en compte.

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

Les espèces bouturées sont des saules et de la myricaire (*Myricaria germanica*) prélevés localement. Les espèces de saule mises en place sont, pour les boutures :

- Saule drapé (*Salix elaeagnos*) ;
- Saule pourpre (*Salix purpurea*) ;
- Saule faux daphné (*Salix daphnoides*) ;
- Saule à trois étamines (*Salix triandra*).

Pour les pieux, seul *Salix daphnoides* a été utilisé, unique espèce disponible à proximité dans les dimensions souhaitées.



Fig. 69 - Vue aérienne du seuil, depuis l'amont, en septembre 2010. La berge de gauche est orientée nord et celle de droite est orientée sud. L'impact paysager et la discontinuité du corridor alluvial apparaissent clairement.



Fig. 70 - Vue aérienne du seuil, depuis l'aval, en septembre 2011.

Placette n° 1 : forage de l'enrochement

Des forages ont été effectués entre les interstices à 2 m de profondeur (1 forage par 4 m², diamètre de 10 cm). Puis mise en place de pieux vivants de *Salix daphnoides* de plus de 3 m. Ensuite, injection de terre liquide uniquement autour du pieu (afin de colmater le forage), comprenant des éléments grossiers (présence significative de sable, avec limon ou argile pour la tenue de la terre et la capacité de rétention de l'eau). Enfin, une collerette de géotextile a été mise en place à la base de tous les pieux (fig. 71).



Fig. 71 - Placette n° 1 : développement d'un pieu de saule faux daphné en août de la première saison de végétation.

Placette n° 2 : garnissage des vides à la lance

Les vides sont comblés par projection dans les interstices de terre liquide, comprenant des éléments grossiers (proportion significative de sable, avec limons ou argiles), et bouturage avec une densité de 2 à 3 boutures standard par m² (fig. 72 et 73).



Fig. 72 - La lance garantit un remplissage des interstices en profondeur.



Fig. 73 - L'enrochement après le comblement des vides.

[Placette n° 3 : garnissage des vides à la lance + géotextile coco](#)

Cette placette est identique à la placette n° 2 en rajoutant un géotextile coco de fort grammage fixé à l'aide de clous plantés dans les blocs et de fil de fer.

[Placette n° 4 : placage à la pelle mécanique](#)

Les interstices entre les pierres sont comblés par placage de terre à la pelle mécanique. Des bouturages ont été réalisés avec une densité de 2 à 3 boutures par m² (fig. 74 et 75).



Fig. 74 - Placage de la terre à la pelle mécanique.

[Placette n° 5 : placage à la pelle mécanique + géotextile coco](#)

Cette placette est identique à la placette n° 4 en rajoutant un géotextile coco de fort grammage fixé à l'aide de clous plantés dans les blocs et de fil de fer.



Fig. 75 - Vue sur l'enrochement avec une partie plaquée et l'autre nue.

Tab. 23 - Coûts des différentes techniques : (a) placette n° 1 ; (b) placette n° 2 ; (c) placette n° 3 ; (d) placette n° 4 ; (e) placette n° 5 (s'agissant de la végétalisation d'enrochements existants, ces coûts n'incluent pas la fourniture et la mise en place des blocs).

(a) Placette n° 1	
Surface totale (m ²)	160
Amont de la berge (1/3)	4 695 €
Forage	
Injection de « coulis terreux »	
Pieux vivants	
Ensemencement en 2 passes	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m ²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	6 098 €
Ratio prix/m²	38 €

(b) Placette n° 2	
Surface totale (m ²)	160
Amont de la berge (1/3)	2 109 €
Remplissage en profondeur des interstices	
Placage et recouvrement de terre	
Boutures (3/m ²)	
Ensemencement en 2 passes	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
Placage et recouvrement de terre	
Mise en place de plants (1/m ²)	
Ensemencement en 2 passes	
Total	3 512 €
Ratio prix/m²	22 €

4. Les différentes techniques de protection de berges employant des végétaux vivants

(c) Placette n° 3	
Surface totale (m ²)	160
Amont de la berge (1/3)	3 109 €
<i>Remplissage en profondeur des interstices</i>	
<i>Placage et recouvrement de terre</i>	
<i>Boutures (3/m²)</i>	
<i>Ensemencement en 2 passes</i>	
<i>Géofilet coco</i>	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
<i>Placage et recouvrement de terre</i>	
<i>Mise en place de plants (1/m²)</i>	
<i>Ensemencement en 2 passes</i>	
Total	4 512 €
Ratio prix/m²	28 €

(d) Placette n° 4	
Surface totale (m ²)	160
Amont de la berge (1/3)	1 718 €
<i>Placage et recouvrement de terre</i>	
<i>Boutures (3/m²)</i>	
<i>Ensemencement en 2 passes</i>	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
<i>Placage et recouvrement de terre</i>	
<i>Mise en place de plants (1/m²)</i>	
<i>Ensemencement en 2 passes</i>	
Total	3 121 €
Ratio prix/m²	20 €

(e) Placette n° 5	
Surface totale (m ²)	160
Amont de la berge (1/3)	2 718 €
<i>Placage et recouvrement de terre</i>	
<i>Boutures (3/m²)</i>	
<i>Ensemencement en 2 passes</i>	
<i>Géofilet coco</i>	
Aval de la berge (2/3)	1 403 €
<i>Placage et recouvrement de terre</i>	
<i>Mise en place de plants (1/m²)</i>	
<i>Ensemencement en 2 passes</i>	
Total	4 121 €
Ratio prix/m²	26 €

Création d'enrochements végétalisés à l'avancement

Les plançons utilisés doivent être suffisamment longs pour que les racines puissent aller chercher la terre et les nutriments derrière l'enrochement. En effet, les enrochements en eux-mêmes constituent un habitat avec une faible réserve hydrique et en nutriments pour les plantes. De plus, le fait que les racines se développent sous l'enrochement et pas dans celui-ci, évite sa déstabilisation éventuelle.

Lorsqu'on réalise un enrochement végétalisé, il est préférable d'utiliser une couche de transition plutôt qu'un géotextile synthétique pour protéger l'ouvrage contre l'érosion interne. En effet, les racines peuvent se développer à travers la couche de transition, ce qui n'est pas le cas avec un géotextile synthétique.

Sur l'Arve, à Vougy, pour corriger une érosion présente en rive gauche à l'aval du seuil, une partie de la berge a été protégée avec une technique mixte comprenant un enrochement de pied de berge surmonté par des lits de plants et plançons. L'enrochement de pied de berge a été végétalisé à l'avancement. Une couche de terre a été déposée au-dessus de chaque bloc, puis un plançon de saule faux daphné d'une longueur de 2,5 m a été mis en place tous les 2 m². Après quoi, les blocs supérieurs ont été mis en place et recouverts de terre. Un ensemencement de toute la zone a également été réalisé (fig. 76 et 77).



Fig. 76 - Mise en place de l'enrochement végétalisé en février 2011.



Fig. 77 - Le même endroit en septembre 2011.

4.3.2. Autre technique d'enrochement végétalisé à l'avancement

Si les enrochements végétalisés sont peu utilisés en France, ils le sont plus dans d'autres pays comme l'Italie, l'Autriche ou le Canada.

Les illustrations présentées ci-dessous proviennent de travaux menés par la société canadienne Terra Erosion Control (<http://www.terraerosion.com/company.htm>) qui est dirigée par Pierre Raymond.

Cette société pratique la mise en place d'enrochements végétalisés sur de grandes longueurs. Sur la figure 78, on peut voir la coupe type des ouvrages qu'elle met en place. Sur un premier lit d'enrochement protégé par une couche de transition, une tranchée est excavée et un géotextile déroulé. Puis, un lit de plançons est mis en place et recouvert de terre végétale (fig. 79). Un panneau d'OSB (*oriented strand board* ou « panneau à lamelles minces orientées ») est alors posé. Ce panneau a pour double objectif de protéger les boutures de toute blessure lors de la pose des rochers, et de conduire l'écoulement des eaux météoriques vers les racines à l'arrière de l'enrochement. Quatre ans après, le résultat est intéressant (fig. 81). À noter le grillage de protection contre les castors.

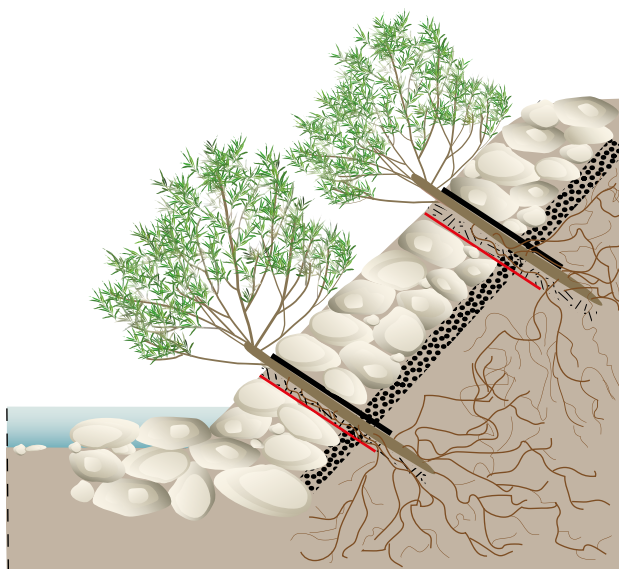


Fig. 78 - Coupe transversale sur un enrochement bouturé : en rouge, le géotextile biodégradable ; en noir, les panneaux d'OSB ; entre les deux, la terre végétale et les plançons. Les points noirs représentent la couche de transition.



Fig. 80 - Positionnement des enrochements sur la partie supérieure.



Fig. 79 - Mise en place des boutures et de la terre végétale.



Fig. 81 - L'ouvrage 4 ans après les travaux.

5. Ouvrages transversaux en bois

Le présent chapitre présente des ouvrages bois transversaux au cours d'eau. Les protections de berge ne seront pas directement abordées. Ces ouvrages assurent un rôle complémentaire aux techniques végétales de protection de berges dans le cadre de l'aménagement d'un cours d'eau de montagne. Ils contribuent principalement à stabiliser le profil en long du lit, complément souvent indispensable à la mise en œuvre des techniques de stabilisation de berges.

Contrairement à des techniques minérales plus lourdes, de type enrochement, le choix de réaliser ces ouvrages avec du matériau bois contribue à minimiser l'empreinte environnementale globale du chantier (bois de provenance local, etc.).

Le choix du type d'ouvrage répond à des critères multiples, il dépend notamment du contexte hydraulique, des matériaux disponibles, des compétences locales à disposition... La présentation des ouvrages bois n'exclut, par exemple, en rien la possibilité de réalisation de seuil en pierre s'inspirant d'un modèle de cours d'eau en step-pool. Il s'agit d'une alternative qui écologiquement et économiquement peut être pertinente.

Avertissement aux lecteurs :

les ouvrages transversaux en bois constituent des seuils et sont donc susceptibles de modifier le transit sédimentaire. Ces ouvrages peuvent avoir un impact sur les fonctionnements hydromorphologique et écologique (non-franchissement par les poissons) du cours d'eau. Une étude globale du fonctionnement du cours d'eau et de son transport solide doit être conduite préalablement.

Parmi les ouvrages bois transversaux dans les cours d'eau de montagne, on rencontre principalement des seuils et des barrages. La terminologie utilisée pour définir l'ouvrage n'est pas toujours employée de la même manière par les différents gestionnaires.

Il est proposé d'adopter les définitions suivantes pour distinguer les seuils des barrages.

Un **seuil** est un ouvrage de taille modeste dont la plus grande hauteur mesurée à l'aplomb entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel (lit du cours d'eau) n'excède pas deux mètres.

Un **barrage** est un ouvrage dont la plus grande hauteur mesurée à l'aplomb entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel (lit du cours d'eau) est supérieure à deux mètres. Dans ce chapitre, seuls les ouvrages dont la hauteur n'excède pas six mètres seront présentés.

L'architecture de la structure du barrage nécessite généralement une étude de dimensionnement.

Cette distinction entre seuils et barrages est utilisée par Irstea dans son étude n° 18, « Équipements pour l'eau et l'environnement ».

Les barrages et les seuils en bois peuvent être différenciés par leurs dimensions, par l'organisation de leur structure interne ou encore par leur fonction dans le cours d'eau :

- calage du fond du lit ;
- tenue des berges ;
- écrêteur de crue.

Deux modèles principaux sont distingués pour réaliser l'architecture de la structure :

- **caisson en rondins de bois** rempli de matériaux inertes agissant comme une construction « poids » ;
- **simple paroi, profondément ancrée** dans les berges du cours d'eau.

Cette partie a été réalisée en s'appuyant sur un large retour d'expériences en France et plus largement sur l'ensemble de l'Arc alpin. Elle s'attache à faire une synthèse des principales techniques susceptibles d'être mises en œuvre dans des cours d'eau de montagne en s'appuyant notamment sur les travaux de Damien Roman dans son mémoire d'ingénieur : **Les ouvrages bois dans les cours d'eau. État de l'art, application et dimensionnement.**

5.1. Seuils bois

Avertissement aux lecteurs :

les exemples de réalisation présentés dans cette partie ont pour certains été réalisés dans des cours d'eau de plaine. Ces réalisations constituent néanmoins actuellement les seules transposables au contexte montagnard et sur lesquelles on peut s'appuyer pour de futurs aménagements.

5.1.1. Seuils bois classiques à simple paroi

La méthode courante pour réaliser un seuil à simple paroi consiste à assembler horizontalement des bois ronds les uns sur les autres avec des broches métalliques pour constituer le corps de l'ouvrage. Ce dernier doit être ancré dans les berges du cours d'eau sur une longueur minimale d'un mètre. Il peut être renforcé par des pieux verticaux battus contre sa face aval (fig. 1 et 2).

5.1.1.1. Champ d'application

Les champs d'application de ces ouvrages sont multiples :

- la mise en place de seuils successifs permet de « dissiper » l'énergie d'un cours d'eau de forte pente en limitant les vitesses d'écoulement (effet de chutes successives), comme dans le cours d'eau Artilla dans le département du Rhône (fig. 1) ;
- sur des cours d'eau dont le lit connaît un processus d'incision ou d'enfoncement ponctuel, la mise en place de seuils permet de rehausser et fixer le profil en long en favorisant les dépôts en recul immédiat de chaque ouvrage, et ainsi de stabiliser les berges en amont ;
- la mise en place d'un seuil peut également être dictée par la volonté de donner une direction particulière aux écoulements ;
- la mise en place d'un seuil à l'aval direct d'un ouvrage de plus grande dimension (barrage, pile de pont, etc.) peut être envisagée dans le but de limiter les phénomènes d'affouillement de ce dernier.

Remarques

Dans le cas d'un dénivelé important de lit à consolider, il est préférable de multiplier le nombre de seuils plutôt que d'édifier un ouvrage de hauteur de chute trop importante.

L'implantation peut se faire dans tous les sols meubles pour pouvoir ancrer l'ouvrage dans les berges et/ou dans le lit si battage de pieux, sous réserve d'absence de zone en glissement de terrain.

lorsque la forme des grumes utilisées est irrégulière. Il doit être fixé au parement amont (fig. 4).

L'atterrissement (nom employé pour désigner les matériaux de remblai se situant à l'arrière de l'ouvrage) est réalisé avec les matériaux pris sur place. Lorsque le site présente un déficit de matériaux, il est possible d'effectuer un atterrissement même minimum avec des rémanents de branchages par exemple. Il est vivement conseillé de ne pas laisser un ouvrage « nu » exposé au passage d'une crue. Ceci pourrait conduire à sa ruine.

Les assemblages entre les grumes sont réalisés à l'aide de tiges métalliques (acier HA) de diamètre 10 à 12 mm battues manuellement. En théorie, les grumes doivent être pré-perçées d'un diamètre inférieur de 1 à 2 mm de celui de la tige. En pratique, elles le sont au diamètre de la tige.



Fig. 1 - Succession de petits seuils à simple paroi réalisés dans le cours d'eau Artilla (Rhône - France).

5.1.1.2. Mode opératoire

Les rondins de bois composant ces ouvrages doivent être ancrés dans les berges d'au moins 1 m de chaque côté. Il faut prendre soin de bien adapter la dimension de la cuvette en fonction du niveau des hautes eaux afin que les ailes du seuil ne soient pas submergées.

La profondeur d'ancrage dans le lit du torrent de la paroi verticale constituant le corps d'ouvrage doit être d'au moins 0,5 fois la hauteur de l'ouvrage à la cuvette ($0,5 h_{dev}$) (fig. 2), pour se prémunir des phénomènes de lessivage en cas d'affouillement du pied de l'ouvrage.

Dans la plupart des cas, les ailes permettant le centrage des écoulements sont réalisées au moyen d'une ou deux grumes qui prennent appui sur les pieux verticaux (fig. 3 et 5). Elles sont généralement clouées sur le bois supérieur. La durée de vie des pieux doit être considérée comme plus faible que le reste de l'ouvrage, puisqu'ils se trouvent dans des conditions de durabilité réduite. Les pieux sont généralement battus mécaniquement. Dans le cas de petits ouvrages, lorsque le diamètre des pieux est inférieur à 10 cm, le battage est fait manuellement.

Un géotextile peut être associé à la construction du seuil pour éviter les phénomènes de lessivage, en particulier

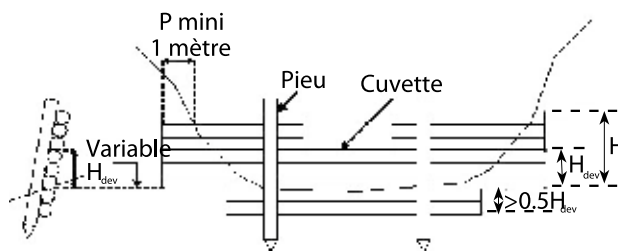


Fig. 2 - Schéma de principe d'un seuil bois classique avec des ailes.



Fig. 3 - Installation des pieux d'un seuil bois classique.



Fig. 4 - Installation d'un géotextile contre le parement amont de l'ouvrage.



Fig. 5 - Petits seuils rustiques en bois avec ailes fixées sur les pieux.

5.1.1.3. Avantages et inconvénients

Tab. 1 - Avantages et inconvénients des seuils bois à simple paroi.

Seuils bois à simple paroi	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main-d'œuvre et de la fourniture minimisée)	Peu résistants à de fortes sollicitations, notamment impact des embâcles lors du passage de grosses crues
Mise en place manuelle dans des cours d'eau escarpés et difficilement accessibles	Résistent mal à l'affouillement et aux phénomènes de lessivage
Oxygénation du milieu favorable à la faune aquatique et à l'autoépuration du cours d'eau	Nécessitent des berges suffisamment meubles
N'entravent pas la migration piscicole (si faible hauteur de chute, $h < 30$ ou 50 cm suivant l'espèce et le débit)	Peu appropriés en zone de glissement

5.1.1.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 2 - Pré-dimensionnement des seuils bois à simple paroi.

Seuils bois à simple paroi	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage mesurée entre le sommet et le lit du cours d'eau	$H \leq 2$ m
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	$P \geq 1$ m
Profondeur d'ancrage minimum de la paroi verticale dans le lit du cours d'eau	$\geq 0.5 H_{dev}$
Diamètre des pieux verticaux et des rondins horizontaux (généralement adapté à la disponibilité des bois locaux ainsi qu'à la hauteur du lit du cours d'eau)	$\varnothing \text{ min} = 10 \text{ à } 15$ cm
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 12$ mm

5.1.2. Variante 1 : petits seuils rustiques à simple paroi

5.1.2.1. Champ d'application

Ces ouvrages rustiques et rapides à mettre en œuvre sont constitués de deux ou trois rondins superposés et assemblés à l'aide de broches métalliques (fig. 10).

Au niveau du parement aval, des pieux verticaux sont généralement présents pour renforcer la structure. Un dispositif de recalibrage des débits d'étiage est généralement prévu (fig. 6).

Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté pour des cours d'eau à régime permanent ayant un lit relativement large (de 10 à 15 m).

Ces petits ouvrages de stabilisation du fond du lit du cours d'eau n'empêchent pas la migration de la faune piscicole.



Fig. 6 - Petit seuil rustique avec dispositif de recalibrage des débits.



Fig. 7 - Assemblage et préfabrication d'un seuil à partir de grumes en épicéa.

5.1.2.2. Mode opératoire

Ce type d'ouvrage est réalisé par la mise en place de trois grumes l'une sur l'autre à l'aide de tiges métalliques type fer à béton HA 12 mm.

Un géotextile est généralement fixé sur le parement amont pour prévenir les phénomènes de lessivage (fig. 7).

Il est nécessaire de créer des ancrages dans les berges sur une profondeur d'un mètre minimum et d'installer les troncs transversalement au cours de l'eau.

Les pieux sont battus mécaniquement. Ils doivent être positionnés tous les mètres et leur profondeur d'ancrage est d'1 m au minimum. Les pieux sont solidarisés aux troncs transversaux à l'aide d'acier à béton HA.

Dans le cas où les berges sont trop instables, il est préférable d'assurer l'ancrage de l'ouvrage par un calage en enrochements (fig. 8 et 9).



Fig. 8 - Calage de l'ouvrage en berge rive gauche par des enrochements.



Fig. 9 - Installation d'un seuil préfabriqué à la pelle mécanique.

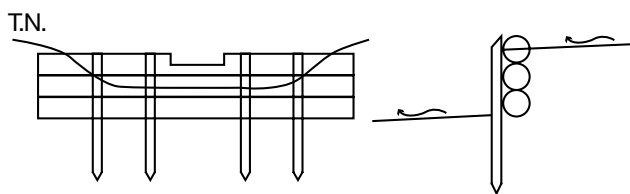


Fig. 10 - Schéma de principe d'un seuil rustique avec dispositif de recalibrage des débits.

5.1.2.3. Avantages et inconvénients

Tab. 3 - Avantages et inconvénients des seuils rustiques.

Seuils rustiques	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main-d'œuvre et de la fourniture minimisée)	Ouvrage facilement contournable par les eaux
Mise en œuvre rapide et mécanisable (suivant les conditions d'accessibilité du site)	Mauvaise résistance à l'affouillement et aux phénomènes de lessivage
Ouvrage pouvant être préfabriqué en atelier ou sur la berge	Ouvrage fortement limité en hauteur
N'entravent pas la migration piscicole (si faible hauteur de chute, $h < 30$ ou 50 cm suivant l'espèce et le débit)	

5.1.2.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 4 - Pré-dimensionnement des seuils rustiques.

Seuils rustiques	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (2 à 3 rondins de bois)	$H \leq 50$ à 60 cm
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	$P \geq 1$ m
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	$P \geq 1$ m
Diamètre des pieux verticaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux)	\varnothing min = 10 à 15 cm
Diamètre des bois horizontaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	\varnothing min = 15 à 25 cm
Diamètre des tiges métalliques (acier à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 12$ mm

5.1.3. Variante 2 : seuils en arc de cercle

5.1.3.1. Champ d'application

Ces ouvrages (fig. 11) présentent une structure de taille réduite. Ils sont constitués de pieux jointifs disposés en arc de cercle.

Grâce à leur forme incurvée, ils permettent de recentrer les écoulements vers l'axe du lit limitant ainsi l'érosion des berges. En effet, la trajectoire des écoulements en sortie d'ouvrage est perpendiculaire au support (fig. 12).

Il est à noter que ces seuils sont vulnérables aux phénomènes de déchaussement car les pieux ne sont pas solidarités. Ils sont également vulnérables aux contournements à cause du manque d'ancrage dans les berges.



Fig. 11 - Seuil en arc de cercle.

5.1.3.2. Mode opératoire

Les pieux sont battus mécaniquement sur une profondeur de 1 m au minimum à l'aide d'une cloche de battage. L'arc de cercle est positionné partie convexe vers l'amont. Une configuration inverse aurait tendance à diriger les écoulements vers les berges.

Un géotextile est généralement fixé sur le parement amont afin d'éviter une vidange du remblai (fig. 13). La création d'une fosse de dissipation protégée par des enrochements est nécessaire pour lutter contre l'affouillement en pied d'ouvrage.

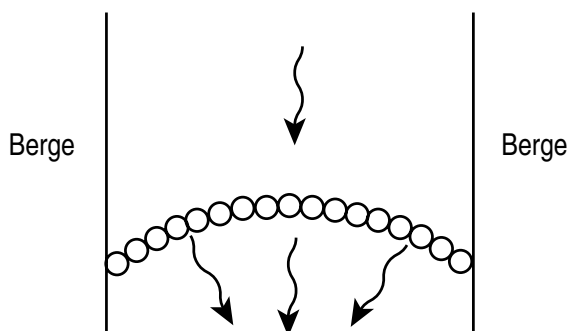


Fig. 12 - Schéma de principe d'un seuil en arc de cercle.



Fig. 13 - Installation d'un géotextile à l'amont du parement.

5.1.3.3. Avantages et inconvénients

Tab. 5 - Avantages et inconvénients des seuils en arc de cercle.

Seuils en arc de cercle	
Avantages	Inconvénients
Faible quantité de bois nécessaire	Facilement contournables par les eaux (pas d'ancrage dans les berges)
Mise en œuvre rapide et mécanisable (suivant les conditions d'accessibilité du site)	Mauvaise résistance à l'affouillement Peu de recul sur ce type d'ouvrage car peu de réalisations
Adapté au traitement de petites ravines	Lame d'eau non centrée représentant une difficulté ponctuelle de franchissement pour les espèces piscicoles

5.1.3.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 6 - Pré-dimensionnement des seuils en arc de cercle.

Seuils en arc de cercle	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage	$H \leq 50 \text{ cm}$
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	$P \geq 1 \text{ m}$
Diamètre des pieux verticaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \text{ min} = 10 \text{ à } 15 \text{ cm}$

5.1.4. Variante 3 : seuils en « V » à simple paroi

5.1.4.1. Champ d'application

Ces ouvrages rustiques sont simples et rapides à mettre en œuvre. Ils sont constitués de rondins superposés et disposés en « V », la pointe du « V » étant orientée vers l'amont. Des pieux en aval de l'ouvrage servent à caler et renforcer la structure. Un platelage amont peut consolider la structure et faciliter le transit des écoulements sur l'ouvrage.

La forme en « V » permet de recentrer les écoulements comme pour les seuils en arc de cercle (fig. 15).

Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté pour corriger de petites ravines (fig. 14).

5.1.4.2. Mode opératoire



Fig. 14 - Seuil en « V » dans une ravine.

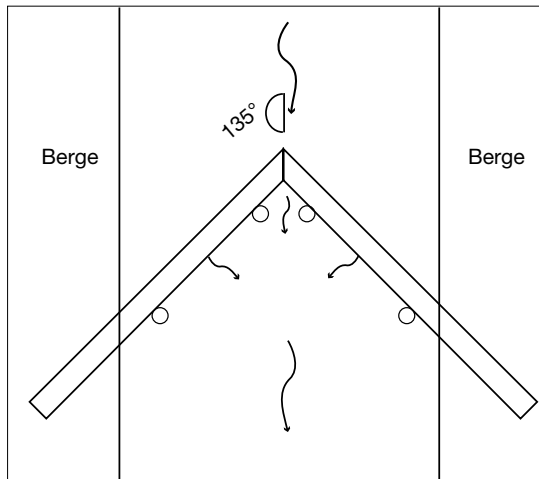


Fig. 15 - Schéma de principe d'un seuil en « V ».

Le lit de la rivière doit être nivelé pour faciliter la pose des rondins horizontaux qui doivent être ancrés dans les berges sur une profondeur de 1 m au minimum.

Les rondins disposés en « V », constituant le corps de l'ouvrage, sont assemblés par des tiges métalliques. Ils doivent être disposés de telle sorte que l'angle constitué par rapport au fil d'eau soit d'au moins 135° (fig. 15).

Les pieux verticaux sont battus mécaniquement et solidarisés au corps de l'ouvrage par des tiges métalliques.

Un géotextile peut être fixé sur le parement amont du corps de l'ouvrage contre l'atterrissement pour prévenir la vidange des fines.

Le platelage est constitué de rondins de faibles diamètres taillés en biseau, enfoncés dans le lit du cours d'eau et cloués sur le corps de l'ouvrage. La création d'une fosse de dissipation en enrochement est conseillée pour protéger l'ouvrage de l'affouillement, en raison du point faible que constitue la partie centrale du corps de l'ouvrage.

5.1.4.3. Avantages et inconvénients

Tab. 7 - Avantages et inconvénients des seuils en « V ».

Seuils en « V »	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main-d'œuvre et de la fourniture minimisé)	Peu résistants à de fortes sollicitations, notamment à l'impact des chutes de blocs et au passage de laves torrentielles
Mise en œuvre pouvant être faite entièrement à la main	Résistant mal à l'affouillement et au lessivage de l'atterrissement
Recentrage des faibles débits en période d'étiage	Peu de recul sur ce type d'ouvrage car peu de réalisations

5.1.4.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 8 - Pré-dimensionnement des seuils en « V ».

Seuils en « V »	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (2 à 3 rondins de bois)	$H \leq 50$ cm
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	$P \geq 1$ m
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	$P \geq 1$ m
Diamètre des pieux verticaux (adaptés à la disponibilité des bois locaux)	\varnothing min = 10 à 15 cm
Diamètre des bois horizontaux (adaptés à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	\varnothing min = 10 à 15 cm
Diamètre des tiges métalliques (type acier à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 12$ mm

5.1.5. Seuils bois à doubles parois

Les caractéristiques sont identiques à celles développées pour les barrages à doubles parois (chap. II.5.2.1) avec une hauteur cuvette limitée à 2 m (fig. 16).



Fig. 16 - Seuil à doubles parois.

5.2. Barrages en bois

5.2.1. Barrages à doubles parois (caissons bois)

Un caisson est constitué d'un entrecroisement de longrines (rondins les plus longs et perpendiculaires au sens d'écoulement des eaux) et de traverses (rondins plus courts et parallèles au sens d'écoulement du cours d'eau). Le remplissage de l'ouvrage par des matériaux denses pris sur place assure sa stabilité (fig. 17 et 18).

Les caissons sont majoritairement dotés d'ailes dont la structure de construction variable est intégrée au corps de l'ouvrage. Ils se différencient néanmoins sur de nombreux aspects : nature des matériaux de remplissage, aménagement du parement extérieur, mode d'assemblage des éléments. Ils sont les seuls ouvrages dont la modélisation mécanique permet un dimensionnement selon les normes inspirés des règlements Eurocodes, vulgarisés par Benoît *et al.* dans *Eurocode, calcul de structure en bois* (2008).



Fig. 17 - Ouvrage caisson à doubles parois.

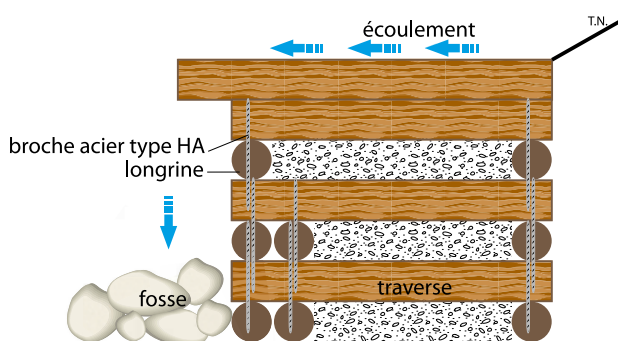


Fig. 18 - Coupe type d'un caisson à doubles parois.

5.2.1.1. Champ d'application

Les barrages à doubles parois sont principalement utilisés pour corriger ou stabiliser le profil en long du cours d'eau. Ils sont généralement implantés en série comme les seuils.

Sur des rivières dont le lit connaît un processus d'incision ou d'enfoncement ponctuel, la mise en place de barrages permet de rehausser et/ou de fixer le profil en long en favorisant les dépôts en amont de chaque ouvrage. La mise en place d'un barrage peut également être dictée par la volonté de donner une direction particulière à l'écoulement, d'éviter la divagation et de stabiliser les berges, si des enjeux de proximité nécessitent ce type de correction.

Remarques

La hauteur de chute étant importante, les ouvrages doivent être munis de dispositifs anti-affoulement, de type radiers, qui peuvent être réalisés en blocs de pierres ou avec un platelage bois.

Il est à noter qu'en cas de régimes hydrauliques violents, une construction en marches d'escalier est nécessaire pour limiter la hauteur maximale de la chute d'eau.

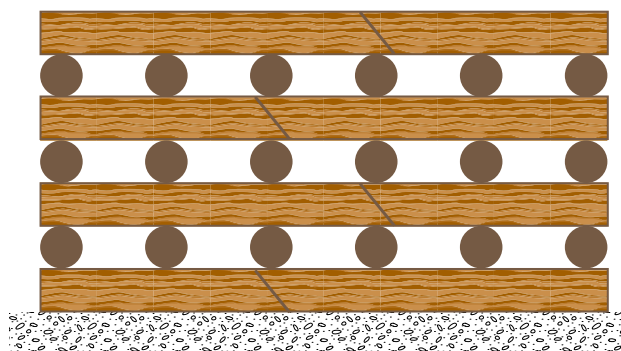


Fig. 19 - Montage d'un caisson avec les traverses alignées.

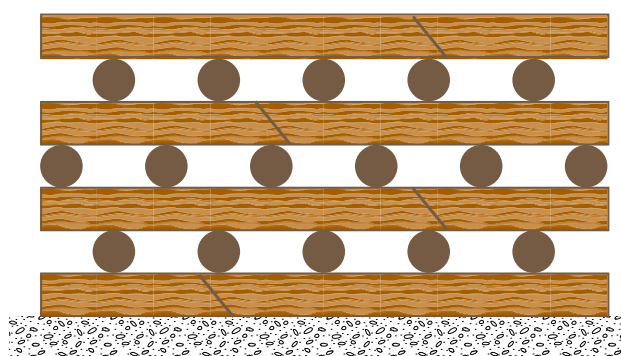


Fig. 20 - Montage d'un caisson avec les traverses alternées.

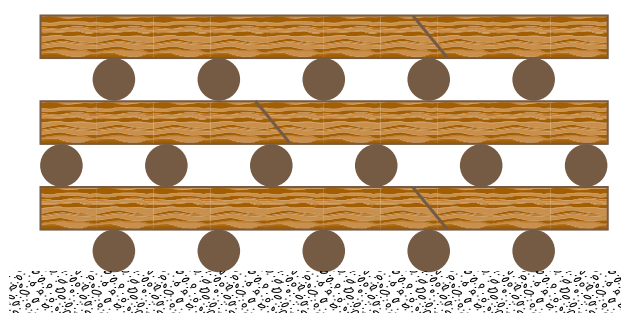


Fig. 21 - Montage d'un caisson débutant en bas avec les traverses.

5.2.1.2. Mode opératoire

Les ouvrages à doubles parois se distinguent en premier lieu par l'architecture des bois constituant leur structure interne. Il est possible d'assembler les rondins en alignant les traverses verticalement les unes sur les autres (fig. 19) ou en les alternant régulièrement (fig. 20). Une structure avec des traverses alignées sera choisie afin de faciliter le remplissage des caissons, notamment lorsque cette opération est mécanisée.

Pour la plupart des ouvrages et afin de limiter les désordres structurels en cas d'affouillement, le montage de la structure débute par une série de longrines. Certaines réalisations débutent cependant par des traverses (fig. 21). Elles sont mises en œuvre sur des sols rigides et peu sujets à l'affouillement.

D'un point de vue du fonctionnement mécanique de l'ouvrage, les trois options sont équivalentes et doivent faire l'objet d'une étude de dimensionnement précise pour définir les différents paramètres du caisson (cotes externes, diamètre des bois et broches, etc.).

Par ailleurs, les ouvrages à doubles parois se distinguent par de nombreux aspects (parements, ailes, platelages, remplissage, assemblage, etc.) tels que détaillés ci-après.

➔ Variantes de parements

De nombreux ouvrages ne font pas l'objet d'un traitement spécifique du parement aval. Ils sont alors bien souvent remplis avec les matériaux du site déposés en vrac la plupart du temps contre un géotextile (attention : le géotextile se dégrade sous l'effet des UV). Cependant, pour se prémunir sur le long terme des phénomènes d'érosion liés aux forces tractrices générées par les écoulements susceptibles de vidanger les éléments les plus fins du remblai du caisson, il est possible de protéger le parement aval avec du bois ou de la pierre suivant différentes méthodes présentées ci-après.

Parement en pierres

Les pierres sont soigneusement choisies et positionnées entre les rangs de longrines, de sorte à trouver le meilleur ajustement pour optimiser leur calage (fig. 22 et 23).

Ce type de parement est généralement rencontré dans les cours d'eau où les pierres, abondantes et de granulométrie adaptée, sont faciles à prélever.

Dans les secteurs fréquentés par le public, c'est l'aspect esthétique d'un tel parement qui peut être recherché. Par ailleurs, il est à noter qu'un parement en pierres apporte une bonne protection contre l'érosion de la face aval de l'ouvrage tout en lui assurant une bonne qualité drainante. Ce composite pierre et bois assure ainsi une préservation efficace de l'ouvrage contre sa dégradation prématurée par les agents biologiques. Son coût élevé reste sans doute le facteur limitant.



Fig. 22 - Barrage comprenant une cuvette avec parement en pierres à la Norma (Savoie - France).

Parement en bois

Les parements tout en bois peuvent être envisagés suivant trois méthodes distinctes représentées figure 23.

La **méthode (b)** consiste à intercaler des rondins de bois, appelés aussi bouche-trous, entre deux traverses parallèlement aux longrines. Suivant leur disponibilité sur le chantier, les bois de même diamètre que les traverses sont positionnés sur le même plan que les longrines (fig. 23b1) ou en retrait de celles-ci si leur diamètre est supérieur (fig. 23b2). Ces deux techniques offrent l'avantage d'une mise en œuvre rapide et facilitée lorsque l'on dispose d'une quantité suffisante de bois. Les rondins ainsi positionnés sont liaisonnés à la structure par des tiges métalliques de type fer à béton ou simplement cloués.

La **méthode (c)** se distingue par l'orientation des rondins positionnés parallèlement aux traverses sur toute la largeur de l'ouvrage (fig. 24). Cette solution nécessite de disposer d'une grande quantité de bois. En revanche, elle offre l'avantage de constituer une structure légère, de faible densité apparente. Son usage est à privilégier sur des sols peu portants.

La **méthode (d)** consiste à positionner des bois verticaux derrière les longrines. Elle présente l'avantage d'une mise en œuvre rapide et permet, le cas échéant, d'ancrer les bois, tels des pieux, dans le sol de fondation si les conditions de stabilité externe de l'ouvrage sont difficiles à obtenir comme illustré en figure 25.

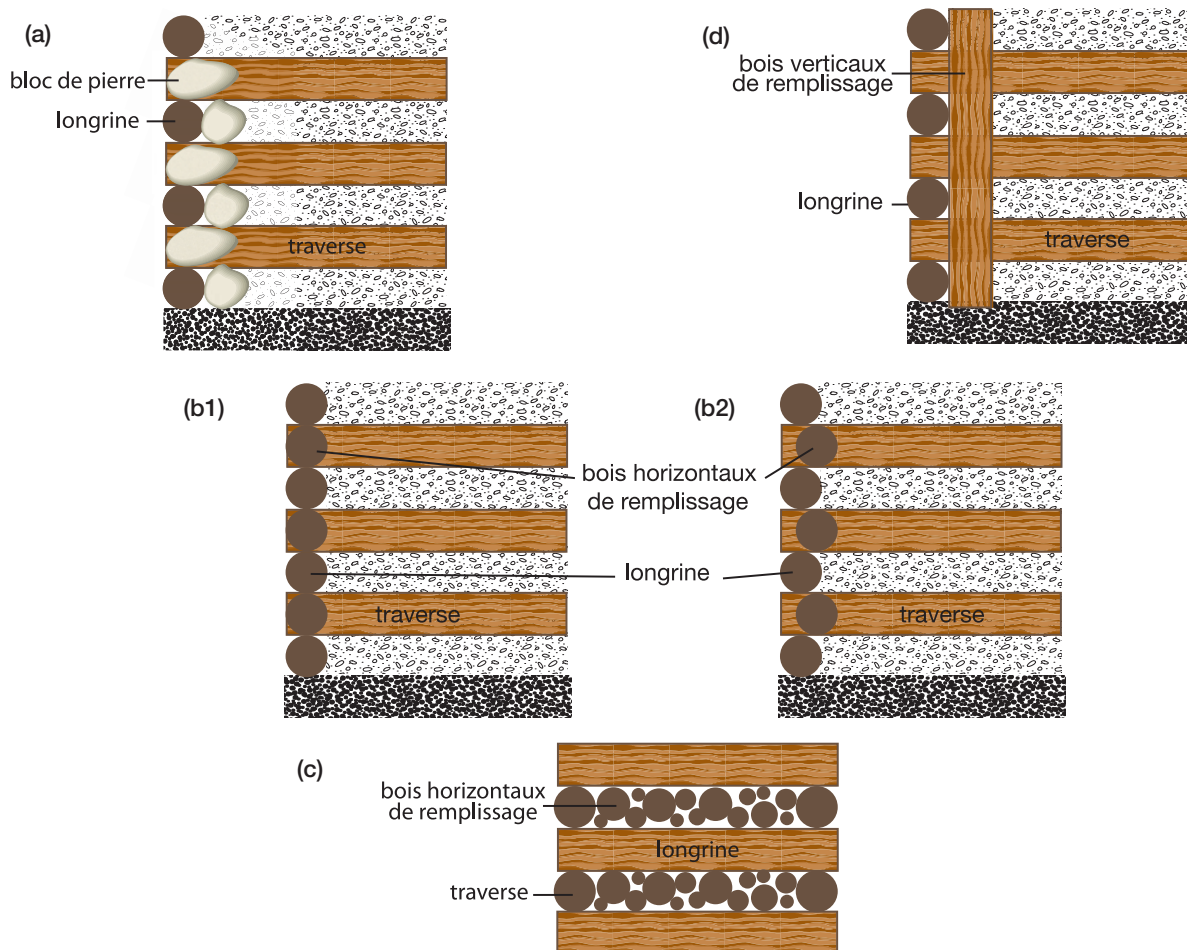


Fig. 23 - Représentation des différents types de parements utilisés.

➔ Variantes d'ailes

La structure des ailes des barrages est généralement constituée sur le même principe que celle du corps de l'ouvrage, par un entrecroisement de traverses et de longrines.

Deux cas de figure peuvent se rencontrer dans le positionnement des longrines, ces dernières pouvant être soit positionnées horizontalement parallèlement à celles du corps de l'ouvrage (fig. 26), soit inclinées par rapport à l'horizontale d'un angle proche de 45° défini par le calcul hydraulique (fig. 28).

Dans le cas des ailes inclinées, les longrines sont ancrées dans le corps du barrage sur une longueur égale à la largeur de l'ouvrage.

Les ailes peuvent également être simplement réalisées par un ou plusieurs rondins de bois, lorsque le régime des écoulements ne nécessite pas une structure plus résistante (fig. 29).

De façon plus marginale, on rencontre d'autres types de structures avec des ailes réalisées en gabions métalliques (fig. 27).

Ces structures mixtes présentent essentiellement l'avantage de garantir une meilleure durabilité aux ailes qui sont généralement des zones d'ouvrage de forte vulnérabilité vis-à-vis des dégradations biologiques.

En effet, les ailes sont les éléments de l'ouvrage les plus régulièrement soumis à de fortes variations hygrométriques et rarement protégées par un écoulement pérenne sur leur surface.



Fig. 24 - Barrage à doubles parois avec parement réalisé en rondins disposés parallèlement aux traverses.



Fig. 25 - Barrage à doubles parois avec parement réalisé avec des bois verticaux.



Fig. 26 - Barrage dont les ailes sont réalisées avec des longrines horizontales à Bordighera (Ligurie - Italie).

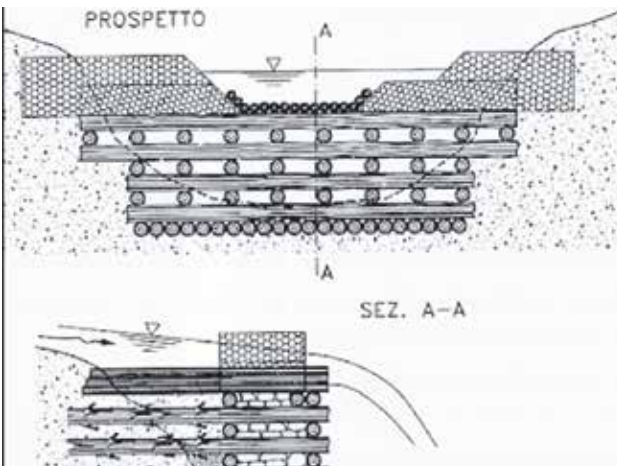


Fig. 27 - Barrage avec les ailes réalisées en gabions métalliques.

➔ Variantes de platelages

La cuvette des barrages ainsi que les remontées d'ailes doivent être revêtues d'un platelage bois, afin d'éviter une infiltration massive des eaux de percolation susceptibles de générer des phénomènes de lessivage du corps de l'ouvrage.

Le platelage est généralement constitué par un assemblage de rondins de bois de sections constantes fixés sur la cuvette et les ailes par des vis ou tire-fond (fig. 33 et 34).

On rencontre également parfois des platelages constitués de rondins refendus sur la longueur et positionnés en quinconce ou non (fig. 30, 31 et 32).



Fig. 28 - Barrage dont les ailes sont réalisées avec des longrines inclinées à 45° (Sestrières - Piémont - Italie).



Fig. 29 - Barrage dont les ailes sont réalisées avec deux simples rondins de bois.



Fig. 30 - Barrage avec platelage en bois refendus sur la longueur.

Attention : les bois sciés sur la longueur se dégradent beaucoup plus rapidement que les bois refendus.

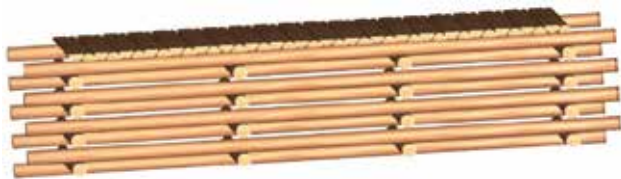


Fig. 31 - Platelage avec rondins refendus sur la longueur et disposés en quinconce.



Fig. 32 - Platelage avec rondins refendus sur la longueur et disposés dans le même sens.



Fig. 33 - Platelage avec rondins entiers disposés côte à côte.

➔ Remplissage de l'ouvrage

Le remplissage du caisson par des matériaux dans l'espace constitué entre les deux parois est guidé par la disponibilité des matériaux sur place plus que par leur qualité.

Le risque de vidange des ouvrages est important lorsque les phénomènes d'affouillement de pied ou dans le corps de l'ouvrage ne sont pas traités (fig. 35).

Pour éviter les phénomènes de vidange des ouvrages, le traitement du parement aval doit être soigné tel que présenté précédemment et complété par un dispositif contre l'affouillement.

Ce dispositif peut être constitué par une fosse de dissipation d'énergie en enrochements (fig. 36). Le dimensionnement de la fosse de dissipation peut être effectué à partir des travaux d'Irstea (étude n° 18). En présence de sols fins, il est recommandé de poser les enrochements sur un géotextile ou sur une couche-filtre.

Cette fosse peut être complétée ou substituée par un platelage en rondins disposés en pied d'ouvrage au niveau de la chute d'eau. Cette disposition doit cependant être employée avec précautions dans des cours d'eau avec du transport solide où la durabilité des bois risque d'être réduite.



Fig. 34 - Barrage avec platelage en rondins entiers (haute vallée de Suze - Piémont - Italie).



Fig. 35 - Vidange d'un caisson à doubles parois suite à un important affouillement.



Fig. 36 - Création d'une fosse de dissipation de l'énergie hydraulique en pied d'un caisson bois.

➔ Les assemblages

Afin de garantir une cohésion globale de la structure interne des ouvrages, il est nécessaire d'assurer d'une part une continuité efficace entre deux longrines successives, et d'autre part une liaison entre ces dernières et les traverses.

Les assemblages doivent être réalisés avec soin car ils sont généralement à l'origine des désordres constatés dans les structures. Ils constituent l'un des points de faiblesse de l'ouvrage.

Dans ce cas, trois techniques sont utilisées pour assurer la continuité mécanique de l'élément.

La première technique consiste à abouter deux longrines se trouvant sur un axe commun et de les liasonner à la traverse par une broche métallique de type acier à béton HA. La coupe de jonction entre les deux pièces de bois peut être réalisée soit en « sifflet » (fig. 38a), soit à « mi-bois » (fig. 37 et 38c).

Toutes deux offrent les mêmes garanties d'un point de vue mécanique, mais il est préférable d'utiliser la méthode de la coupe en « sifflet » pour les assemblages se trouvant dans des conditions de dégradation biologique élevées, car cette technique limite les zones de stagnation d'eau.

Une autre méthode consiste à assurer la continuité mécanique des longrines en les juxtaposant côte à côte sur une traverse et en les liasonnant respectivement, comme dans les cas précédents, par des broches métalliques. Cette technique (fig. 38b) présente l'avantage de renforcer la structure de l'ouvrage au niveau de l'assemblage, mais présente l'inconvénient de créer un décalage parfois en mauvaise adéquation avec le profil que l'on souhaite donner à la structure.



Fig. 37 - Assemblage de deux longrines par une coupe à mi-bois.

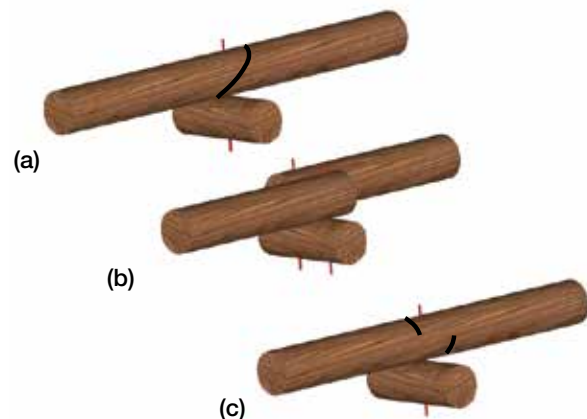


Fig. 38 - Représentation des différents modes d'assemblage de longrines couramment utilisés.

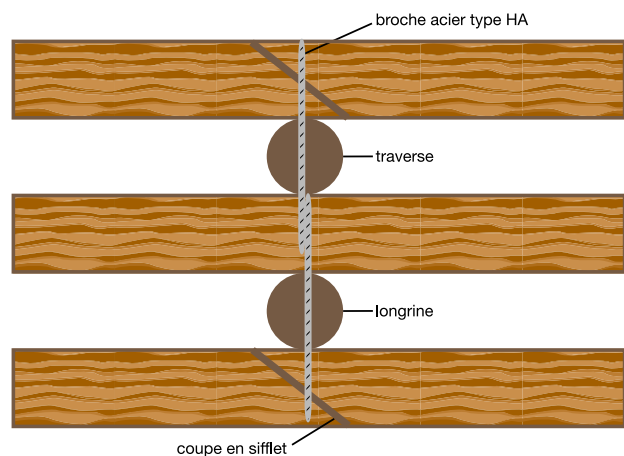


Fig. 39 - Détail d'un assemblage longrine-traverse par broche en acier.

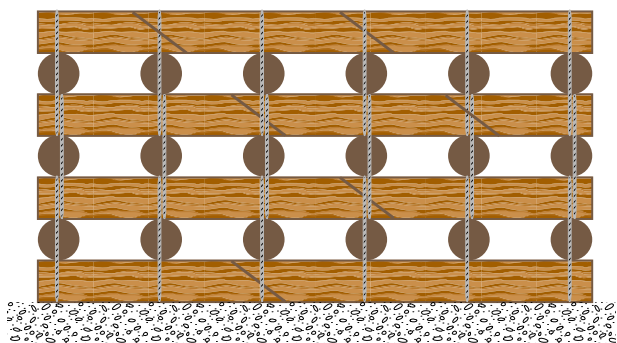


Fig. 40 - Représentation du montage idéal à adopter au niveau des assemblages.

Remarque

La technique (mi-bois) présentée (fig. 37) est simple et rapide, mais les découpes horizontales favorisent la stagnation de l'eau et donc l'apparition de champignons. D'autre part, l'assemblage présenté devrait être réalisé sur le même axe que les traverses.

Quel que soit le choix du type d'assemblage retenu, il est nécessaire de réaliser la liaison entre deux longrines au niveau d'une traverse par des broches métalliques d'un diamètre défini par l'étude de dimensionnement.

Ces broches doivent impérativement travailler en double cisaillement (fig. 39), ce qui confère à l'assemblage une



Fig. 41 - Assemblage par broche métallique en cours de dégradation par pourrissement du bois.

meilleure résistance mécanique conformément aux dispositions énoncées dans l'*Eurocode 5*.

Des ouvrages présentant des assemblages avec des « clameaux » peuvent également être rencontrés, notamment pour rabouter des longrines. Cette technique largement utilisée en Italie reste néanmoins peu conseillée et difficilement modélisable en dimensionnement mécanique.

L'utilisation des clameaux doit être réservée à l'ajustement des bois au montage. Ils seront retirés ensuite.

Montage type

Le montage type (fig. 40) permet d'optimiser la prévention des désordres susceptibles de nuire à la tenue de l'ouvrage.

D'autre part, il est recommandé de positionner les traverses au niveau de la jonction entre deux longrines afin de faire travailler les tiges en double cisaillement. La cote de pince, c'est-à-dire la distance minimale entre le bout de la traverse et l'axe de la broche doit être respectée pour éviter l'effet de fendage (fig. 41).

Exemple d'assemblage à proscrire

La disposition figurant ci-dessous (fig. 42) présente l'avantage d'être simple et rapide à mettre en œuvre ; mais elle concentre les points de faiblesses sur un même axe. D'autre part, l'eau s'écoule difficilement au niveau de l'assemblage, ce qui favorise localement la rétention d'humidité et par conséquent le développement de champignons responsables de la dégradation du bois.



Fig. 42 - Montage des assemblages à proscrire.

5.2.1.3. Avantages et inconvénients

Tab. 9 - Avantages et inconvénients des barrages à doubles parois.

Barrages à doubles parois	
Avantages	Inconvénients
Ouvrage résistant à de fortes sollicitations (ex. : crue avec charriage et laves torrentielles)	Très consommateur en bois et en main-d'œuvre
Limitation des mouvements de terre puisque les matériaux de déblais peuvent être réutilisés en remblais	Mauvaise résistance à l'affouillement et au lessivage
Grâce aux ailes, stabilisation des berges et recentrage des écoulements	Mise en œuvre nécessairement mécanisée
Un retour d'expériences déjà important sur ce type de réalisation (et outils de dimensionnement)	Inadapté dans les rivières peuplées d'une faune piscicole migratrice (sans passe à poissons) au vu de la hauteur de l'ouvrage
Hauteur de chute permettant une oxygénation efficace du cours d'eau	

5.2.1.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 10 - Pré-dimensionnement des barrages à doubles parois.

Barrages à doubles parois	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (au niveau de la cuvette)	$2 \text{ m} \leq H \leq 5 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans les berges	$P \geq 1 \text{ m}$
Largeur de la base de l'ouvrage	$b \geq H/2$
Diamètre des longrines (généralement adapté à la disponibilité des bois locaux)	$\emptyset \text{ min} = 15 \text{ cm}$
Diamètre des traverses (généralement adapté à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	$\emptyset \text{ min} = 15 \text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (acier à béton HA) pour assemblage des rondins	$\emptyset = 12 \text{ mm}$

5.2.2. Barrages à simple paroi

Ces ouvrages, tels que représentés (fig. 43 et 44), sont constitués de grumes entières empilées et disposées perpendiculairement au sens d'écoulement des eaux. Elles sont ancrées dans les berges du cours d'eau.

Le parement ainsi obtenu constitue le corps de l'ouvrage qui peut être doté ou non d'ailes.

Ce type d'ouvrage est couramment employé dans les Alpes suisses, mais également en Haute-Savoie, sous le nom de « radier », dans des cours d'eau à régime torrentiel.

Les barrages sont généralement associés à un dispositif anti-affouillement constitué d'un platelage en rondins de bois au niveau de la chute d'eau.

5.2.2.1. Champ d'application

Le choix d'installer ce type d'ouvrage est généralement guidé par la disponibilité et la longueur des bois à proximité du site de construction.

Ce type d'ouvrage est généralement rencontré dans des ravines profondes et encaissées dont les berges du torrent ne sont pas trop éloignées, c'est-à-dire n'excédant pas une quinzaine de mètres en sommet d'ouvrage.

Il est également utilisé pour concourir au franchissement d'un cours d'eau par une piste (« radier » en Haute-Savoie). Dans ce cas, l'ouvrage est équipé au niveau de la cuvette d'un platelage en rondins de bois destiné à guider les eaux et améliorer le franchissement par les véhicules.

Remarques

La majorité des ouvrages rencontrés ont été réalisés à partir d'essences résineuses de type sapin ou épicéa (classé 2 ou 3) dans un environnement favorisant la dégradation biologique du bois.

Dans de telles conditions, le remplacement des ouvrages est à prévoir à moyenne échéance suivant les conditions (durée de vie moyenne 10 à 15 ans maximum).



Fig. 43 - Barrage à simple paroi avec dispositif anti-affouillement.

5.2.2.2. Mode opératoire

Les pièces de bois sont choisies puis prélevées sur place. Leur diamètre souvent élevé, leur rectitude ainsi que leur longueur sont les principaux critères à prendre en considération au moment du choix des arbres. Les grumes ainsi sélectionnées sont empilées les unes sur les autres avec un fruit (rapport H/V avec H : l'horizontale et V : la verticale de l'ouvrage) de 0.1 à 0.2, puis ancrées dans les berges du torrent sur une longueur minimum de 2 m.

Des traverses, appelées tirants (élément de structure travaillant en traction destiné à ancrer l'ouvrage dans le terrain naturel), sont régulièrement intercalées dans le parement de l'ouvrage. De longueur variable, elles sont destinées à renforcer la stabilité externe de l'ouvrage. Elles sont liaisonnées au corps de l'ouvrage à une extrémité, alors que l'autre extrémité laissée libre est positionnée en limite du terrassement (fig. 45).

Des ouvrages dont les tirants sont parallèles au sens d'écoulement des eaux (Haute-Savoie) ou encore des ouvrages dont les tirants sont dirigés vers les berges (Suisse, Val de Suse) peuvent parfois être rencontrés. Ils forment ainsi un angle avec le fil d'eau se situant entre 10 et 45°.

L'atterrissement de l'ouvrage par du remblai, généralement issu des terrassements, se fait au fur et à mesure du montage de la structure.

Les liaisons entre les grumes sont assurées par des tiges d'acier d'un diamètre minimum de 16 mm suivant le principe du double cisaillement comme exposé plus haut. Ces assemblages peuvent également être renforcés par un câblage dans les zones les plus sollicitées.



Fig. 44 - Succession de barrages à simple paroi (Suisse).



Fig. 45 - Montage d'un barrage à simple paroi avec tirants d'ancrage.

5.2.2.3. Avantages et inconvénients

Tab. 11 - Avantages et inconvénients des barrages à simple paroi.

Barrages à simple paroi	
Avantages	Inconvénients
Ouvrage résistant à de fortes sollicitations (ex. : crue avec charriage et laves torrentielles)	Utilisation de grumes de grosses sections et de grandes longueurs
Limitation des mouvements de terre puisque les terrassements sont limités	L'ouvrage doit être équipé d'un dispositif anti-affouillement en raison de la hauteur de chute importante
Valorisation de bois locaux de grosses sections dans des zones difficiles à exploiter ou commercialement inexploitable	Mise en œuvre nécessairement mécanisée
Faible déstabilisation des terrains en place lors de la mise en œuvre	Inadapté dans les rivières peuplées d'une faune piscicole migratrice
Terrassement limité	Peu de retour d'expériences sur ce type de réalisation car son utilisation est marginale Modélisation délicate de la structure en vue de réaliser son dimensionnement mécanique

5.2.2.4. Critères de pré-dimensionnement

Tab. 12 - Pré-dimensionnement des barrages à simple paroi.

Barrage à simple paroi	
Critères de pré-dimensionnement	
Hauteur de l'ouvrage (au niveau de la cuvette)	$2 \text{ m} \leq H \leq 5 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans les berges	$P \geq 2 \text{ m}$
Diamètre des grumes transversales	$\varnothing \text{ min} = 25 \text{ cm}$
Diamètre des tirants	$\varnothing \text{ min} = 25 \text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour réaliser les assemblages	$\varnothing = 16 \text{ mm}$

6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles

6.1. Analyse contextuelle et présentation des objectifs

L'utilisation du génie végétal, outre ses facultés de lutte contre l'érosion, permet un bon retour des espèces indigènes et un bon taux de recouvrement de la végétation en comparaison avec des berges artificialisées. Le choix du génie végétal par les acteurs locaux est souvent justifié par une meilleure intégration écologique et paysagère. Comparativement au génie civil, il octroie aux écosystèmes une capacité de retour plus importante vers des systèmes sub-naturels et diversifiés. L'utilisation de ce type de technique permet par ailleurs de conserver une continuité dans les corridors biologiques, ce qui n'est pas le cas avec des techniques de génie civil de type enrochement. Le génie végétal est également préconisé pour une meilleure création de caches, de sous-berges et de systèmes racinaires favorables à la faune piscicole.

Cependant, ces arguments ont jusque-là été très peu étudiés et aucune étude n'a essayé de mettre en évidence une corrélation entre les types de matériaux utilisés pour ces ouvrages et les conditions d'accueil de la biodiversité.

L'étude présentée ci-dessous a été réalisée dans le cadre du projet Géni'Alp. Son objectif est de fournir aux gestionnaires de cours d'eau des outils pour prendre en compte les aspects liés à la biodiversité dans leurs choix techniques. Il est important d'apporter des éléments de connaissance sur les tendances en termes de biodiversité, susceptibles d'être obtenus en fonction du type d'ouvrage construit. Il s'agit d'avoir des informations quantitatives sur la capacité d'un ouvrage de protection de berge à s'intégrer à son environnement naturel. Ce type d'informations pourra être utile aux aménageurs qui pourront ainsi mieux appréhender les impacts à court et long terme de leurs ouvrages de protection de berge de cours d'eau.

Sont ici étudiées les diversités taxonomiques de la végétation, de la macrofaune benthique et de l'entomofaune, ces différents groupes de taxons étant des marqueurs importants de la qualité des écosystèmes. Sont ainsi successivement comparées :

- les diversités végétales de chacune des différentes techniques (génie civil, mixtes et végétales) et les berges naturelles ;

- la diversité et la fréquence des espèces exotiques envahissantes sur chacune des différentes techniques (végétales, mixtes et génie civil) et les berges naturelles ;
- les diversités de la macrofaune benthique de chacune des différentes techniques (végétales, mixtes et génie civil) et des berges naturelles ;
- les diversités en genre de coléoptères des enrochements, enrochements de pied de berge et fascines.

6.2. Analyse de la diversité végétale

6.2.1. Méthodologie

6.2.1.1. Présentation des sites d'étude

L'échantillonnage réalisé lors de cette étude a permis d'identifier 317 espèces végétales sur 32 berges aménagées et 8 berges naturelles. La campagne de terrain fut réalisée en 2011. L'aire de répartition géographique de l'étude comprend la région Rhône-Alpes et la Suisse occidentale. Différentes techniques d'aménagement de berge ont été sélectionnées :

- berges purement minérales : ouvrages en enrochement (8 ouvrages) ;
- berges végétalisées avec enrochement de pied de berge : ouvrages mixtes associant techniques minérales et végétales (8 ouvrages) ;
- berges aménagées avec caissons végétalisés à doubles parois : ouvrage mixtes (8 ouvrages) ;
- berges entièrement végétalisées : ouvrages constitués de fascines de saule en pied de berge avec bouturage (8 ouvrages – fig. 1) ;
- berges sub-naturelles : non aménagées (saulaies basses – 8 berges).

Recueil d'expériences techniques - 6. Analyse comparative des diversités animales et végétales de différents types de berges aménagées et naturelles

L'objectif était de travailler sur des ouvrages situés en montagne et en altitude. Toutefois, en raison du faible nombre de réalisations d'ouvrages de génie végétal en altitude, les travaux ont porté sur des ouvrages situés à l'étage collinéen. L'altitude est un paramètre influant sur la composition des communautés végétales et animales. Aussi, de façon à pouvoir comparer les aménagements, les ouvrages ont été sélectionnés avec des altitudes proches, comprises entre 250 et 500 m ; altitude à laquelle se situe la majorité des travaux de chenalisation et donc d'aménagements contre l'érosion.



Fig. 1 - Fascine de saules à Villard-Bonnot sur le Vorz (Isère - France).

L'âge des ouvrages apparaît également comme un critère important et structurant de la biodiversité. Les ouvrages récents présentent seulement les espèces végétales semées ou plantées, contrairement aux ouvrages plus anciens où d'autres espèces sont venues coloniser le milieu. Les sites sélectionnés concernent des ouvrages dont l'achèvement des travaux a eu lieu entre 2003 et 2008.

La longueur minimale des aménagements a été fixée à 25 mètres linéaires afin de pouvoir effectuer des relevés de biodiversité sur des longueurs suffisantes et comparables.

6.2.1.2. Relevés floristiques

Chaque site a fait l'objet de relevés floristiques. La méthode d'analyse de la végétation est celle des points de contact. Cette méthode permet de prendre en compte la structuration verticale de la végétation (strates herbacée, arbustive et arborée). Les mesures ont été réalisées grâce à une tige de 2 m de long et 1 cm de diamètre. Elles ont été effectuées tous les 75 cm le long de trois transects de 22,5 m de long, tracés parallèlement à la rive et répartis de manière équidistante sur la largeur de l'aménagement (fig. 2). Cela représente quatre-vingt-dix mesures de végétation par site.

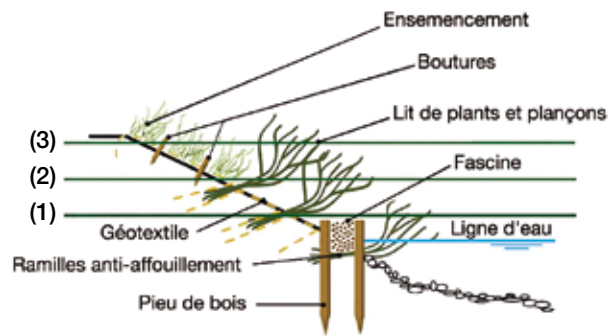


Fig. 2 - Coupe schématique d'une berge aménagée en fascines de saules, lits de plants et plançons et bouturage. Représentation des trois transects de prélèvement : (1) : transect inférieur ; (2) : transect médian ; (3) : transect supérieur (Cavallé *et al.* 2010).

Le positionnement de ces trois transects (en bas, au milieu et en haut de berge) permet de prendre en compte la variabilité du cortège floristique sur toute la hauteur de la berge. En effet, la végétation des berges de cours d'eau est stratifiée, notamment en fonction de l'hygrométrie du sol et de la durée d'immersion plus importante en pied de berge qu'en haut de berge.

6.2.2. Analyse de la diversité végétale ; résultats et discussions

6.2.2.1. Biodiversité : génie civil et génie végétal

Les résultats suivants traduisent les différences qui existent entre les aménagements issus du génie végétal (toutes techniques confondues) et ceux issus du génie civil (enrochements) en terme de diversité taxonomique (fig. 3). On présente ici les moyennes obtenues pour les techniques issues du génie végétal (fascines de pied de berges avec boutures, caissons végétalisés, berges végétalisées avec enrochement de pied de berge) et celles obtenues pour les berges en enrochement.

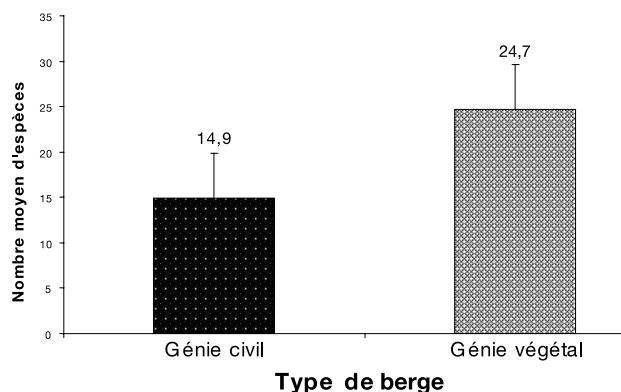


Fig. 3 - Histogramme des nombres moyens d'espèces végétales par rapport au type d'aménagement.

On constate une différence significative, de l'ordre d'un facteur 2, en faveur des aménagements issus du génie végétal. Ceux-ci accueillent en moyenne 29,1 espèces végétales alors que les aménagements issus du génie civil n'accueillent eux que 16,4 espèces végétales.

La nature du substrat des aménagements issus du génie civil (enrochements), peu propice à la colonisation végétale par manque de sol, explique cette différence.

6.2.2.2. Analyse comparative de la diversité floristique entre les différentes techniques d'aménagement et les berges naturelles

L'analyse comparative, réalisée entre l'ensemble des types de berges échantillonnés, est présentée sous forme d'un histogramme (fig. 4). Cette figure compare les nombres d'espèces végétales entre les différentes techniques d'aménagement (fascines de pied de berge avec boutures, caissons végétalisés, berges végétalisées avec enrochement de pied de berge et enrochement pur) et les berges naturelles. Les berges naturelles échantillonnées dans ce travail sont toutes des saulaies pionnières basses.

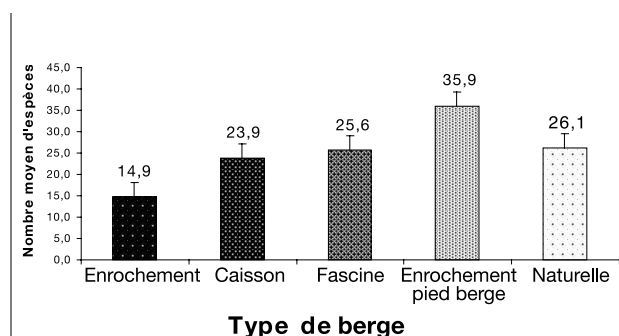


Fig. 4 - Nombre moyen d'espèces végétales par rapport à la technique d'aménagement de berge.

Des différences significatives apparaissent entre les berges en enrochement pur (14,9 espèces en moyenne) et le reste des techniques d'aménagement qui montrent un nombre d'espèces significativement plus élevé. Les ouvrages issus du génie végétal pur (fascine de saules et caisson végétalisé) ont un nombre d'espèces végétales équivalent (respectivement 25,6 et 23,9) et comparable avec celui des berges naturelles (26,1 espèces). Parmi les berges échantillonnées, la technique qui supporte le plus d'espèces végétales est l'enrochement de pied de berge avec haut de berge végétalisé, avec 35,9 espèces végétales en moyenne. Cette diversité légèrement supérieure s'explique par la présence en pied de berge d'un enrochement constituant une ouverture du milieu. Cette ouverture favorise la colonisation par de nouvelles espèces (rudérales, héliophytes, etc.) en plus de celles plantées ou semées.

Le protocole utilisé permet une analyse plus fine des différences de végétation en fonction de la hauteur de berge, la végétation étant structurée par le gradient hygrométrique et la fréquence d'inondation croissants vers le bas. Les

résultats sont présentés sous forme d'un histogramme comprenant les trois transects et les types de berges échantillonnées (fig. 5).

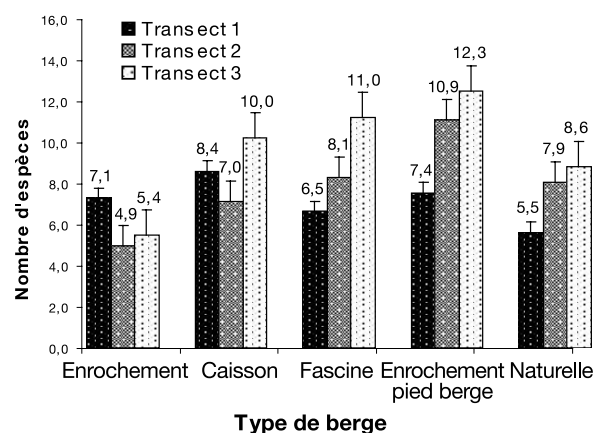


Fig. 5 - Nombre moyen d'espèces végétales présentes sur l'aménagement relatif à leur position sur la berge. Le transect 1 représente le pied de berge, le 2 la partie médiane et le transect 3 le haut de berge.

En ce qui concerne les berges aménagées, c'est pour les fascines que le nombre moyen d'espèces végétales est le plus faible en pied de berge. Cela s'explique par un taux de reprise élevé des fascines de saule installées en pied de berge couplé à des vitesses de croissance élevées. La constitution d'un couvert arbustif dense a pour conséquence d'homogénéiser les habitats représentés et de limiter la capacité d'accueil de nouvelles espèces végétales dans les strates inférieures. Pour les berges aménagées en enrochement et en enrochement de pied de berge avec un haut de berge végétalisé, la présence de zones pionnières en pied de berge limite le recouvrement des espèces arbustives. Les enrochements, situés à l'interface entre le milieu aquatique et les premières boutures, forment une ouverture qui constitue un second front de développement pour les espèces pionnières, colonisatrices néophytes et les héliophytes (Evette et Cavallé 2011). La situation est comparable pour les caissons végétalisés qui sont généralement appuyés sur une base en enrochement ou en gabion (fig. 6). Cet enrochement de pied de berge au contact de l'eau constitue un nouvel habitat, différent de celui offert par la partie supérieure de la berge où les ligneux (majoritairement les saules) occupent une place prépondérante.



Fig. 6 - Caisson végétalisé à Allinges sur le Pamphiot (Haute-Savoie - France).

On observe sur les ouvrages de type caisson végétalisé et ceux comprenant des enrochements de pied de berge : 1°) des espèces inféodées aux milieux humides comme, *Juncus acutiflorus*, *Carex pseudocyperus*, *Phragmites australis* ou *Humulus lupulus* ; 2°) des espèces prairiales comme *Holcus mollis* ; 3°) des espèces de lisière ou de sous-bois comme *Ligustrum vulgare*, *Hedera helix*, *Lonicera xylosteum* ou *Crataegus monogyna* ; 4°) des espèces rudérales *Urtica dioica*, *Rubus sp.*, *Tussilago farfara* ; et même 5°) des ligneux des zones alluviales comme *Populus nigra* et *Populus alba*, espèces qui ne sont pas présentes sur les ouvrages purement végétaux en raison de la prédominance des saules.

Par ailleurs, sur les ouvrages mixtes avec enrochement de pied, la présence en haut de berge de ligneux à feuilles caduques permet la création d'une litière entre les enrochements et favorise la colonisation végétale par rapport aux berges constituées uniquement d'enrochements, où la création d'un substrat colonisable par les végétaux supérieur est beaucoup plus lente.

Enfin, les épisodes de sédimentation ont pour conséquence de combler les interstices entre les blocs et ainsi permettre la création d'un substrat limoneux propice à la colonisation par les espèces héliophytes.

6.2.2.3. Analyse comparative de la diversité floristique entre les techniques issues du génie végétal et les berges naturelles.

Les résultats présentés ci-après retranscrivent le nombre moyen d'espèces végétales rencontré sur les aménagements issus du génie végétal et celui des berges naturelles (fig. 7). On observe un différentiel faible et non significatif entre ces deux moyennes, 24,7 espèces en moyenne pour les berges issues du génie végétal et 26,1 pour les berges naturelles.

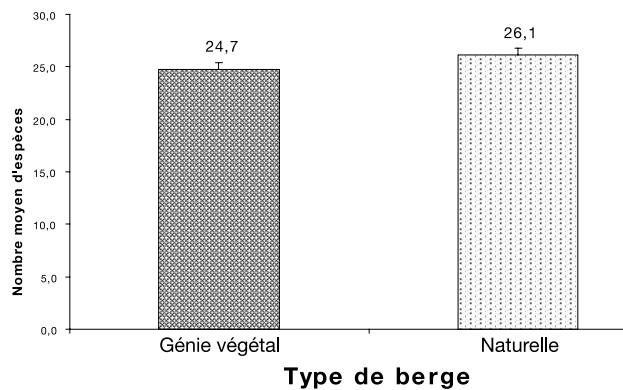


Fig. 7 - Histogramme du nombre moyen d'espèces végétales relativement au type de berge.

Ces résultats témoignent de la capacité des techniques de génie végétal et plus particulièrement des végétaux utilisés à s'implanter et à se développer facilitant également le recrutement de nouvelles espèces. Ce recrutement est essentiel pour l'aménagement, car il participe à son évolution et à sa complexification pour retrouver une composante dynamique propre aux écosystèmes naturels.

La faiblesse relative de la diversité végétale des berges naturelles observée ici s'explique par le type de berges échantillonnées. En effet, afin de se placer dans un contexte proche de celui du génie végétal, nous avons fait le choix de travailler sur des berges naturelles constituées de saulaies jeunes. Ces saulaies sont à un stade juvénile, et présentent donc une biodiversité relativement faible.

6.3. Les espèces exotiques envahissantes

6.3.1. Les berges de cours d'eau sont fortement colonisées par les espèces exotiques envahissantes

Outre les espèces inféodées aux milieux rivulaires, les berges de cours d'eau accueillent également les espèces opportunistes qui s'y installent et prolifèrent rapidement. L'augmentation de la fréquence des échanges anthropiques internationaux a permis le transport fortuit ou volontaire de nombreuses espèces à travers le monde. Certaines ont réussi à s'implanter dans ces nouveaux territoires, à s'y établir puis à proliférer, en provoquant des nuisances écologiques, économiques et sur la santé. Ces espèces sont appelées espèces exotiques envahissantes. Les scientifiques s'accordent actuellement à classer les invasions biologiques comme une des menaces majeures en terme d'érosion de la biodiversité locale (Thuiller 2007). Certains écosystèmes sont plus sensibles que d'autres à

l'invasion. C'est le cas des milieux perturbés comme les milieux rivulaires. Les berges de cours d'eau, en raison des dynamiques sédimentaires et des travaux d'endiguement, sont ainsi particulièrement affectées par les invasions biologiques. De plus, le cours d'eau fonctionne comme un vecteur de propagation, entraînant des semences et des fragments de rhizomes, multipliant ainsi les foyers d'invasion.

6.3.2. Résultats et discussion

Sur les ouvrages de génie végétal, si des espèces exotiques envahissantes sont parfois présentes, aucune n'apparaît parmi les dix espèces les plus abondantes où l'on trouve principalement les saules et quelques graminées. Par contre, parmi les dix espèces les plus abondantes sur les enrochements, trois sont considérées comme exotiques envahissantes au moins potentiellement en France et en Suisse : *Buddleja davidii*, *Robinia pseudoacacia* et *Parthenocissus inserta*.



Fig. 8 - Enrochement colonisé par la renouée du Japon (*Reynoutria japonica*) à St-Geoire-en-Valdaine sur l'Ainan (Isère - France).

Le nombre d'espèces exotiques envahissantes recensées sur les différents types d'aménagements ne varie que très faiblement. On trouve entre 1,8 et 2,2 espèces exotiques envahissantes présentes en moyenne sur chaque type de berge aménagée. En revanche, il existe une différence significative entre les fréquences des espèces exotiques envahissantes (fig. 9). On constate ainsi que cette fréquence de rencontre est largement supérieure pour les aménagements issus du génie civil (42,5) que pour les aménagements issus du génie végétal (10) ainsi que pour les aménagement en enrochement de pied de berge et haut de berge végétalisé (11,3). La fréquence des espèces exotiques envahissantes sur les berges naturelles est sensiblement plus élevée (21,9). Ces résultats témoignent du fort potentiel invasif (capacité d'une espèce à dominer les communautés végétales du milieu) des plantes exotiques considérées. Ils rendent également compte de l'efficacité des techniques de génie végétal à permettre la colonisation rapide du milieu par les végétaux plantés.

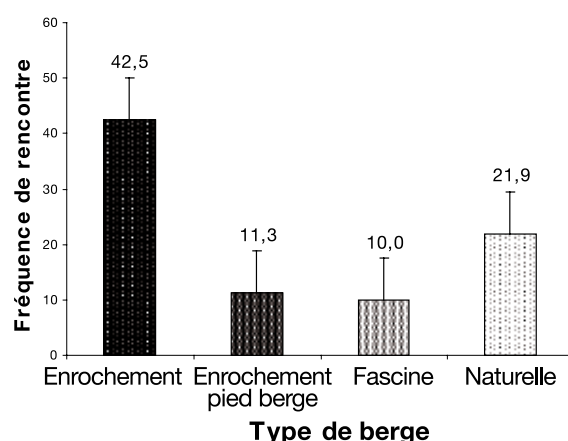


Fig. 9 - Histogramme des fréquences moyennes d'espèces exotiques envahissantes par rapport au type d'aménagement.

La présence d'espèces végétales exotiques envahissantes est souvent reliée à l'intensité des activités humaines. Les ouvrages étudiés ayant tous nécessité la réalisation de travaux, on peut supposer qu'ils ont tous été soumis à des expositions aux propagules (graines, rhizomes, boutures, etc.) équivalentes, ce qui expliquerait que tous les types d'ouvrages hébergent un nombre moyen de plantes exotiques envahissantes équivalent. En revanche, cette étude montre que les espèces exotiques envahissantes sont plus fréquentes sur les ouvrages du génie civil (enrochements) que sur les autres types d'ouvrage. Ce résultat peut s'expliquer par deux mécanismes. Les plantes exotiques envahissantes recensées sont caractérisées par une forte croissance qui leur donne un avantage compétitif dans les milieux pionniers. Les plantes exotiques envahissantes observées sur les ouvrages issus du génie végétal (dénué initialement de toute végétation) ont ainsi trouvé un terrain propice pour exprimer leur potentiel invasif. Il est également démontré que l'abondance relative de ces plantes peut être expliquée par les interactions biotiques, notamment par les interactions de compétition. La présence d'espèces compétitrices sur les ouvrages de génie végétal – telles que les espèces du genre *Salix* dont la dynamique de croissance est forte – limite la vigueur et la propagation des espèces exotiques envahissantes présentes. Dans le cas des berges aménagées par des techniques de génie végétal, il apparaît que la forte densité de boutures de saules limite le développement des espèces exotiques envahissantes.

6.4. Analyse de la diversité de la macrofaune benthique

6.4.1. Méthodologie

6.4.1.1. Présentation des sites d'étude

La campagne d'hydrobiologie s'est déroulée au cours du mois d'octobre 2011 et a concerné 40 berges aménagées. Chacune d'entre elles a fait l'objet de prélèvements de macro-invertébrés benthiques. Comme pour la végétation, ces 40 échantillons sont répartis sur 5 types de berges : les enrochements, les enrochements de pied de berge, les caissons et les fascines. Les berges naturelles constituent le cinquième type de berge étudié et sert de référence. Les stations concernées sont également localisées en zone piémontaise de l'Arc alpin plus précisément en région Rhône-Alpes et en Suisse occidentale.

6.4.1.2. Relevés des macro-invertébrés benthiques

Le protocole d'échantillonnage s'attache à décrire les différents habitats présents et les prélèvements sont réalisés uniquement dans la partie supérieure immergée de la berge. Les prélèvements ont été réalisés avec un surber de 1/20 de m² et de vide de maille de 500 µm.

6.4.2. Résultats et discussions

Les résultats présents dans la figure 10 traduisent des différences en termes de nombres de taxons sur les différents types d'aménagements.

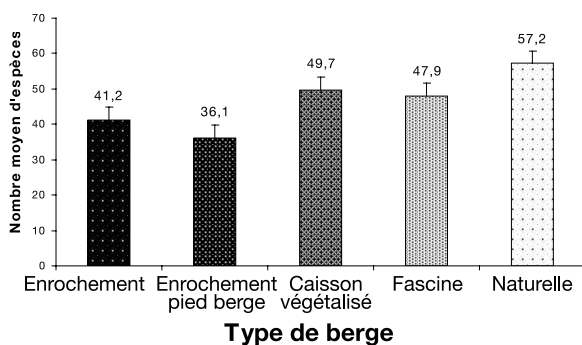


Fig. 10 - Nombre moyen de taxons relativement au type de berge échantillonnée.

En premier lieu, on note que les aménagements avec les diversités taxonomiques les plus faibles sont les enrochements et enrochements de pied de berge. Ce résultat peut s'expliquer par l'utilisation de structures purement minérales à l'interface entre le milieu aérien et aquatique. En effet, les blocs utilisés, de par leurs dimensions et leur nature minérale, n'offrent que peu de caches, aspé-

rités ou éléments nutritifs indispensables à l'implantation des populations de macro-invertébrés benthiques. On constate ici des différences significatives entre les enrochements (36,1 taxons en moyenne) et les aménagements en technique de génie végétal (47,9 pour les fascines et 49,7 pour les caissons). Ceci tend à confirmer que les matériaux utilisés pour l'aménagement des berges influencent de manière significative la qualité des habitats rivulaires et par conséquent les populations de macro-invertébrés. Ici, ce sont les végétaux utilisés (saules, bois mort, etc.) et leur développement racinaire qui influencent de manière positive le nombre moyen de taxons. Le nombre de taxons est le plus élevé sur les berges naturelles avec 57,2 taxons en moyenne. Ce résultat, bien que faiblement significatif, témoigne de l'impact des travaux d'aménagement sur les communautés benthiques. Les perturbations anthropiques fortes sont, d'une manière générale, dommageables pour les communautés benthiques en zone rivulaire.

6.5. Analyse de la diversité entomologique

6.5.1. Méthodologie

6.5.1.1. Présentation des sites d'étude

Le travail d'analyse de l'entomofaune s'est déroulé sur l'année 2009 et a concerné 15 aménagements de berges localisés en Rhône-Alpes. Les différentes techniques sélectionnées sont :

- berges purement minérales : ouvrages en enrochement (5 ouvrages) ;
- berges végétalisées avec enrochement de pied de berge et haut de berge végétalisé : ouvrages mixtes associant techniques minérales et végétales (5 ouvrages) ;
- berges entièrement végétalisées : ouvrages constitués de fascines de saule en pied de berge avec bouturage (5 ouvrages).

6.5.1.2. Relevés entomologiques

L'analyse s'est focalisée sur un ordre d'insecte : les coléoptères. La pertinence du choix des coléoptères en tant que bio-indicateur de la diversité floristique, de l'intégrité des processus hydromorphologiques et des habitats rivulaires a été maintes fois démontrée (Boscaini *et al.* 2000). La diversité taxonomique des coléoptères constitue un bon indicateur de la diversité des habitats représentés. L'ordre des coléoptères présente une grande variabilité morphologique qui témoigne d'une variabilité importante

dans les régimes trophiques et fonctionnels (détritvires, phytophages, pollinophages, prédateurs carnivores, pollinisateurs, décomposeurs). Cette grande diversité leur permet d'occuper des milieux très variés, et notamment, pour certains d'entre eux, d'être tolérants aux régimes de perturbation des habitats rivulaires (Van Looy *et al.* 2005).

L'échantillonnage des coléoptères aériens est basé sur un trait comportemental répandu chez les insectes : leur attirance pour le jaune. Beaucoup d'insectes volants, principalement les ordres des hémiptères, coléoptères et hyménoptères, sont attirés par la couleur jaune. L'échantillonnage a donc été réalisé grâce à des pièges type « cuvette jaune » couramment utilisés pour la détection des ravageurs et la protection des cultures (fig. 11). Deux pièges jaunes Flora® (Hébingier 1994) furent installés sur chaque site, sur le transect n° 2 (la partie médiane des berges).



Fig. 11 - Pièges « cuvette jaune » Flora®.

6.5.2. Résultats et discussions

Le nombre moyen de genres de coléoptères aériens circulant sont présentés sur la figure 12. Ils sont répartis en fonction du type d'aménagement. Les aménagements issus des techniques de génie végétal comptent en moyenne 12,3 genres de coléoptères différents, 7,2 pour les aménagements en enrochement de pied de berge et seulement 3 pour ceux issus des techniques d'enrochement.

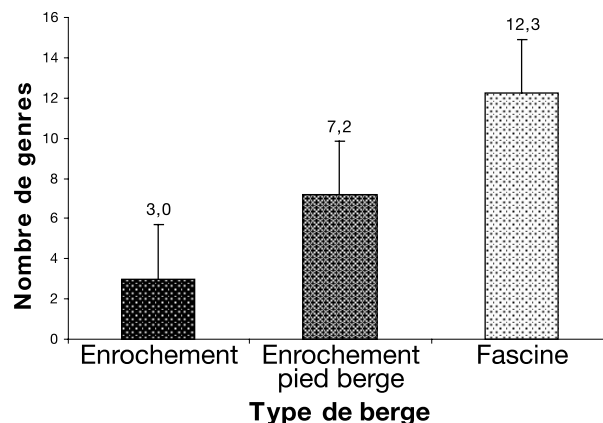


Fig. 12 - Histogramme du nombre moyen de genres de coléoptères sur chaque type d'aménagement (Cavaillé *et al.* 2010).

D'une manière générale, les populations de coléoptères et notamment les populations de carabes, sont sensibles à la structure de la végétation et à l'hétérogénéité des habitats.

En milieu rivulaire, les niveaux élevés de diversité spécifique constatés sont essentiellement expliqués par une diversité importante des habitats représentés (Tews *et al.* 2004). Cette hétérogénéité est entretenue par les épisodes hydrologiques, notamment les crues, et par leur capacité à renouveler les mosaïques d'habitats. Des travaux témoignent de l'influence de l'intensité de la crue et affirment que les crues de petite et moyenne tailles ont une



Fig. 13 - *Apoderus coryli*.

variabilité spatiale plus importante, créant ainsi plus d'hétérogénéité sur la berge (Helfield *et al.* 2007). En effet, les dégâts provoqués par une crue catastrophique ont pour conséquence de mettre le milieu à nu. Ceux provoqués par une crue de moindre ampleur engendrent une simple destructuration du milieu et ainsi une certaine hétérogénéité des habitats.

Les espèces utilisées dans les différentes techniques de génie végétal jouent un rôle important dans la diversité de l'entomofaune. Ainsi, la fascine de saule couplée au lit de plants et plançons permet la production d'une quantité importante de branches et de ramilles, notamment de saules. Or, le genre *Salix* dans son ensemble

constitue une source importante en nectar et pollen qui a pour avantage d'arriver très tôt dans l'année (février-avril), au moment où ces ressources sont rares et difficiles à obtenir. Cette source de nourriture a pour effet d'attirer de nombreux insectes qui peuvent, à terme, s'installer de manière durable dans les saulaies. Il a par exemple été montré que 5 espèces de saules pouvaient abriter à elles seules 450 espèces d'insectes (Sommerville 1992).

Les saulaies reconstituées dans le cadre des aménagements de berges par des techniques de génie végétal présentent une biomasse élevée, ce qui explique une diversité plus importante en coléoptères observée sur les ouvrages issus du génie végétal par rapport à ceux comportant de l'enrochement.

6.6. Conclusion

Cette étude a pour objectif finalisé de fournir aux gestionnaires des éléments de décision afin que soient pris en compte, dès la phase de projet, des préceptes concrets en termes de biodiversité spécifique potentielle de l'ouvrage futur. On peut avancer quelques recommandations, à l'endroit des gestionnaires, qui sont susceptibles d'impacter localement les ripisylves. Premièrement, il apparaît préférable de végétaliser les berges plutôt que de laisser faire une colonisation spontanée. En effet, cette dernière est lente sur les aménagements en enrochement purs et favorise l'avènement des espèces exotiques envahissantes. De plus, le développement des végétaux permet la création de potentielles caches, habitats et zones d'alimentation indispensables aux organismes affiliés aux milieux rivulaires (terrestres et aquatiques). Il est fortement recommandé de favoriser le développement d'habitats multiples et différenciés. La présence de plusieurs strates de végétation (herbacée, arbustive, arborée) est un bon moyen de diversifier les habitats. Il est également possible de favoriser le recrutement d'espèces héliophytes soit en les implantant au départ (fascines d'hélophyte) soit en

réalisant des pieds de berge appropriés, dont le recouvrement arbustif et arboré serait faible à l'interface immédiate entre le cours d'eau et la berge et qui comporterait des zones de sédimentation propice à la formation d'un substrat colonisable. Les aménagements de type mixte comportant les enrochements en pied de berge sont un exemple de ces zones d'interfaces. L'utilisation de salicacées est également intéressante. Cette famille comprend le genre *Salix* dont les propriétés morpho-mécaniques (réseau racinaire développé, port arbustif, souplesse du bois) et physiologiques (croissance rapide, production importante de nectar et pollen) favorisent et facilitent la lutte contre l'érosion et le retour à un état de naturalité avancé.

Il faut néanmoins garder à l'esprit que toute stabilisation de berge va empêcher toute nouvelle érosion et donc bloquer la dynamique naturelle imposée par les régimes de perturbation. La succession végétale va ainsi se dérouler sans retour au stade pionnier (Deymier *et al.* 1995 ; AFNOR 2005 ; Benoît *et al.* 2008 ; Roman 2009).

Partie III



Guide des espèces

1. **Introduction**
2. **Modèles naturels**
3. **Critères de choix des végétaux**
4. **Description des espèces**
5. **Autres espèces utilisables en génie végétal**
6. **Clé d'identification des saules en période de repos végétatif**

Patrice Prunier, Ludovic Bonin et Pierre-André Frossard

Génie Végétal en rivière de montagne

1. Introduction

La troisième partie de cet ouvrage traite des espèces végétales, de leurs caractères diagnostiques, de leur écologie et de leurs aptitudes biotechniques. La réussite d'un ouvrage de génie végétal est en effet fortement conditionnée par la bonne adaptation des végétaux utilisés aux conditions stationnelles, ainsi qu'à l'adéquation entre leurs particularités morphologiques et les objectifs techniques, biologiques ou paysagers fixés.

L'approvisionnement en matériel végétal est par ailleurs régulièrement réalisé en milieu naturel lors de la phase de repos physiologique, à une période où les organes habituellement utilisés pour la reconnaissance (feuilles, fleurs) sont absents. Parmi les végétaux utilisables, les saules (*Salix spp.*) offrent les potentialités les plus importantes pour le génie végétal. Or, il s'agit d'un des groupes dont la détermination est parmi les plus complexes. À ce jour, il existe d'ailleurs peu d'outils illustrés aidant à leur reconnaissance en phase de repos végétatif. Face à cette lacune et aux potentialités de ce groupe pour le génie végétal, l'élaboration d'un outil à même de faciliter la sélection de ces espèces était une nécessité.

1.1. Présentation de la partie III

La troisième partie de cet ouvrage a pour objectif d'apporter aux professionnels des clés de détermination et de choix des espèces ligneuses et herbacées utilisables dans les ouvrages de génie végétal en rivière de montagne.

Elle présente dans le détail les éléments fondamentaux à prendre en compte et fournit des outils concrets et fonctionnels présentant :

- les groupements végétaux pouvant servir de modèles naturels ;
- les critères à prendre en compte pour choisir les espèces qui seront utilisées dans un ouvrage ;
- 50 espèces (herbacées et ligneuses) utilisables pour la stabilisation des berges montagnardes ;
- une vingtaine d'autres espèces herbacées potentiellement utilisables ;
- une clé illustrée d'identification des saules en période hivernale.

Ce chapitre s'appuie pour une large part sur des données bibliographiques, l'acquisition de données biométriques et les observations des auteurs.

1.2. Territoire concerné

Toutes les espèces décrites dans cette partie sont présentes au sein de la zone de coopération transfrontalière alpine du programme franco-suisse « Interreg IVA » s'étendant des cantons de Berne et du Valais, au nord-est, jusqu'au département de l'Isère, au sud-ouest. Ce territoire, correspondant sensiblement à la zone biogéographique des Alpes du Nord occidentales, est compris dans les régions administratives des cantons de Vaud, de Berne, de Fribourg et du Valais et des départements de la Haute-Savoie, de la Savoie et de l'Isère (fig. 1).

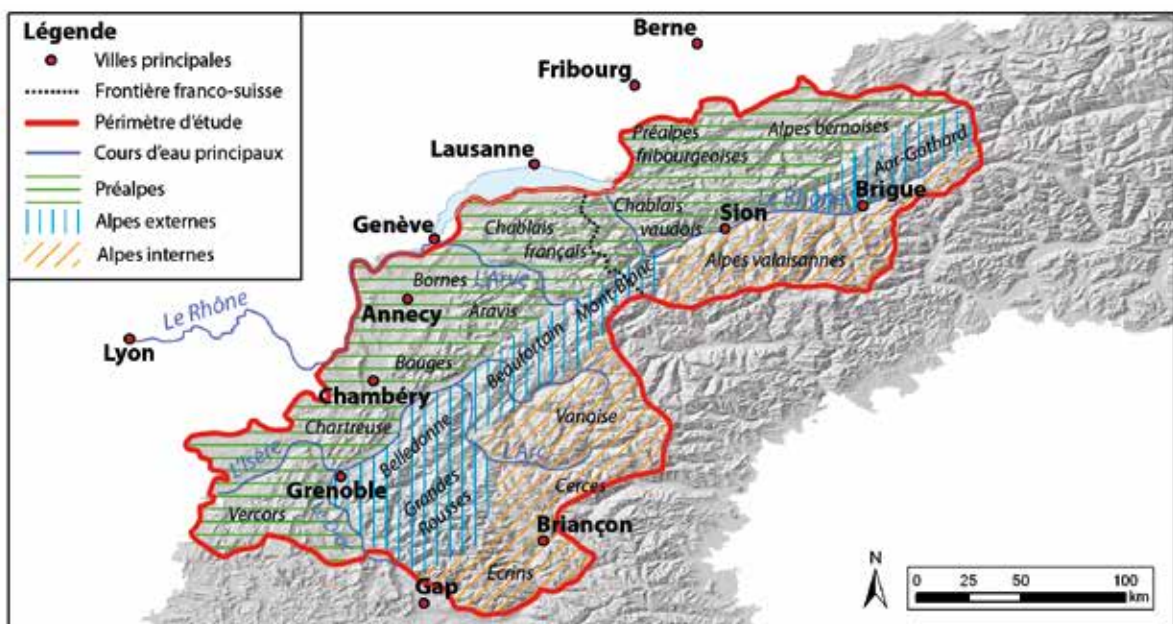


Fig. 1 - Carte de localisation de la zone d'étude et des principales entités biogéographiques.

1.2.1. Climat et géologie

Le territoire des Alpes du Nord occidentales est marqué par un climat montagnard à influence océanique plus ou moins nette selon les massifs. Il est compris entre les Alpes orientales, à l'est, marquées par l'influence continentale, et les Alpes du Sud, sous influence méditerranéenne.

Au sein de ce territoire, plus l'on se dirige vers l'est, plus les sommets sont élevés, plus les précipitations sont faibles et les contrastes thermiques importants. Cet effet de continentalité permet de définir trois zones biogéographiques bien distinctes (fig. 1) :

- au nord-ouest, **les Préalpes** (Alpes bernoises, Préalpes fribourgeoises, Chablais, Bornes, Bauges, Chartreuse, Vercors) où l'influence océanique induit une pluviosité importante sur les versants orientés à l'ouest et où la géologie est dominée par les roches calcaires et marneuses ;
- au sud-est, **les Alpes internes** (Alpes valaisannes, Vanoise, Cerces, nord des Écrins) arrosées principalement sur leurs versants occidentaux en raison de leur forte continentalité et marquées par la dominance des roches cristallines et métamorphiques (granites, gneiss, micashistes, etc.) ;
- à l'interface de ces deux zones, **les Alpes externes**, ou Alpes intermédiaires (Beaufortain, Mont-Blanc, Belledonne, Grandes Rousses, Aar-Gothard), caractérisées par un climat à l'influence océanique marquée, par des altitudes supérieures aux Préalpes et par des roches majoritairement cristallines.

1.2.2. Végétation

Le territoire des Alpes du Nord occidentales est une zone phytogéographique relativement homogène présentant tous les étages de végétation, de l'étage planitiaire à l'étage nival. Il se distingue notamment des Alpes du Sud par la prédominance des feuillus, en particulier à l'étage montagnard, celui-ci étant dominé, dans les Alpes du Sud, par les pinèdes et les mélézins (Rameau *et al.* 1993).

Les fortes différences climatiques rencontrées le long d'un gradient altitudinal sur un même versant sont à l'origine de l'étagement de la végétation. En effet, la température diminue avec l'altitude (en moyenne un degré tous les 150 mètres), de façon concomitante avec une augmentation des précipitations (entre 500 et 2 500 m, la pluviosité augmente en règle générale de 100 mm tous les 100 m). Ainsi, la durée de la période de végétation (période où la température quotidienne dépasse 6 °C) diminue avec l'altitude. Cette diminution induit progressivement une modification des communautés végétales et structure l'étagement de la végétation. Les limites de ces étages seront légèrement différentes si l'on se situe en adret ou en ubac, en zone interne ou en zone externe (fig. 2). On distingue ainsi...

L'étage collinéen (température moyenne annuelle comprise entre 8 et 12 °C et période de végétation supérieure à 250 jours) est cantonné en fond de vallée et sur les piémonts. Le chêne sessile (*Quercus petraea*), le chêne pédonculé (*Q. robur*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), le charme (*Carpinus betulus*) et le châtaignier (*Castanea sativa*), sur certains secteurs, sont les principales essences caducifoliées. Le frêne (*Fraxinus excelsior*) et l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) sont limités aux milieux frais et humides, le long des cours d'eau ou en pied de versant.

À l'étage montagnard (température moyenne annuelle comprise entre 4 et 8 °C et période de végétation restant supérieure à 200 jours), le hêtre est omniprésent dans les Préalpes et ne se maintient, dans les Alpes externes, que sur les versants exposés à l'ouest. Le sapin (*Abies alba*) et l'épicéa (*Picea abies*) se régénèrent naturellement, sauf en amont de la vallée de Chamonix, où il fait trop froid pour le sapin. C'est le domaine de prédilection de la hêtraie-sapinière et des pessières montagnardes pures (fig. 3). Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) colonise les adrets et les bas d'ubac des Alpes internes.

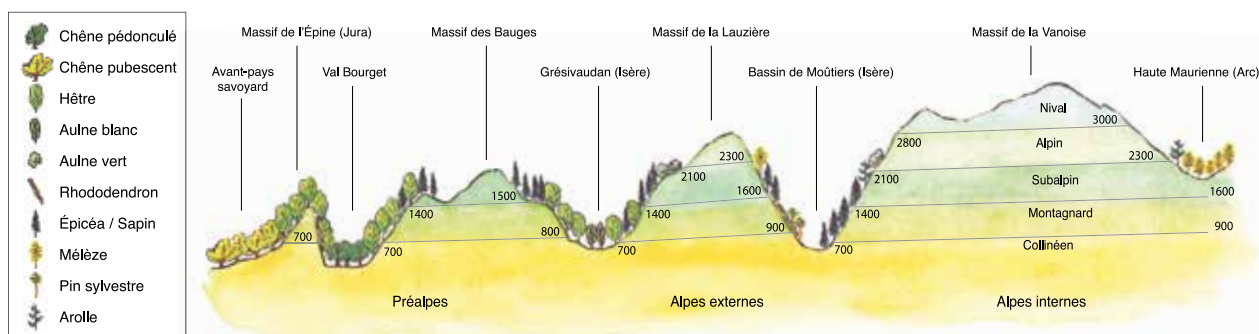


Fig. 2 - Coupe de l'étagement de la végétation.



Fig. 3 - Hêtre-pessière se développant à l'étage montagnard.

L'étage subalpin (température moyenne annuelle comprise entre 0 et 4 °C et période de végétation fluctuant entre 100 et 200 jours), dominé par l'épicéa dans sa partie inférieure, est marqué par l'apparition progressive du pin cembro (*Pinus cembra*), du pin à crochets (*P. uncinata*), du mélèze (*Larix decidua*) et des landes à éricacées dans sa partie supérieure. La limite altitudinale de la végétation forestière est à 2 200 m environ avec, aux abords de cette zone, la présence de peuplements rabougris et clairsemés marquant l'interface entre les forêts de conifères et les pelouses d'altitude (fig. 4).



Fig. 4 - Pinède à pins à crochets se développant à l'étage subalpin inférieur dans les Préalpes.

L'étage alpin (température moyenne annuelle inférieure à 0 °C et période de végétation inférieure à 100 jours) est caractérisé par la dominance des pelouses rocailleuses (fig. 5). Il n'y a plus d'arbres ou d'arbustes car la saison favorable est trop courte et les gelées trop extrêmes. Seul le pin cembro peut éventuellement résister à ces conditions sur certains secteurs. Les pelouses continues à laiche courbée (*Carex curvula*) ou à seslérie bleuâtre (*Sesleria caerulea*) laissent peu à peu place aux pelouses écorchées caractérisées par la présence d'espèces développant un port en coussinet. La limite supérieure de cette végétation se situe entre 2 700 et 3 000 m dans les Alpes externes et entre 3 000 et 3 500 m dans les Alpes internes.



Fig. 5 - Mosaique de landes basses et pelouses écorchées à l'étage alpin.

L'étage nival, enfin, voit disparaître quasi définitivement les plantes à fleurs. Si quelques dicotylédones sont encore capables de survivre près des sommets, ce sont surtout les lichens qui colonisent les rochers, et seules quelques algues subsistent sur les glaciers.

En ce qui concerne le génie végétal, la prise en compte de la répartition spatiale et altitudinale de la végétation est essentielle dans le choix des espèces afin d'obtenir un taux de reprise et un développement optimaux des végétaux. La situation géographique du site devra donc être le premier critère à prendre en compte lors d'un aménagement.

2. Modèles naturels

Un des principes de base du génie végétal est de s'appuyer sur l'observation de modèles naturels. Ces modèles correspondent à des écosystèmes ou à des complexes d'écosystèmes riverains ou alluviaux, et peuvent se concevoir à différentes échelles.

À l'échelle stationnelle, le modèle peut correspondre à la composition botanique d'une biocénose, susceptible d'inspirer la composition d'un mélange grainier (fig. 1), ou à sa structure, dont la résistance face aux perturbations peut suggérer un agencement végétal efficace pour la protection contre l'érosion (fig. 2).



Fig. 1 - Pelouse alluviale dense structurée par la canche cespitueuse (*Deschampsia cespitosa*) et l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*) assurant une protection de surface.



Fig. 2 - Fourré de saule fétide (*Salix foetida*) et de saule bleuâtre (*S. caesia*) à l'étage subalpin.

À l'échelle d'un complexe d'écosystème, le modèle naturel peut se concevoir transversalement ou longitudinalement par rapport au cours d'eau :

- en considérant les associations végétales se juxtaposant latéralement par rapport au lit mineur et susceptibles de se substituer les unes aux autres (fig. 3) ;
- en considérant les associations végétales de même structure se succédant longitudinalement au fil de l'eau, depuis la source jusqu'à l'embouchure (chap. III.2.1.2).



Fig. 3 - Zonation transversale de la végétation composée de structures herbacée, buissonnante et arbustive, particulièrement pertinente pour une application en génie végétal.

Dans les Alpes du Nord, la description de modèles alluviaux et riverains a surtout été l'œuvre d'auteurs suisses, notamment de botanistes phytosociologues, les auteurs français, à l'initiative de Pautou, s'étant surtout consacrés à la description des communautés planitiaires des grands cours d'eau alpins.

Un des travaux descriptifs de base des communautés alluviales montagnardes est celui de Moor (1958). Outre ses qualités diagnostiques faisant référence pour l'identification des unités végétales, ce travail présente les liens spatiaux les unissant. Le second travail d'ampleur, conduit plus récemment sur l'ensemble des zones alluviales de Suisse, est celui de Roulier (1998). Dans une approche légèrement différente (phytosociologie synusiale intégrée), Roulier identifie un grand nombre de synusies, zonations et successions végétales de l'étage collinéen aux confins de l'étage subalpin.

Biocénose : ensemble des êtres vivants coexistant dans un espace défini (biotope).

Succession végétale : chronoséquence de groupements végétaux aux structures différentes se substituant spontanément les uns aux autres en l'absence de perturbation (succession autogène), se rapprochant du climax (succession progressive) ou s'en éloignant (succession régressive). Le terme de la succession végétale ou climax est déterminé par le climat de la station (climax climatique) ou des conditions édaphiques particulières (climax stationnel).

Zonation : structuration écologique transversale des groupements végétaux sur les rives d'un cours d'eau. La zonation n'implique pas nécessairement une succession temporelle entre les unités constituantes.

Synusie végétale : ensemble d'espèces végétales présentant une morphologie, une phénologie et une stratégie adaptative similaires (Gillet *et al.* 1991, modifié).

Si elles offrent des modèles privilégiés, les communautés alluviales naturelles ne constituent toutefois pas les seuls écosystèmes de référence dont peut s'inspirer le génie végétal. Dans de nombreux cas, l'implantation des végétaux est en effet réalisée sur des berges non soumises à l'influence alluviale. Le substrat, dont la mise en place n'est pas nécessairement issue d'un transport par l'eau, peut être déconnecté de la nappe et parfois particulièrement sec. Ainsi, les communautés herbacées et arbustives pionnières mésophiles à xérophiles sont aussi largement susceptibles d'inspirer le choix des végétaux à insérer dans les plantations ou les mélanges grainiers d'un aménagement. Dans ces quelques pages, la présentation sera néanmoins ciblée sur les groupements végétaux riverains, leur zonation et succession, à la lumière des travaux de Moor (*op. cit.*), Zoller (1974), Roulier (*op. cit.*), Bidat (2009), Sartoretti (2009) et Prunier *et al.* (2010).

2.1 Communautés riveraines et alluviales montagnardes

2.1.1 Fourrés et perchis de saules (*Salicetalia purpureae*)

Les fourrés et perchis de saules constituent le plus souvent des formations arbustives ou arborescentes des lits de cours d'eau. De par leur résistance élevée aux contraintes mécaniques, leur forte aptitude à la multiplication végétative (bouturage, rejet de souche) et à la dispersion (graines anémochores), les saules sont capables de se développer dans les secteurs régulièrement rajeunis par les crues. La nature de ces communautés varie cependant selon l'altitude (reflet de la position dans le bassin versant) et la nature du substrat.

2.1.1.1 Saulaies à saule à trois étamines (*Salicetum triandrae*)

La saulaie à saule à trois étamines est une formation arbustive dominée par le saule à trois étamines (*S. triandra*), qui forme parfois des peuplements denses difficilement pénétrables. Elle se développe dans le lit majeur des parties moyenne et inférieure des cours d'eau, sur des dépôts limono-sableux humides (fig. 4), à l'aval des bancs, le long des bras secondaires à écoulement lent ou dans des deltas à une hauteur moyenne de 1 à 1,5 m au-dessus du niveau moyen des eaux.



Fig. 4 - Saulaie à saule à trois étamines (*Salicetum triandrae*) sur sols limono-sableux.

D'un point de vue altitudinal, cette formation est surtout présente aux étages planitiaire et collinéen, le long des grandes rivières alpines comme le Rhône, l'Arve ou l'Isère. Elle est parfois présente à l'étage montagnard comme le long de l'Arc où elle atteint 1 300 m. À basse altitude, elle peut s'enrichir en saule des vanniers (*S. viminalis*) et en saule blanc (*S. alba*). Elle y forme le manteau de la saulaie blanche (*Salicetum albae*), qu'elle précède dans la succession, et est régulièrement en mosaïque avec les communautés à hautes herbes à calamagrostide faux roseau (*Calamagrostietum pseudophragmitis*) qui la précède dans cette même succession (fig. 5).

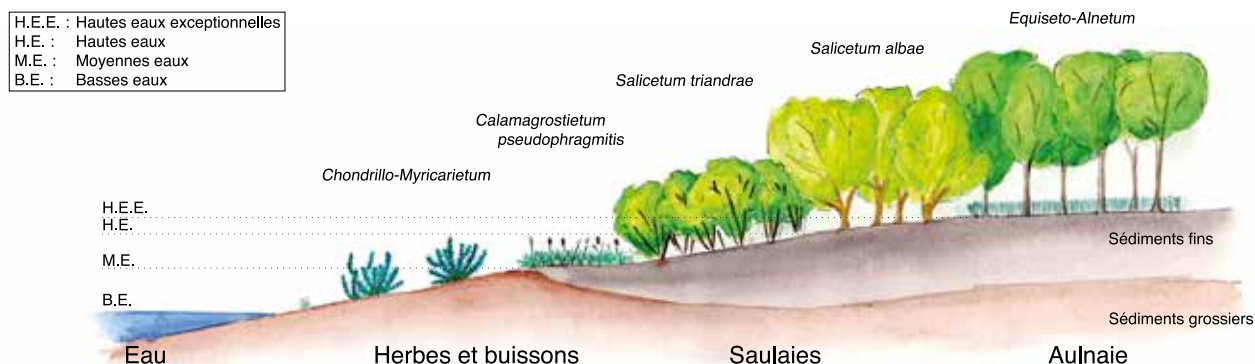


Fig. 5 - Zonation transversale de la végétation selon les différentes lignes d'eau et la granulométrie - Exemple de l'Arve à Contamine-sur-Arve (France - Haute-Savoie). Source : Prunier *et al.* (2010), modifié.

La sensibilité hydrique du saule à trois étamines exclut cette formation des terrasses les plus élevées, la hauteur maximale atteinte se situant à deux mètres au-dessus du niveau moyen des eaux. Elle encourage une utilisation de cette espèce dans des contextes de pied de berge sur matériaux fins. Elle incite également à éviter l'utilisation du saule blanc et du saule des vanniers au-dessus de 800 m, à des altitudes ne correspondant pas à leur optimum écologique.

La calamagrostide faux roseau (*Calamagrostis pseudophragmites*), structurante des communautés herbacées pionnières, n'est pas utilisée en génie végétal, faute de disponibilité dans le commerce. Elle présente pourtant des potentialités importantes dans ce domaine (chap. III.5.3).

2.1.1.2 Saulaies à saule drapé (*Salicion elaeagni*)

Les saulaies buissonnantes à saule drapé (*S. elaeagnos*) sont le plus souvent des formations arbustives. Elles peuvent parfois être arborescentes, mais ce développement en haute tige est assez rare dans les Alpes du Nord. Ces saulaies se développent dans les cours supérieurs et moyens des rivières aux pentes fortes (plus de 2 %), le plus souvent en tête de bancs sur des matériaux grossiers drainants (galets, graviers), pauvres en matière organique. Elles sont ordinairement structurées par le saule drapé, le saule faux daphné (*S. daphnoides*) et le saule pourpre (*S. purpurea* – notamment sa sous-espèce *angustior*), ce dernier s'hybridant régulièrement avec le saule faux daphné. Par ailleurs, le saule noircissant (*S. myrsinifolia*) peut être localement abondant, notamment à la lisière du peuplement. La composition des strates herbacée et sous-arbustive dépend de la xéricité du substrat.

D'un point de vue altitudinal, ces saulaies sont parfois présentes dès l'étage planitiaire, le long des grandes rivières alpines comme sur le haut Rhône français à seulement 250 m d'altitude, où elles sont en régression, jusqu'au sommet de l'étage montagnard où elles atteignent ponctuellement 1 500 m.

Enfin, elles colonisent parfois des biotopes secondaires tels que les talus de bord de route, les carrières ou les gravières abandonnées au sol temporairement inondé.

Deux types de saulaies à saule drapé sont généralement distingués en fonction de leur xéricité : la saulaie à myricaire, qui représente une variante hygrophile sur matériaux fins, et la saulaie à argousier qui correspond à une variante xérophile sur matériaux grossiers. Une situation médiane, mésophile, est également régulière.

La saulaie à myricaire (*Salici-Myricarietum*) : une variante hygrophile

La saulaie à myricaire se développe sur des sols pourvus d'une matrice de sables et de limons (fig. 6), souvent marqués par des traces de crues. La rétention en eau des matériaux fins permet la germination et le maintien d'espèces herbacées sensibles à la sécheresse. Outre la myricaire (*Myricaria germanica*), cette saulaie comporte de manière éparse les saules blanc et à trois étamines.



Fig. 6 - Stade pionnier de la saulaie à myricaire sur sol sablo-limo-neux bien pourvu en eau (*Salici-Myricarietum*).

La strate herbacée présente des taxons hygrophiles, notamment des joncs (*Juncus alpino-articulatus*, *J. articulatus*, *J. bufonius*), et des espèces déalpines (*Campanula cochlearifolia*, *Epilobium fleischeri*, *Gypsophila repens*). Elle présente un optimum de développement à l'étage montagnard où elle constitue un stade intermédiaire entre les communautés à prêle panachée et à petite massette (*Equiseto variegati-Typhetum minimae*) et l'aulnaie blanche à calamagrostide bigarée (*Calamagrostio-Alnetum*).

La saulaie à argousier (*Salici-Hippophaetum*) : une variante xérophile

La saulaie à argousier se développe sur les sols alluviaux graveleux ou sableux, secs 3 à 4 mois par an (fig. 7).



Fig. 7 - Saulaie à argousier se développant sur matériaux sableux (*Salici-Hippophaetum*).

Elle montre un optimum de développement dans les vallées intra-alpines. Outre la présence de l'argousier (*Hippophae rhamnoides*), cette saulaie est structurée par des essences xérophiles comme l'épine-vinette (*Berberis vulgaris*) ou le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). La strate herbacée, également xérophile, comporte diverses espèces d'épervières (notamment *Hieracium piloselloides* et *H. staticifolium*), l'armoise champêtre (*Artemisia campestris*), l'épilobe à feuilles de romarin (*Epilobium dodonaei*) ou encore la fausse roquette à feuilles de cresson (*Erucastrum nasturtiifolium*). Sur le plan dynamique, les

H.E. :	Hautes eaux
M.E. :	Moyennes eaux
B.E. :	Basses eaux

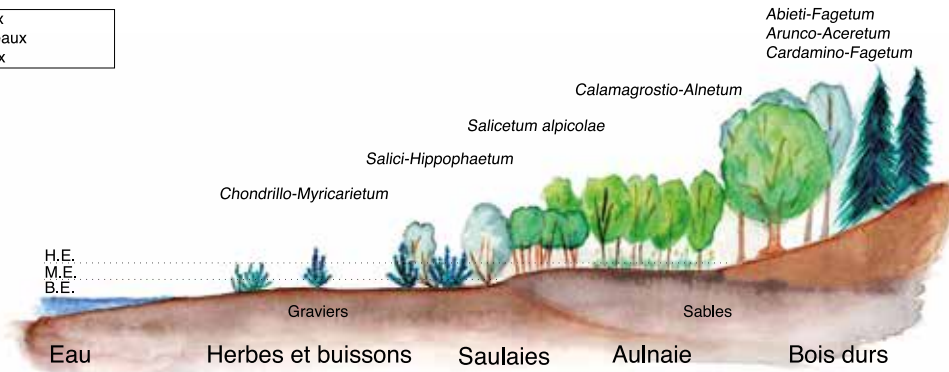


Fig. 8 - Zonation transversale de la végétation selon les différentes lignes d'eau – Alpes du Nord helvétiques. Source : Moor (1958), modifié.

saulaies à argousier s'insèrent entre les communautés herbacées ripicoles sur matériaux grossiers (*Chondrillo-Myricarietum*) et les aulnaies blanches à calamagrostide bigarée (*Calamagrostio-Alnetum* – fig. 8) ou à violette à deux fleurs (*Violo-Alnetum*) selon le contexte. Dans les stations les plus sèches, elles peuvent également être au contact de pinèdes ou de bétulaies xérophiiles.

Le type mésophile

Au-delà des deux variantes décrites ci-dessus, il existe des situations à xéricité intermédiaire où les strates herbacée et sous-arbustive présentent un mélange d'espèces propres aux deux cortèges, voire, inversement, une absence des espèces mentionnées ci-dessus. Dans cette situation, certaines graminées pionnières comme l'agrostide stolonifère (*Agrostis stolonifera*), la calamagrostide commune (*Calamagrostis epigeios*) ou d'autres espèces résistantes aux perturbations comme la fétuque faux roseau (*Festuca arundinacea*) sont régulièrement présentes, ainsi que le tussilage (*Tussilago farfara*) et parfois le liondent hasté (*Leontodon hispidus* subsp. *hastilis*).

La résistance aux contraintes mécaniques et à la sécheresse des saules typiques de cette formation permet leur implantation sur tout le profil de berge, y compris sur des matériaux drainants. Cette formation est d'autant plus adaptée pour une application en génie végétal que les trois espèces de saules dominantes (*S. daphnoides*, *S. elaeagnos*, *S. purpurea*) présentent des taux de reprise au bouturage très élevés (supérieurs à 90 %), autorisant leur utilisation dans de nombreux types d'ouvrages.

La composition de la strate herbacée fournit également plusieurs auxiliaires précieux comme la calamagrostide commune et certaines sous-espèces du liondent hispide (chap. III.4). D'autres espèces comme les épilobes de Fleischer ou à feuilles de romarin ou encore le tussilage ne sont en revanche pas encore utilisées (chap. III.5).

2.1.1.3 Saulaies à saule faux daphné

La saulaie à saule faux daphné est une formation arborescente intra-alpine non encore décrite, qui se développe 2 à 3 m au-dessus du niveau moyen des eaux, sur des bancs sablo-graveleux dans la partie supérieure de l'étage montagnard et à la base de l'étage subalpin (fig. 9).

Elle présente une extension remarquable en haute Maurienne (Bidat 2009). En l'absence de concurrence du saule drapé, le saule faux daphné (*S. daphnoides*), plus résistant au froid, montre un développement exubérant et forme des peuplements monospécifiques ou mixtes avec l'aulne blanc. Dans ces conditions, il est possible d'observer des individus atteignant 15 m de haut pour un diamètre du tronc atteignant 30 cm à la base.

Le sol, pourvu d'une fine couche d'humus, repose sur des sables retenant bien l'eau. Il permet la croissance d'une strate herbacée luxuriante riche en graminées (*Agropyron caninum*, *Deschampsia cespitosa*) et en espèces des mégaphorbiaies dans les secteurs les plus frais (*Adenostyles alliariae*, *Epilobium angustifolium*, *Geranium sylvaticum*, *Geum rivale*, *Heracleum sphondylium*, *Myosotis decumbens*, *Peucedanum ostruthium*, *Thalictrum aquilegifolium*).

Sur le plan dynamique, cette saulaie est précédée par les fourrés de saule pourpre.



Fig. 9 - Saulaie à saule faux daphné se développant sur matériaux sablo-graveleux.

L'exubérance du développement du saule faux daphné illustre l'importance structurale de cette espèce dans les peuplements riverains montagnard et subalpin. Au-dessus de 1 500 m, en l'absence du saule drapé, il devient une espèce clé de la végétalisation des rives.

La composition de la strate herbacée et les espèces compagnes fournissent également un certain nombre d'auxiliaires précieux en situation fraîche. Ces espèces montrent un optimum de développement dans les aulnaies blanches (chap. III.2.1.2).

2.1.2 Aulnaies blanches (*Alnion incanae*)

Les aulnaies blanches sont des formations alluviales post-pionnières de bois tendre. Si elles présentent le plus souvent une forme arborescente, elles peuvent également montrer une physionomie arbustive, notamment dans les premiers stades de leur développement. Les aulnaies blanches sont répandues dans les Alpes du Nord, aux abords des cours supérieurs et moyens des rivières où elles se développent dans le lit majeur sur alluvions caillouteuses, sableuses ou limoneuses filtrantes, inondées seulement lors des hautes eaux (fig. 10). Présentes dès l'étage collinéen, elles montrent un optimum de développement à l'étage montagnard et atteignent la base de l'étage subalpin, ponctuellement jusqu'à 1 900 m.

Dominées par l'aulne blanc (*Alnus incana*), elles comportent régulièrement dans leur strate arborée des saules, tels le saule drapé ou le saule faux daphné, et des espèces préfigurant les stades forestiers non liés à l'influence alluviale, telles que le frêne (*Fraxinus excelsior*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), le sapin (*Abies alba*), l'épicéa (*Picea abies*) ou le mélèze (*Larix decidua*).

La nature de la strate herbacée dépend de l'altitude et de la maturité du peuplement. Composée d'espèces herbacées pionnières dans les premiers stades de développement, elle se densifie et évolue progressivement vers la mégaphorbiaie. Le piégeage des particules fines lors des hautes eaux, l'ombrage de la strate arborée et la nitrification induite par les bactéries symbiotiques de l'aulne blanc

(*Frankia alni*) permettent le développement d'espèces d'ombre ou de demi-ombre, mésophiles à mésohygrophiles et nitrophiles. Parmi les espèces les plus caractéristiques du cortège des aulnaies blanches, on compte le chiendent des chiens (*Agropyron caninum*), la canche cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*), la ronce bleuâtre (*Rubus caesius*), ainsi que de nombreuses espèces de lisière comme la podagraire (*Aegopodium podagraria*), le géranium herbe à Robert (*Geranium robertianum*), la benoîte des villes (*Geum urbanum*), le houblon (*Humulus lupulus*) ou diverses espèces nitrophiles comme l'ortie dioïque (*Urtica dioica*).

Sur le plan dynamique, les aulnaies blanches constituent le terme de la succession alluviale sur matériaux grossiers, succédant aux communautés herbacées ripicoles et aux saulaies à saule drapé. L'effacement de l'influence alluviale se matérialise le plus souvent par l'implantation d'une frênaie à l'étage collinéen et, selon le contexte climatique, d'une hêtraie, d'une pessière ou d'un mélèzin aux étages montagnard et subalpin. Conservant des traits alluviaux au niveau de leur sol, ces formations ne comportent alors plus d'espèces alluviales typiques.

Cinq types d'aulnaies blanches sont décrites, dont l'enchaînement de quatre d'entre elles représente un bel exemple de zonation longitudinale (fig. 10) mis en exergue par Zoller (1974) lors de son travail sur les communautés alluviales de l'Inn en Engadine (Suisse). La zonation s'échelonne de l'étage subalpin inférieur (en situation intra-alpine) à l'étage collinéen supérieur (en situation périalpine).

2.1.2.1 Aulnaie à prêle d'hiver (*Equiseto-Alnetum incanae*)

L'aulnaie à prêle d'hiver est une formation collinéenne périalpine se développant dans le cours inférieur des rivières (fig. 11). Elle possède un sol riche en particules fines (limons et sables) retenant bien l'eau et permettant le développement d'espèces hygrophiles telles que *Caltha palustris*, *Carex acutiformis*, *Equisetum hiemale*, *Phalaris arundinacea*, *Phragmites communis*, *Symphytum officinale*. La strate arbustive comporte des espèces thermophiles comme l'érable plane (*Acer platanoides*) ou le chêne pédonculé (*Quercus robur*).

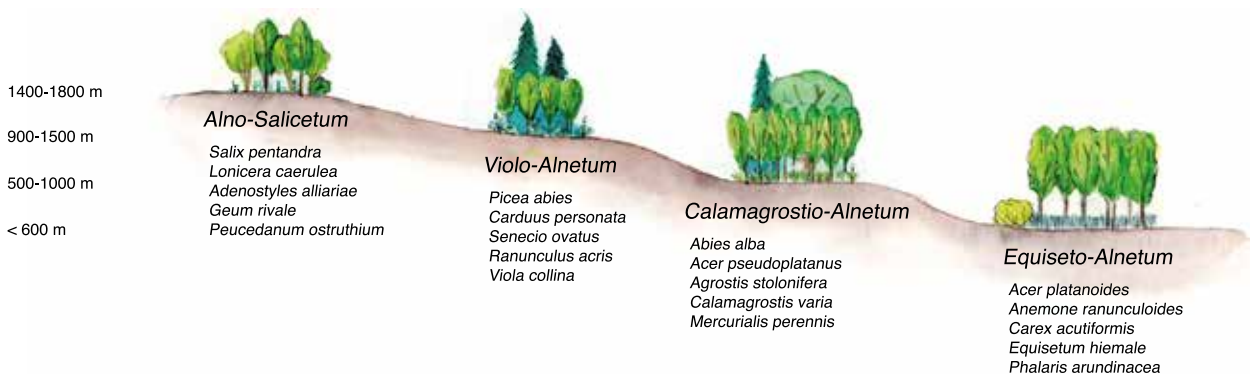


Fig. 10 - Zonation longitudinale des aulnaies blanches de l'étage subalpin inférieur des Alpes internes helvétiques jusqu'aux contreforts préalpines. Inspiré de Zoller (1974).



Fig. 11 - Aulnaie blanche à prêle d'hiver (*Equiseto-Alnetum*).

2.1.2.2 Aulnaie à calamagrostide bigarée (*Calamagrostio-Alnetum incanae*)

L'aulnaie à calamagrostide bigarée (*Calamagrostis varia*) est une formation de l'étage montagnard inférieur qui se développe dans le cours moyen des rivières préalpines. Son sol sableux à graveleux, plus grossier que celui de l'aulnaie à prêle d'hiver, ne permet pas le développement de végétaux hygrophiles. La strate herbacée conserve des espèces pionnières telles que l'agrostide stolonifère (*Agrostis stolonifera*) ou le cirse des champs (*Cirsium arvense*). Elle est, selon le stade de maturité, plus ou moins riche en espèces mésophiles sensibles aux perturbations et ayant leur optimum de développement au sein des hêtraies (*Lamium galeobdolon*, *Carex digitata*, *Mercurialis perennis*). La coexistence de ces deux cortèges est typique de la strate herbacée de cette association. La strate arbustive comporte des espèces typiquement montagnardes comme le sapin (*Abies alba*), l'orme de montagne (*Ulmus glabra*) ou le saule appendiculé (*Salix appendiculata*).

2.1.2.3 Aulnaie à violette à deux fleurs (*Violo-Alnetum incanae*)

L'aulnaie à violette à deux fleurs (*Viola biflora*) est une formation intra-alpine fréquente à l'étage montagnard supérieur (fig. 12). Le substrat, sableux à graveleux, est analogue à celui de l'aulnaie à calamagrostide. La strate herbacée est marquée par la coexistence d'espèces pionnières tels l'agrostide stolonifère, le cirse des champs, le tussilage (*Tussilago farfara*) et d'espèces de mégaphorbiaies comme le séneçon ovale (*Senecio ovatus*) ou le chardon bardane (*Carduus personata*). Leur développe-

ment à l'ombre des aulnes est possible grâce au microclimat plus froid que celui de l'aulnaie à calamagrostide. La strate arbustive est composée d'espèces typiquement montagnardes (chap. III.2.1.2.3) auxquelles s'adjoignent régulièrement le saule alpestre (*Salix myrsinifolia* subsp. *alpicola*) et l'épicéa.



Fig. 12 - Aulnaie à violette à deux fleurs (*Violo-Alnetum*).

Le saule alpestre (*S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*) forme parfois des communautés denses constituant le manteau des aulnaies blanches montagnardes et subalpines (*Salicetum alpicolae*). Tolérant bien l'ombrage et le froid, ce taxon peu connu présente un intérêt tout particulier pour une implantation dans les stations à fortes contraintes thermiques.

2.1.2.4 Aulnaie à saule laurier (*Alno-Salicetum pentandrae*)

L'aulnaie à saule laurier est une formation subalpine rare, recensée ponctuellement au sein des Alpes du Nord occidentales dans le haut Valais à Gletsch et dans le val d'Hérens (Steiger 2010), ainsi qu'en Savoie à Bessans. La strate arborée, pouvant atteindre près de 15 m dans les situations les plus favorables (fig. 13), est co-dominée par l'aulne blanc et le saule laurier (*Salix pentandra*). Le sol, constitué de matériaux fins à plus ou moins grossiers, est constamment alimenté par la nappe. La strate herbacée est également luxuriante, comptant de nombreuses espèces des mégaphorbiaies montagnardes et subalpines telles l'impéatoire (*Peucedanum ostruthium*) ou l'adénostyle à feuilles d'alliaire (*Adenostyles alliariae*).



Fig. 13 - Aulnaie blanche à saule laurier (*Alno-Salicetum pentandrae*).

2.1.2.5 Aulnaie à érables (*Aceri-Alnetum incanae*)

L'aulnaie à érable est une formation analogue à l'aulnaie à violette à deux fleurs. Elle se développe aux mêmes altitudes mais dans des contextes non spécifiquement alluviaux, sur cônes de déjections, marnes, flyschs ou ardoises instables. Outre l'aulne blanc, la strate arborée est composée de l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et de l'épicéa (*Picea abies*). La strate herbacée est marquée par un développement luxuriant des espèces de mégaphorbiaies (fig. 14).



Fig. 14 - Sous-bois luxuriant d'une aulnaie à érables (*Aceri-Alnetum incanae*) composé d'espèces de mégaphorbiaies.

Outre les saules, plusieurs espèces ligneuses accompagnant l'aulne blanc, telles l'érable sycomore, le frêne, le sorbier des oiseleurs, sont déjà utilisées en génie végétal (chap. III.4).

La composition de la strate herbacée des aulnaies blanches est variable. Les stades les plus jeunes sont marqués par la rémanence des taxons pionniers, dont certains xérophiles ont leur optimum dans les saulaies à saule drapé. Elle incite par ailleurs à l'utilisation d'espèces de mégaphorbiaies (adénostyle à feuilles d'alliaire, épilobe à feuilles étroites et grandes ombellifères) en pied de berge sur matériaux fins, notamment en situation confinée. Fortement couvrantes, résistantes aux passages des crues lors des hautes eaux, présentant un pivot profondément ancré ou un treillis de rhizomes, ces espèces peuvent constituer des auxiliaires d'intérêt (chap. III.5), complémentaires aux espèces pionnières xérophiles des saulaies à saule drapé tolérant la xéricité et la pauvreté nutritive des hauts de berges.

2.2 Formations arbustives et fourrés de l'étage subalpin (*Betulo carpaticae-Alnetea viridis*)

Deux catégories de communautés ligneuses riveraines sont majoritairement développées à l'étage subalpin : les communautés arbustives, dépassant deux mètres, et les communautés sous-arbustives de saules bas mesurant de 0,5 à 2 mètres. Les premières présentent leur optimum de développement de 1 300 à 2 000 m, même si elles peuvent se développer ponctuellement à plus haute ou plus basse altitude à la faveur de conditions locales plus clémentes ou plus froides. Les secondes se développent aux confins de l'étage subalpin, de 1 700 à 2 300 m. Elles marquent fréquemment la limite supérieure de la végétation ligneuse.

2.2.1 Aulnaies-saulaies arbustives des versants frais et bords de ruisseaux (*Alnion viridis*)

Ces formations arbustives se développent préférentiellement sur les versants ombragés longuement enneigés (fig. 15), dans les couloirs d'avalanches ou aux abords des torrents sur des berges souvent escarpées. Le plus souvent non alluviales, ces formations sont néanmoins fréquemment soumises à des perturbations mécaniques (accumulation de neige, avalanches, éboulements, etc.) qui éprouvent la résistance des arbustes et arbrisseaux constituants. Si l'aulne vert (*Alnus viridis*) endure les chocs par la souplesse de ses tiges, le saule appendiculé (*Salix appendiculata*) possède une aptitude élevée à rejeter de souche, ce qui lui permet de se régénérer rapidement.

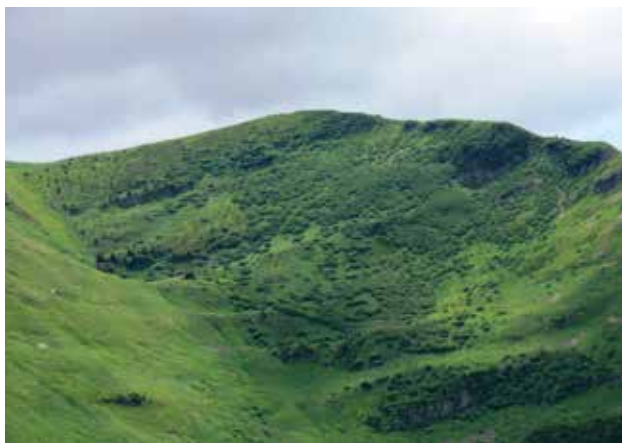


Fig. 15 - Aulnaie verte se développant au sein d'un versant ombragé (*Alnetum viridis*).

Le sol frais, légèrement humide et ombragé, ne possède pas de nappe en profondeur. Il permet le développement de nombreuses espèces mésohygrophiles de mégaphorbiaies comme l'adénostyle à feuilles d'alliaire, l'angélique (*Angelica sylvestris*), l'impératoire, le vératre (*Veratrum album*) ou encore la canche cespiteuse.

Lorsqu'elles sont situées aux abords des torrents de montagne, ces formations sont surélevées de 1 à 2 mètres par rapport au niveau moyen des eaux (fig. 16). Elles sont situées sur des berges qui s'appuient sur une assise de blocs tolérant des forces tractrices trop élevées pour les végétaux. Elles ne sont qu'occasionnellement submergées par les crues.

Sur les secteurs les moins pentus, ces formations ne sont que temporaires et constituent les premiers stades de la recolonisation forestière, s'insérant alors dans les séries de la pessière subalpine ou de la hêtraie à érables. Elles sont en revanche climaciques sur les versants les plus escarpés ou à l'aplomb des falaises où la fréquence des perturbations contrecarre l'implantation forestière.

2.2.1.1 Saulaies à saule appendiculé (*Salicetum appendiculatae*)

La saulaie à saule appendiculé est une brousse subalpine pouvant atteindre 5 m de haut (fig. 17). Elle se développe préférentiellement en contrebas des corniches sur des sols caillouteux calcaires pourvus d'une matrice d'argiles ou le long des torrents. Dominée par le saule appendiculé (*Salix appendiculata*), elle peut s'enrichir de l'alisier nain (*Sorbus chamaemespilus*), de l'érable sycomore, du sorbier des oiseleurs, voire du cytise des Alpes (*Laburnum alpinum*). Outre les espèces de mégaphorbiaies, la strate herbacée est riche en espèces des hêtraies telles que la fougère mâle (*Dryopteris filix-mas*), la mercuriale pérenne (*Mercurialis perennis*), le sceau de Salomon verticillé (*Polygonatum verticillatum*), le séneçon ovale (*Senecio ovatus*) ou la véronique à feuilles d'ortie (*Veronica urticifolia*). Cette saulaie est régulièrement en contact avec les pelouses fraîches neutro-calcoles à laiche ferrugineuse (*Caricion ferrugineae*) auxquelles elle se substitue lorsque les perturbations sont moins fréquentes et l'enneigement moins prolongé.



Fig. 17 - Saulaie à saule appendiculé (*Salicetum appendiculatae*).

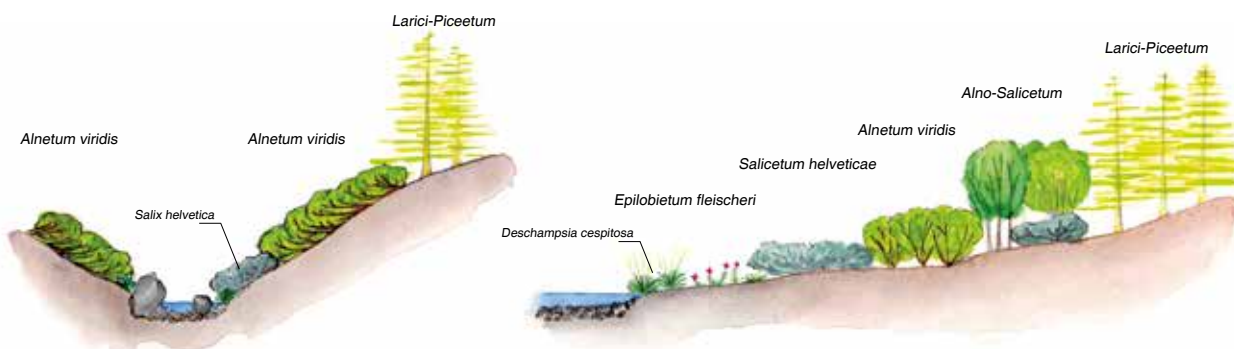


Fig. 16 - Zonation transversale de la végétation sur substratum silicaté grossier à l'étage subalpin supérieur des Alpes pennines suisses (Suisse - Valais) : (a) sur un cours d'eau encaissé ; (b) sur un cours d'eau à chenal unique non encaissé. Source : Sartoretti (2009), modifié.

2.2.1.2 Aulnaies vertes (*Alnetum viridis*)

L'aulnaie verte est une formation dense facilement reconnaissable aux bosquets à tiges arquées de l'aulne vert (fig. 18). Elle peut s'enrichir des saules appendiculé et hasté (*Salix hastata*), du sureau rouge (*Sambucus racemosa*) et du sorbier des oiseleurs. Selon la nature du substratum, elle présente deux aspects bien différents. Sur les substrats marneux ou schisteux supportant des sols bruns riches en particules fines et nutriments, la forte rétention en eau permet un développement luxuriant des espèces de mégaphorbiaies. Sur les substrats silicatés plus grossiers libérant peu de particules fines, le rhododendron ferrugineux (*Rhododendron ferrugineum*) s'associe à l'aulne vert pour constituer une strate sous-arbustive dense. L'aulnaie verte est régulièrement en contact avec les pelouses subalpines fraîches acido-neutrophiles et les landes à rhododendron ferrugineux (*Rhododendretum ferruginei*), auxquelles elle se substitue lorsque les perturbations deviennent moins fréquentes ou lorsque la pression de pâturage diminue.



Fig. 18 - Aulnaie verte se développant aux abords d'un torrent de montagne.

L'aulne vert peut parfois s'associer au saule faux daphné pour former des peuplements alluviaux denses à l'étage subalpin inférieur. Ces peuplements, recensés dans le Valais à Gletsch (Roulier 1998) et en Savoie à Bonneval-sur-Arc, se développent au-dessus de la limite supérieure des aulnaies blanches.

De par la souplesse de leurs tiges et leur aptitude à rejeter de souche, l'aulne vert et le saule appendiculé présentent un réel potentiel pour le génie végétal, notamment pour la protection des terrains à forte pente soumis à des phénomènes érosifs ou des mouvements de terrain (chap. III.4).

Comme dans le cas des aulnaies blanches, la composition de la strate herbacée des aulnaies vertes et des saulaies appendiculées met en exergue l'utilisation possible d'espèces de mégaphorbiaies pour fixer les berges des rivières de montagne (adénostyle à feuilles d'alliaire, épilobe à feuilles étroites et grandes ombellifères).

2.2.2. Saulaies basses alluviales neutro-calcicoles (*Salicion waldsteinianae*)

Les saulaies basses sont des formations d'arbrisseaux et de sous-arbrisseaux relativement denses. Elles se développent en tête de bassin versant à la limite supérieure de la forêt, le long des cours d'eau sur des moraines ou éboulis stabilisés (fig. 19). Leur sol souvent brut est pauvre en nutriments et toujours humide. L'association type à saule de Waldstein (*Salicetum waldsteinianae*), propre aux matériaux carbonatés grossiers, est absente des Alpes occidentales. Elle y est remplacée, selon le contexte, par des communautés dominées par les saules bleuâtre (*Salix caesia*), fétide (*S. foetida*) et hasté (*S. hastata*).

2.2.2.1 Saulaies à saule bleuâtre et saule fétide (*Salicetum caesio-foetidae*)

La saulaie à saule bleuâtre et saule fétide, s'enrichissant parfois du saule hasté, est une formation intra-alpine alluviale qui se développe à proximité des cours d'eau (cours principal ou bras latéral) sur des secteurs plats ou peu pentus (fig. 20). Par son port étalé, le saule bleuâtre y forme souvent des tapis bas (généralement inférieurs à 1 m), très denses et totalement recouvrants. Le sol alluvial, aéré, pauvre en humus, est majoritairement constitué de matériaux fins retenant bien l'eau (limons et sables, s'enrichissant parfois en graviers et galets). Il est donc toujours humide. Cette fraîcheur est propice au développement d'espèces de mégaphorbiaies comme l'impératoire, l'épi-

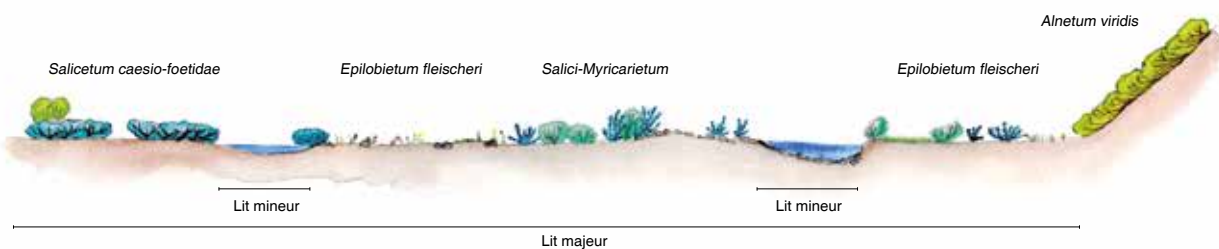


Fig. 19 - Zonation transversale de la végétation sur alluvions neutro-calcicoles à la limite supérieure de la forêt sur un cours d'eau en tresses présentant une plaine alluviale. Exemple de l'Arc à l'Écot, Bonneval-sur-Arc (France - Savoie). Source : Bidat (2009), modifié.

lobe à feuilles étroites ou le bleuet vivace (*Centaurea montana*) lorsque le recouvrement des saules n'est pas trop dense. Cette saulaie se développe au contact de communautés à épilobe de Fleischer (*Epilobietum fleischeri*).



Fig. 20 - Saulaie à saule bleuâtre (*Salicetum caesio-foetidae*).

2.2.2.2. Saulaies à saule hasté et saule fétide

La saulaie à saule hasté et saule fétide est une formation intra-alpine dense, non spécifiquement alluviale, haute de 1 à 2 m. Elle est dominée par les ports ascendants des saules hasté et fétide qui forment des peuplements peu pénétrables. Elle se développe en pied de versant en situation confinée ou le long des cours d'eau sur des matériaux grossiers (cailloux ou blocs) accusant une pente marquée (fig. 21). Le sol squelettique est pauvre en particules fines, mais toujours humide. Selon le contexte, les espèces de mégaphorbiaies sont plus ou moins abondantes dans la strate herbacée.



Fig. 21 - Saulaie à saule hasté et saule fétide.

Les saules fétide et hasté sont potentiellement utilisables en pied de berge. Parmi ces deux espèces largement répandues, le saule fétide est celle qui présente la plus grande amplitude écologique. Même si le saule bleuâtre est plus localisé, l'abondance de ses peuplements sur certains secteurs intra-alpins fait de cette espèce un taxon d'intérêt pour le génie végétal (chap. III.4).

2.2.3 Saulaies acidophiles à saule helvétique (*Salicetum helveticae*)

La saulaie à saule helvétique (*Salicetum helveticae*) est une formation intra-alpine saxicole acidophile de la zone de combat. Elle est dominée par le saule helvétique (*Salix helvetica*), auquel s'associe le saule glauque (*S. glaucosericea*), parfois dominant. Elle se développe préférentiellement dans les secteurs longuement enneigés, sur des substrats composés de débris rocheux silicatés (moraines et pied d'éboulis stabilisés). Le sol se réduit souvent à un humus brut acide, aéré et humide, propice à la croissance des éricacées (*Vaccinium spp.*) ou de la calamagrostide velue (*Calamagrostis villosa*) ; cette dernière espèce formant ponctuellement des peuplements denses. D'un point de vue spatial, cette saulaie entre fréquemment en contact avec la lande à rhododendron ferrugineux, qui la remplace sur les secteurs les moins humides, ou avec les aulnaies vertes, les mélézins ou les pessières (fig. 22).



Fig. 22 - Saulaie acidophile à saule helvétique en mosaïque avec la lande à rhododendron ferrugineux.

La nature de ces peuplements souligne l'importance structurale et l'intérêt pour le génie végétal en zone intra-alpine des saules helvétique et glauque : pionniers, tolérant le froid et l'acidité prononcée du sol (chap. III.4). Elle révèle également le potentiel d'une graminée sociale comme la calamagrostide velue.

3. Critères de choix des végétaux

3.1. Principes de base

Les aménagements de génie végétal sont principalement constitués de matériaux vivants, à savoir de plantes ou parties de plantes, qui sont mises en œuvre selon différentes techniques pour constituer des ouvrages spécifiques. Les végétaux ainsi utilisés développent des systèmes racinaires et des tiges aériennes pour constituer, à terme, des formations végétales à part entière. Ainsi, plus la croissance des plantes est rapide et fournie, plus l'ouvrage exercera pleinement son efficacité dans sa fonction de protection du sol contre l'érosion. Un choix judicieux de végétaux adaptés aux conditions locales et présentant une croissance rapide est donc capital pour la réussite d'un ouvrage de génie végétal.

Un des principes de base dans le choix des végétaux est de prendre pour référence des modèles naturels (chap. III.2). Il s'agit pour cela de rechercher sur le cours d'eau faisant l'objet d'un projet, ou du moins dans son bassin versant proche, des structures végétales exposées à des contraintes physiques fortes (contraintes tractrices, exposition au charriage, ensevelissement partiel, etc.), et capables d'y résister. On s'inspire alors de leur composition botanique, de la répartition des différentes espèces sur la berge, mais également de l'ensemble des caractéristiques morphologiques et structures minérales qui occupent le pied de berge.

3.2. Critères de choix

Si les modèles naturels constituent la référence de base, le choix définitif des végétaux s'affine selon un certain nombre de critères liés à la distribution, l'écologie, la physiologie et la morphologie des espèces (fig. 1).

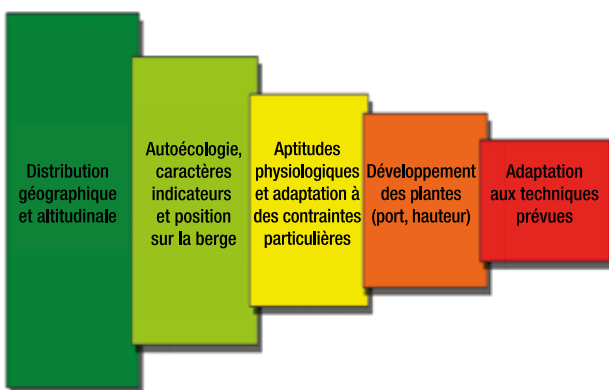


Fig. 1 - Processus de choix des végétaux comprenant une succession de filtres (critères) sélectifs.

3.2.1. Répartition et autécologie des espèces

Aménager à l'aide de techniques de génie végétal signifie « introduire » des végétaux dans un milieu récepteur. Il est clair que l'efficacité de l'ouvrage dépendra d'une croissance saine et vigoureuse des végétaux choisis, autrement dit, de leur comportement face aux conditions de croissance.

3.2.1.1 Distribution géographique et altitudinale

Les distributions géographique et altitudinale naturelles des espèces végétales résultent d'un long processus d'adaptation aux conditions climatiques et à l'ensemble des conditions de croissance à l'échelle d'une région biogéographique. Le respect de ces distributions naturelles dans le choix des espèces à utiliser doit figurer comme un principe fondamental, non seulement pour s'assurer de l'adaptation des espèces utilisées, mais également d'un point de vue éthique, pour ne pas participer à la modification des aires naturelles, ceci même si certains végétaux pourraient potentiellement présenter toutes les garanties de reprise. Pour illustrer ce propos, citons le cas de l'aulne de Corse (*Alnus cordata*), bien trop souvent utilisé dans l'aménagement des berges de cours d'eau en milieu naturel sur le continent (en milieu urbain, les critères liés à la provenance des plantes sont moins pertinents).

Au-delà de ce niveau taxonomique, ce principe s'applique aussi au rang infraspécifique. En effet, les espèces à larges amplitudes géographique et altitudinale sont généralement privilégiées dans les aménagements, mais cela ne doit pas faire oublier les spécificités régionales et l'existence de taxons infraspécifiques. C'est le cas notamment du saule pourpre (*S. purpurea*), du saule noirissant (*S. myrsinifolia*), de l'anhyllide vulnérable (*Anhyllis vulneraria*), du liondent hispide (*Leontodon hispidus*) ou encore du lotier corniculé (*Lotus corniculatus*), espèces polytypiques présentant des taxons infraspécifiques ayant des exigences écologiques spécifiques (chap. III.4).

L'anhyllide vulnérable est une légumineuse clé pour le génie végétal. Elle présente, dans les Alpes du Nord, une très grande diversité infraspécifique avec 6 sous-espèces indigènes parmi les 27 actuellement recensées en Europe. Si certains de ces taxons sont rares, comme les sous-espèces *guyoti*, *polyphylla* et *vulnerarioides*, d'autres sont plus fréquents et sont structurants des pelouses sèches ou d'altitude, comme les sous-espèces *alpestris*, *carpatica* et *valesiaca* (fig. 2b et chap. III.4). La connaissance de la distribution altitudinale et de l'écologie de ces sous-espèces devient alors un élément important pour la composition du mélange grainier et, par voie de conséquence, l'optimisation des possibilités de développement des plantes et la réussite d'un ouvrage.

Bien que régulièrement semée, la sous-espèce type (subsp. *vulneraria*) ne devrait pas être utilisée dans les Alpes du Nord occidentales puisqu'elle n'est pas indigène sur ce secteur.

3.2.1.2. Conditions édaphiques

Au-delà de l'altitude et du climat, étroitement liés, les caractéristiques physico-chimiques du sol, notamment son niveau d'hydromorphie, sa granulométrie et sa nature chimique (pH, éléments nutritifs), sont des critères particulièrement importants pour le choix des végétaux.

Les espèces présentant une large amplitude écologique sont évidemment beaucoup plus souples d'utilisation. Elles sont notamment susceptibles de trouver une place à plusieurs niveaux dans un profil de berge à aménager. C'est le cas notamment de certaines espèces ligneuses comme le bouleau pendant (*Betula pendula*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le frêne (*Fraxinus excelsior*), le saule pourpre (*Salix purpurea*), le saule drapé (*S. elaeagnos*) ou d'espèces herbacées telles que l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*) ou l'avoine jaunâtre (*Trisetum flavescens* – chap. III.4). Ces espèces peuvent ainsi être implantées sur divers types de substrats, du pied jusqu'en sommet de berge.

3.2.2. Stratégie écologique et morphologie des plantes

Les critères liés à la répartition et à l'autécologie ne sont pas les seuls à intervenir dans le choix des végétaux. Les stratégies adaptatives et attributs morphologiques déterminent également le potentiel d'utilisation de bon nombre d'espèces, ainsi que leur capacité à être intégrées dans les différents types d'ouvrage.

3.2.2.1. Des traits communs : une stratégie écologique pionnière

Le plus souvent, sur les portions de terrain ayant subi un phénomène d'érosion, la terre végétale n'est plus présente, emportée par glissement, par charriage, etc. Rapporter de la terre végétale pour les besoins d'un aménagement peut s'avérer très coûteux et demeure parfois techniquement difficile. Très sensible au ruissellement,

son utilisation nécessite souvent une protection particulière. Dans bon nombre de situations, le substrat ne sera ainsi constitué que des matériaux en place ou d'horizons géologiques inférieurs dont la fertilité est souvent très faible et la granulométrie parfois très grossière. Dans ces situations, les espèces pionnières présentant une capacité à croître sur des sols bruts s'avèrent être des auxiliaires indispensables. Leur croissance rapide en situation de pleine lumière, leurs importantes capacités de reproduction sexuée, de propagation végétative et de dissémination sont des atouts incontestables pour le génie végétal (fig. 2).

Si de nombreuses espèces de saules présentent ce type de comportement (*Salix purpurea*, *S. elaeagnos*, *S. triandra*, etc.), l'utilisation d'autres ligneux pionniers comme l'aulne vert (*Alnus viridis*), le bouleau pendant (*Betula pendula*) ou le tremble (*Populus tremula*) peut également s'avérer pertinente. Parmi les espèces herbacées on recense l'anthyllide vulnérable (*A. vulneraria*), les épilobes (*Epilobium spp.*), les pétasites (*Petasites spp.*) ou encore le tussilage (*Tussilago farfara* – chap. III.5). Ces espèces sont capables de coloniser rapidement les secteurs dénudés, notamment les vides créés par d'éventuelles lacunes de l'ensemencement.

Sensibles à la concurrence d'autres espèces (compétition pour la lumière notamment), les taxons pionniers s'effaceront peu à peu au profit d'espèces plus compétitives. Leur implantation dans un ouvrage permet toutefois d'amorcer la dynamique de végétation favorisant l'installation d'autres espèces plus longévives.

3.2.2.2. Capacité de reproduction végétative

La reproduction végétative est une aptitude à la multiplication d'organes végétaux non sexués permettant la formation d'un nouvel individu. Elle constitue un mode de propagation efficace pour de nombreuses espèces pionnières. Elle est largement mise à profit dans la majorité des techniques de génie végétal pour former de nouvelles plantes à partir d'un fragment de tige ou de racine (en contact avec le sol ou le substratum). Si la reproduction



Fig. 2 - Exemples de comportement pionnier chez : (a) l'aulne vert (*Alnus viridis*) ; (b) l'anthyllide alpestre (*Anthyllis vulneraria* subsp. *alpestris*).



Fig. 3 - Exemples de reproduction végétative chez le saule à trois étamines (*Salix triandra*) : (a) ramille transportée par une crue et échouée sur un banc de sable qui, au contact du substrat, forme de nouvelles racines et de nouvelles tiges aériennes ; (b) bouture plantée dans un substrat brut.

végétative à base de tiges aériennes est possible dans plusieurs genres de végétaux ligneux, ce n'est toutefois qu'avec les saules (*Salix spp.*) qu'elle est praticable sur de grandes surfaces avec un taux de reprise généralement élevé, sans soins particuliers et dans des conditions de croissance pas toujours optimales (fig. 3). Le taux de reprise par reproduction végétative est néanmoins très variable selon les espèces (chap. III.4.4.1).

Même si le bouturage de racines constitue un mode de multiplication particulièrement efficace pour certaines espèces ligneuses (*Alnus incana*, *Berberis vulgaris*, *Corylus avellana*, etc.), cette technique reste toutefois peu applicable dans le domaine du génie végétal.

La reproduction végétative constitue également un mode de propagation pour les herbacées. Certaines espèces peuvent ainsi être multipliées à partir de division de touffes ou de boutures de rhizomes. Cette technique peut être particulièrement pertinente pour intégrer des espèces comme la canche cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*), les calamagrostides (*Calamagrostis spp.*) ou encore les pétasites (*Petasites spp.*) dans certains ouvrages (fascines d'hélophytes notamment).

3.2.2.3. Capacité à former des racines adventives

Si la capacité à former des racines adventives participe à la reproduction végétative, elle présente également un intérêt pour certaines techniques de génie végétal utilisant des plants en racines nues.

Les végétaux présentant cette propriété forment des réseaux racinaires plus importants (fig. 4a), permettant une exploration d'un volume plus élevé du sol et tolérant mieux l'enfouissement, ce qui représente un avantage dans la capacité d'un aménagement à stabiliser un substrat. La capacité à former des racines adventives, permise par la dédifférenciation cellulaire, peut être très variable d'une espèce à l'autre, y compris à l'intérieur d'un même genre. Par exemple, chez les sorbiers (*Sorbus spp.*), le sor-

bier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) en développe abondamment, alors que l'alisier blanc (*Sorbus aria*) n'en forme pas. Le développement de racines adventives est notamment approprié pour les techniques des lits de plants et plançons (fig. 4b) et des caissons en rondins végétalisés.



Fig. 4 - Certaines espèces présentent une capacité naturelle à former des racines adventives, (a) à l'image de cet aulne blanc (*Alnus incana*). Cette propriété est particulièrement adaptée pour les techniques où les végétaux sont partiellement enfouis dans le substrat, (b) à l'exemple des lits de plants et plançons.

Les racines adventives sont des racines se développant à un endroit inhabituel sur la plante, notamment les tiges aériennes. Si dans un premier temps, elles possèdent uniquement un rôle de fixation, elles développent progressivement leur capacité d'absorption pour exercer l'ensemble des fonctions racinaires.

La dédifférenciation cellulaire (ou totipotence) est la régression à l'état embryonnaire d'une cellule différenciée. Elle est susceptible de se produire lorsqu'une cellule a achevé sa différenciation. Elle s'effectue principalement au sein des tissus de réserve de la plante, dits parenchymateux.



Fig. 5 - Deux exemples d'aptitudes à la régénération particulièrement adaptées pour le génie végétal : **(a)** rejets se formant au niveau de la souche déracinée d'un saule faux daphné (*Salix daphnoides*) ; **(b)** charriage d'alluvions grossières sur un cours d'eau de montagne ayant entraîné l'écorçage et l'ensevelissement partiel des tiges aériennes.

3.2.2.4. Capacité de régénération suite à des perturbations

Même si un aménagement de génie végétal est réalisé pour réduire les risques de glissement ou d'érosion, il n'en demeure pas moins exposé à différentes sollicitations mécaniques en fonction de sa situation et de son positionnement sur la berge. Pour être durable et efficace à long terme, un aménagement doit comporter un maximum de plantes présentant un développement vigoureux. Pour cette raison, certaines aptitudes sont recherchées comme, par exemple, la capacité à rejeter de souche après brisure des tiges aériennes (fig. 5a), à cicatriser rapidement ou à résister à un ensevelissement partiel (fig. 5b).

3.2.2.5. Vitesse d'installation et de croissance

La rapidité d'établissement et de développement des végétaux utilisés dans un aménagement augmente l'efficacité des techniques mises en place. Ceci est d'autant

plus vrai que c'est en période initiale de croissance végétale que les techniques peuvent parfois présenter une relative vulnérabilité. Pour les espèces herbacées entrant dans la composition d'un mélange grainier, la faculté de former rapidement une couverture herbacée dense est une caractéristique recherchée afin de limiter le ruissellement et le ravinement.

3.2.2.6. Ancrage du système souterrain

Le principal effet recherché par l'utilisation des végétaux est la stabilisation du sol dérivant du type d'ancrage et de l'évapotranspiration induite par l'activité photosynthétique. Ainsi, les végétaux présentant un rapport élevé entre le volume de l'appareil souterrain et le volume de l'appareil aérien sont à privilégier.

Pour ce qui est des types racinaires, les racines pivotantes se développent en profondeur, tandis que les systèmes traçants et rhizomateux fixent les horizons superficiels du

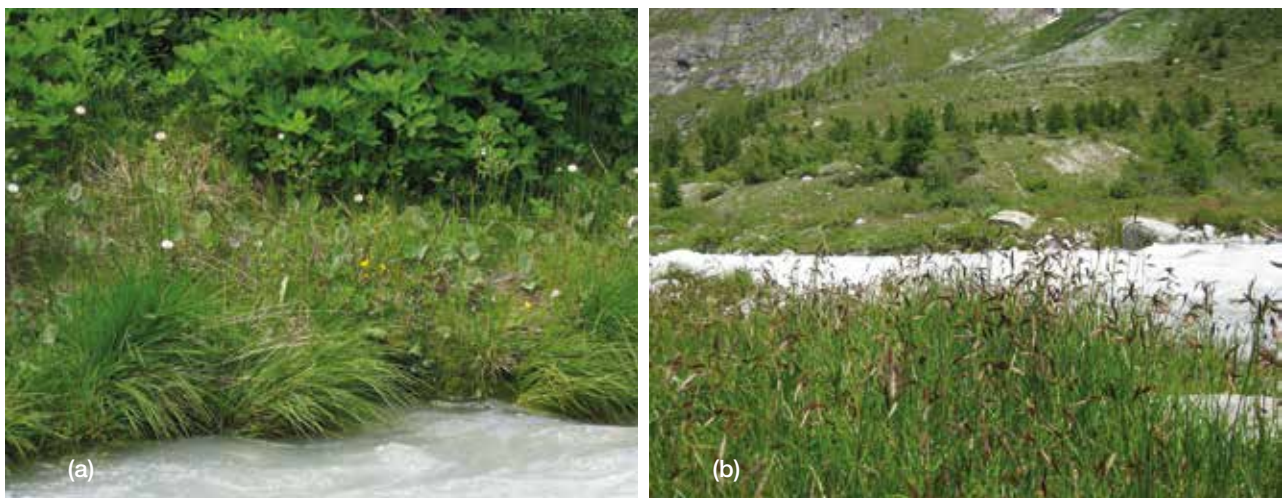


Fig. 6 - Modèle naturel de formation herbacée qui semble supporter les contraintes de pied de berge **(a)** avec notamment la canche gazonnante (*Deschampsia cespitosa*) en pied de berge, le tussilage (*Tussilago farfara*) dans la zone d'interface et l'impéatoire (*Peucedanum ostruthium*) plus en retrait ; une couverture dense est également formée **(b)** par ce peuplement de laiches des régions froides (*Carex frigida*).

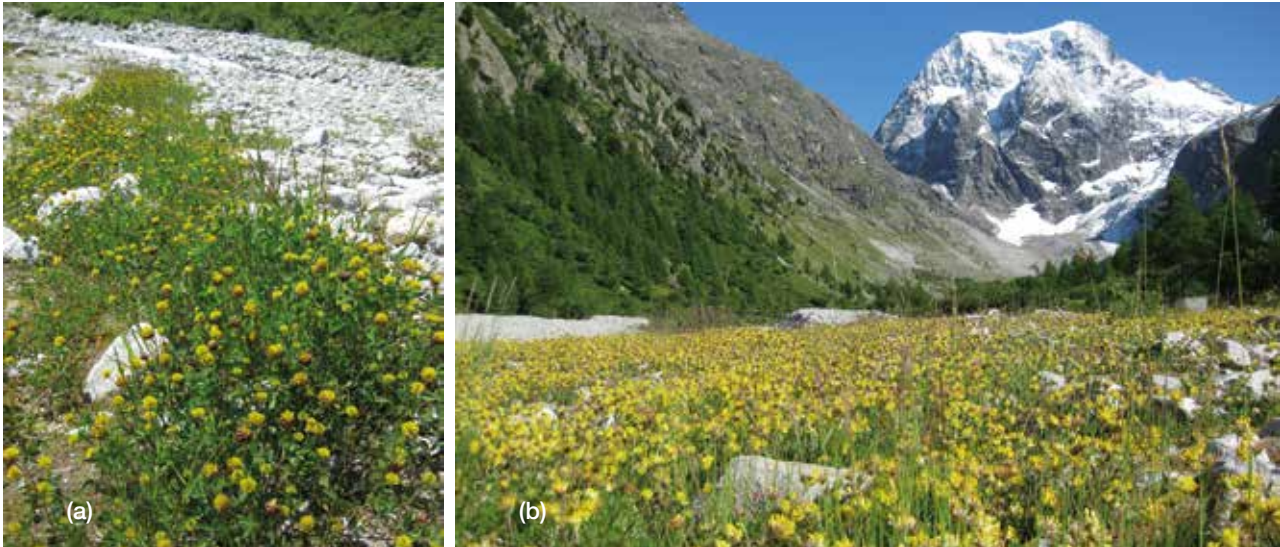


Fig. 7 - Les fabacées couvrent densément le sol et sont précieuses pour la colonisation des substrats bruts (fixation d'azote atmosphérique) à l'image (a) du trèfle brun (*Trifolium badium*), (b) de l'anthyllide alpestre (*Anthyllis vulneraria* subsp. *alpestris*) et du trèfle des neiges (*Trifolium pratense* subsp. *nivale*).

sol. De fait, c'est surtout la combinaison de ces deux types racinaires, permettant d'explorer un plus grand volume de sol et combinant un ancrage vertical et un ancrage horizontal, qui est importante dans l'aménagement. D'autre part, grâce à l'absorption racinaire, les végétaux induisent un second effet stabilisant en participant au drainage du sol.

3.2.2.7. Port et développement

En effectuant un choix d'espèces ligneuses, il est toujours nécessaire d'anticiper le développement futur des végétaux. En effet, dans certaines situations, la présence de grands arbres à l'intérieur d'un aménagement n'est pas souhaitable. C'est le cas notamment des talus très inclinés ou des terrains en mouvement où la présence d'arbres lourds et hauts peut induire des effets de bras de levier qui remettent en cause, à terme, la stabilité du terrain.

D'autres situations ne sont pas favorables à l'implantation d'essences à fort développement, par exemple lorsqu'un aménagement est proche de bâtiments ou d'infrastructures diverses (route, voie ferrée, digues de protection contre les crues, etc.).

En ce qui concerne les espèces herbacées, les types de port ont aussi une incidence importante sur la stabilisation des berges. Les espèces cespitueuses, formant des touffes plus ou moins denses (comme par exemple *Achnatherum calamagrostis*, *Carex paniculata* ou encore *Deschampsia cespitosa* – fig. 6a), permettent de dissiper l'énergie du courant lors de crues et favorisent ainsi le dépôt de sédiments fins. Les espèces rhizomateuses, formant généralement des tapis (comme *Calamagrostis epigeios*, *Epilobium angustifolium*, *Petasites* spp., *Tussilago farfara* ou encore *Carex frigida* – fig. 6b), favoriseront quant à elles la stabilisation et la protection des couches superficielles du sol. Là encore, la combinaison de ces deux types de port permet d'apporter une complémentarité à la couverture du sol (fig. 6 et 7).

3.2.2.8. Souplesse des tiges aériennes

Le pied de berge à l'interface terre-eau est un secteur très fréquemment sollicité par les contraintes d'arrachement et le charriage dès qu'une crue, même de faible ampleur, se produit. Là aussi, des ligneux à tiges souples ou se développant en cépées seront plus adaptés que de grands arbres. En effet, des tiges souples freinent le courant sans opposer trop de résistance et ne créent pas de turbulences (fig. 8). À l'inverse, de grands arbres présentant des troncs rigides offrent une densité végétale bien moindre au niveau du sol et constituent des points durs susceptibles de provoquer des turbulences à l'origine de nouvelles érosions (chap. II.3).

En cas de crue, les espèces herbacées elles aussi se couchent et exercent un certain niveau de protection par effet de couverture. Pour que cette contribution à la protection des berges soit effective, il est nécessaire d'obtenir une couverture plutôt dense (fig. 7) à l'aide de végétaux suffisamment robustes, ce qui exclut d'emblée de nombreuses espèces ne supportant pas la concurrence dans des formations denses dont la couverture au sol avoisine 100 %.

Le courant qui, en cas de crue, pénètre une densité végétale élevée, perd de sa compétence. Les contraintes d'arrachement s'en trouvent notablement réduites, ce qui induit parfois des phénomènes de sédimentation (fig. 8).

3.2.2.9. Dimension et physionomie des tiges aériennes

Les aménagements de génie végétal sont le plus souvent constitués de segments de tiges aériennes de dimensions variables en fonction de la technique utilisée voire même, pour chacune d'elles, en fonction de la partie d'ouvrage concernée. Ainsi, des pieux d'un certain diamètre (environ 10 cm), des branches longues et souples, des boutures plus courtes ou encore des ramilles de faible diamètre



Fig. 8 - La souplesse des tiges, notamment celles des saules, permet à la végétation : **(a)** d'être plaquée au sol lors une crue, favorisant ainsi la couverture du sol ; **(b)** de se relever après perturbation, induisant un effet de frein suffisant pour favoriser la sédimentation.

peuvent être prélevés sur différentes espèces ligneuses, le plus souvent sur des saules (fig. 9a). En fonction de leur stade de croissance et de leur taille, toutes les espèces ne sont pas à même de fournir toutes les qualités de matériaux. Par exemple, il est rare de pouvoir prélever des pieux sur des espèces exclusivement buissonnantes (comme *Salix purpurea*), voire arbustives (comme *Salix myrsinifolia*), le diamètre de leurs branches ou de leur tronc atteignant trop rarement les dimensions recherchées.

D'autres espèces présentant d'excellentes aptitudes à la reproduction végétative sont parfois difficilement utilisables dans un aménagement en raison de la relative fragilité de leurs tiges aériennes. Il est par exemple difficile de confectionner des boutures résistant au battage à partir de la myricaire (*Myricaria germanica*), pourtant très adaptée à

d'autres égards (écologie, port, taux de reprise, etc.). Ainsi, pour cette espèce, il n'y a guère qu'une implantation sous forme de ramilles qui puisse être envisagée sur des chantiers mettant en œuvre de grandes quantités de matériaux végétaux. Enfin, la physionomie des branches, et notamment leur forme plus ou moins régulière, intervient également dans le choix des espèces. Il est par exemple difficile de se fournir en grandes quantités de boutures droites, de 60 à 80 cm et d'un diamètre suffisant, uniquement avec le saule de Suisse (*Salix helvetica* – fig. 9b). D'autres espèces de petite taille, comme les saules fétide (*Salix foetida*) et bleuâtre (*S. caesia*), ne pourront également pas fournir de longues branches nécessaires à la confection de fascines pour le pied de berge.



Fig. 9 - **(a)** Le développement des tiges aériennes dans ce fourré de saule pourpre (*Salix purpurea*) est idéal pour un prélèvement de branches pour fascines et tressage, de boutures et de ramilles ; dans de tels cas, le prélèvement se fait par simple recépage à la base des tiges. **(b)** Chez certaines espèces subalpines, le faible diamètre des branches ainsi que leur forme souvent tortueuse rendent les prélèvements de certains types de fourniture difficile, à l'exemple ici du saule de Suisse (*Salix helvetica*).

3.2.3. Autres critères

Les critères liés à la morphologie et à la physiologie des espèces ne sont pas les seuls à entrer en considération dans le choix des végétaux. Le statut des espèces utilisées (protection et vulnérabilité) ainsi que la valeur biologique, écologique et paysagère de l'aménagement sont également à considérer.

3.2.3.1. Abondance et statuts

Au sein de l'Arc alpin, le statut des espèces peut être très différent d'une région à l'autre. La législation sur les espèces protégées diffère ainsi d'un pays à un autre, mais aussi d'une région administrative à une autre (législation cantonale, régionale ou départementale). Le niveau de protection de chaque espèce peut également varier en fonction de l'espèce considérée (protection partielle ou totale en Suisse, protection stricte ou régime d'autorisation en France). Dans certains cas, des autorisations de récolte peuvent être demandées aux autorités compétentes. Il est donc nécessaire de s'informer et de ne pas envisager des prélèvements en milieu naturel pour les espèces vulnérables ou bénéficiant d'un statut de protection.

Notons toutefois que les règlements ne tiennent pas compte du fait qu'un prélèvement de segments de tiges aériennes, sur une espèce capable de reproduction végétative, ne remet pas en cause l'existence de la plante. L'opération favorise même sa propagation et, dans une certaine mesure, sa vitalité. Cet argument peut, dans certains cas, motiver une demande d'autorisation de récolte de certaines espèces protégées.

Pour plus d'informations sur la protection des espèces végétales (cadre légal, listes des espèces, demandes d'autorisation), se référer aux liens suivants :

http://www.cps-skew.ch/cadre_legal/plantes_protegees.html

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Faune-et-flore-.html>

Les sites suivants permettent également d'obtenir une information détaillée espèce par espèce :

<http://inpn.mnhn.fr/accueil/index>

<http://www.infoflora.ch/fr/flore/>

Par ailleurs, certaines espèces ne bénéficiant pas d'un statut de protection peuvent être rares à l'échelle locale. On évitera donc de les utiliser en grande quantité dans des projets d'aménagement, ne serait-ce que pour ne pas rendre trop contraignante la recherche de fournitures lorsqu'elle consiste en un prélèvement en milieu naturel.

Il est enfin important de noter qu'il existe, en France comme en Suisse, une législation spécifique sur la production et la commercialisation des graines, semences et plants forestiers.

La directive européenne 99/105 régit la commercialisation des graines et plants forestiers. Cette réglementation a été transposée en droit français dans le Code forestier (articles L. et R. 153 et suivants). Les espèces réglementées (bénéficiant d'une traçabilité sur l'origine)

sont listées dans l'annexe 1 de l'arrêté ministériel modifié du 24 octobre 2003 relatif à la commercialisation des matériels forestiers de reproduction (MFR). En Suisse, l'ordonnance sur le matériel forestier de reproduction du 29 novembre 1994 fixe elle aussi une liste d'espèces faisant l'objet d'un certain nombre de restrictions quant à leur production et commercialisation. Cette réglementation est traduite de manière plus ou moins similaire en France et en Suisse. Elle s'applique aux semences, plants ou parties de plantes destinés à des fins forestières et permet de mettre en place une chaîne de traçabilité sur l'origine des MFR (du lieu de récolte au lieu de plantation). Elle permet ainsi aux utilisateurs d'avoir l'assurance qu'ils ne sont pas trompés par leurs fournisseurs sur l'origine et la qualité des graines et plants achetés pour leurs plantations. Celles-ci sont considérées comme ayant des fins forestières lorsqu'elles sont réalisées dans des conditions techniques compatibles avec la production de bois à titre principal ou lorsqu'elles sont susceptibles d'avoir un impact sur les ressources génétiques des arbres forestiers. Dans ce cadre, les ripisylves font partie intégrante du territoire forestier national, aussi bien en Suisse qu'en France. Ces réglementations prévoient plusieurs catégories (sélectionnée, qualifiée, testée et identifiée) pour lesquelles les niveaux d'exigence sont variables.

Concernant les plantes herbacées, la directive européenne 66/401 régit la production en vue de la commercialisation de semences de plantes fourragères à l'intérieur de la Communauté. Cette directive est traduite par différents textes de droit français, dont le règlement technique annexe des semences certifiées de plantes fourragères homologué par arrêté ministériel du 29 juin 2010, et l'arrêté de commercialisation du 15 septembre 1982 relatif à la commercialisation des semences fourragères. Pour un certain nombre d'espèces listées dans cet arrêté, il est interdit de commercialiser des variétés autres que celles qui sont certifiées. Cela signifie que, pour ces espèces, l'on ne peut utiliser que des semences ayant fait l'objet d'une certification même si ces variétés n'ont pas nécessairement les caractéristiques écologiques requises, notamment vis-à-vis de l'altitude. Une telle réglementation existe également en Suisse (ordonnance du DFE sur les semences et plants du 7 décembre 1998). Toutefois, en Suisse, celle-ci ne s'applique pas aux mélanges de semences destinés à des utilisations autres qu'à des fins d'affouragement (comme par exemple la stabilisation des talus et berges de cours d'eau).

Des informations détaillées sur ces réglementations sont accessibles aux adresses suivantes :

<http://agriculture.gouv.fr/Presentation-de-la-reglementation>

http://www.admin.ch/ch/f/rs/921_552_1/index.html

3.2.3.2. Fonctions annexes

Bien que l'efficacité technique d'un ouvrage de génie végétal représente toujours l'objectif prioritaire d'un aménagement, la structure végétale mise en place peut également assurer d'autres fonctions. Considérées comme annexes, elles contribuent à la création de structures privilégiées pour les déplacements de la faune (fonction de corridors), de zones de refuge temporaire, de garde-manger ou de sites de reproduction, voire même de milieu vital à part entière. L'importance plus ou moins prononcée de ces fonctions, qui influenceront également le choix des végétaux, dépend notamment des dimensions de l'aménagement et de sa localisation géographique.

Les aménagements constituent ainsi des réservoirs d'espèces végétales, animales et fongiques et contribuent pleinement à la conservation de la biodiversité, assurant une plus-value biologique et écologique à la fonction mécanique première.

Le génie végétal permet également une intégration paysagère des ouvrages de protection contre les crues, du moins en milieu naturel et semi-naturel ; intégration qui sera d'autant plus réussie si la référence aux modèles naturels est effective et si un effort de diversification est réalisé au niveau du choix des végétaux.

Dans des contextes particuliers, notamment en espace bâti, la valeur paysagère de l'ouvrage peut également être prise en considération, en favorisant certains types de feuillages ou des espèces présentant des floraisons ou fructifications abondantes et/ou de haute valeur ornementale : floraisons du saule faux daphné et du merisier à grappes, feuillages luisants du saule laurier et du saule faux daphné, feuillage léger du saule drapé, fructifications de l'épine-vinette ou du sorbier des oiseleurs, couleur automnale des feuillages de l'érable sycomore et du merisier à grappes, etc.

3.2.3.3. Recherche de diversité

Lorsque les techniques mises en œuvre le permettent et que les conditions locales le justifient, la diversification des espèces utilisées est hautement recommandée. Elle permet de mieux remplir ces fonctions qualifiées de secondaires et d'obtenir des formations végétales présentant une diversité spécifique mais aussi structurelle. Si certaines techniques se prêtent particulièrement à la diversification (par ex. les lits de plants et plançons), de simples plantations peuvent accompagner d'autres techniques pour satisfaire cet objectif.

Ce sont souvent les conditions de croissance, variant très fortement dans le profil transversal allant du pied jusqu'au sommet de berge, qui imposent la nécessité d'élargir le choix des végétaux (fig. 10). Une plus grande diversité végétale constitue ainsi une forme d'assurance lorsque les conditions de croissance sont hétérogènes. On garantit ainsi une quantité suffisante de végétaux présentant une croissance vigoureuse, assurant ainsi l'efficacité de l'ouvrage.



Fig. 10 - L'aménagement des sommets de berge sur des substrats grossiers et filtrants nécessite une adaptation de la composition botanique à la xéricité de l'endroit, et l'implantation d'espèces mésophiles, voire xérophiles, même en contexte alluvial.

3.3. En synthèse

Le choix de végétaux est une étape clé de la démarche d'aménagement. Il nécessite une connaissance précise des objectifs à atteindre. Les objectifs techniques de protection de surfaces, de stabilisation des berges en profondeur, de reconstitution de biotope, etc. sont à considérer, de même que les fonctions secondaires de l'aménagement, telles les fonctions de corridor biologique, d'abri, de lieu de reproduction, de source de nourriture. Pour réaliser ces objectifs, on veillera à utiliser des végétaux variés et complémentaires. On s'inspirera de modèles naturels présents à proximité, tant pour le choix des espèces que pour leur positionnement sur la berge (chap. III.2), en considérant que les formations végétales en place sont adaptées aux contraintes mécaniques et écologiques de leur milieu.

Les principales caractéristiques biologiques et exigences écologiques des espèces sont des éléments indispensables permettant de choisir les « bons » végétaux garantissant l'efficacité et la fonctionnalité d'un aménagement, soit :

- la morphologie et le volume du système racinaire ;
- l'aptitude à la multiplication végétative ;
- la résistance à la submersion et aux diverses sollicitations mécaniques ;
- les vitesses et stratégies de croissance.

Le rôle de l'appareil souterrain dans la fixation des sols est primordial. La comparaison entre le volume du système souterrain et celui des parties aériennes est un indicateur pertinent de la résistance aux forces d'arrachement ou aux contraintes éoliennes. Les parties aériennes jouent également un rôle important, notamment dans la dissipation de l'énergie hydraulique. Ce sont principalement les végétaux arbustifs et buissonnants qui, de par leur ramure souple et dense, provoquent un « effet de peigne » ralentissant la vitesse du courant et limitant les remous et turbulences.

Afin d'améliorer la pérennité des ouvrages, il est recommandé d'utiliser un maximum d'espèces indigènes complémentaires dans leur morphologie et leur physiologie.

4. Description des espèces

4.1. Sélection des végétaux présentés

Le choix des végétaux présentés pour une utilisation en génie végétal a été largement conditionné par leur caractère structurant dans les milieux naturels (chap. III.2.), ainsi que par leurs caractéristiques biotechniques particulières (chap. III.3.). Trente espèces ligneuses et vingt espèces herbacées ont ainsi été retenues. Vingt espèces complémentaires actuellement non ou peu utilisées sont également présentées de façon succincte.

En premier lieu, les espèces sélectionnées doivent être indigènes. La résistance aux contraintes mécaniques et l'adaptation aux conditions stationnelles du site constituent également des critères fondamentaux à prendre en compte.

4.1.1. Espèces ligneuses

En ce qui concerne le choix des espèces ligneuses, les critères suivants ont été pris en compte :

- la répartition géographique ;
- la présence de l'espèce dans des groupements végétaux riverains montagnard ou subalpin ;
- les capacités de croissance et de colonisation (port, aptitudes à la reproduction végétative, rapidité de croissance, etc.) ;
- les effets sur la protection des berges et sur le cours d'eau.

Les 30 espèces ligneuses présentées sont :

Arbres / arbustes

<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore
<i>Alnus incana</i>	Aulne blanc
<i>Betula pendula</i>	Bouleau pendant
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun
<i>Prunus padus</i>	Merisier à grappes
<i>Salix caprea</i>	Saule marsault
<i>Salix daphnoides</i>	Saule faux daphné
<i>Salix pentandra</i>	Saule laurier
<i>Sorbus aucuparia</i>	Sorbier des oiseleurs
<i>Sorbus mougeotii</i>	Alisier de Mougeot

Arbrisseaux hauts (> 2 m)

<i>Alnus viridis</i>	Aulne vert
<i>Berberis vulgaris</i>	Épine-vinette
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Argousier
<i>Laburnum alpinum</i>	Cytise des Alpes
<i>Salix appendiculata</i>	Saule appendiculé
<i>Salix elaeagnos</i>	Saule drapé
<i>Salix laggeri</i>	Saule de Lager
<i>Salix myrsinifolia</i>	Saule noircissant
<i>Salix purpurea</i>	Saule pourpre
<i>Salix triandra</i>	Saule à trois étamines
<i>Sambucus racemosa</i>	Sureau à grappes

Arbrisseaux bas (< 2 m)

<i>Myricaria germanica</i>	Myricaire
<i>Ribes alpinum</i>	Groseillier des Alpes
<i>Rosa pendulina</i>	Rosier des Alpes
<i>Salix aurita</i>	Saule à oreillettes
<i>Salix caesia</i>	Saule bleuâtre
<i>Salix foetida</i>	Saule fétide
<i>Salix glaucosericea</i>	Saule glauque
<i>Salix hastata</i>	Saule hasté
<i>Salix helvetica</i>	Saule de Suisse

4.1.2. Espèces herbacées

Les critères de sélection des espèces herbacées ont porté sur la densité de la couverture du sol (protection de surface) ainsi que le volume et le type de développement du système racinaire (effet d'ancrage). Comme pour les végétaux ligneux, la présence dans des groupements végétaux riverains aux étages montagnard et subalpin, la capacité à coloniser des surfaces au substrat brut et la position par rapport au cours d'eau ont été pris en compte. D'autres indications telles que la résistance aux forces d'arrachement, aux inondations ou à la sécheresse ont été considérées.

Pour une meilleure complémentarité entre les espèces au sein d'un aménagement (densité de la couverture végétale, système racinaire, vitesse de croissance), le choix a été porté sur treize graminées, cinq légumineuses, une cypéracée et une autre dicotylédone. La dominance des graminées dans le choix des végétaux herbacés provient notamment de leur capacité à créer une couverture dense et à résister aux forces d'arrachement. Les fabacées offrent, quant à elles, une couverture rapide du sol et un enrichissement de celui-ci en azote.

Les 20 espèces herbacées présentées sont :

Graminées

<i>Achnatherum calamagrostis</i>	Calamagrostide argentée
<i>Agrostis capillaris</i>	Agrostide capillaire
<i>Agrostis schraderiana</i>	Agrostide de Schrader
<i>Avenula pubescens</i>	Avoine pubescente
<i>Brachypodium rupestre</i>	Brachypode des rochers
<i>Calamagrostis epigejos</i>	Calamagrostide commune
<i>Calamagrostis varia</i>	Calamagrostide bigarrée
<i>Deschampsia cespitosa</i>	Canche cespiteuse
<i>Festuca laevigata</i>	Fétuque courbée
<i>Festuca nigrescens</i>	Fétuque noirâtre
<i>Phleum alpinum</i>	Fléole des Alpes
<i>Poa alpina</i>	Pâturin des Alpes
<i>Trisetum flavescens</i>	Avoine dorée

Légumineuses

<i>Anthyllis vulneraria</i>	Anthyllide vulnéraire
<i>Lotus corniculatus</i>	Lotier corniculé
<i>Onobrychis montana</i>	Sainfoin des montagnes
<i>Trifolium badium</i>	Trèfle brun
<i>Trifolium montanum</i>	Trèfle des montagnes

Cypéracées

<i>Carex paniculata</i>	Laiche paniculée
-------------------------	------------------

Autre dicotylédone

<i>Leontodon hispidus</i>	Liondent hispide
---------------------------	------------------

Épilobes

<i>Epilobium angustifolium</i>	Épilobe à feuilles étroites
<i>Epilobium dodonaei</i>	Épilobe à feuilles de romarin
<i>Epilobium fleischeri</i>	Épilobe de Fleischer
<i>Epilobium hirsutum</i>	Épilobe hirsute

Valérianes

<i>Valeriana montana</i>	Valériane des montagnes
<i>Valeriana officinalis</i>	Valériane officinale
<i>Valeriana tripteris</i>	Valériane triséquée

Grandes ombellifères

<i>Chaerophyllum hirsutum</i>	Cerfeuil hirsute
<i>Laserpitium latifolium</i>	Laser à larges feuilles
<i>Peucedanum ostruthium</i>	Impéatoire

Trèfles pionniers

<i>Trifolium pallescens</i>	Trèfle pâle
<i>Trifolium thalii</i>	Trèfle de Thal

Ces dernières sont présentées succinctement à la suite des 50 fiches espèces (chap. III.5.).

4.1.3. Autres herbacées

Vingt espèces complémentaires, actuellement non ou peu utilisées en génie végétal et structurantes de milieux naturels, ont ensuite été sélectionnées d'après leur morphologie et leur stratégie écologique :

Composées à larges feuilles

<i>Adenostyles alliariae</i>	Adénostyle à feuilles d'alliaire
<i>Adenostyles glabra</i>	Adénostyle des Alpes
<i>Adenostyles leucophylla</i>	Adénostyle à feuilles blanches
<i>Petasites albus</i>	Pétasite blanc
<i>Petasites hybridus</i>	Pétasite hybride
<i>Petasites paradoxus</i>	Pétasite paradoxal
<i>Tussilago farfara</i>	Tussilage

Graminée rhizomateuse

<i>Calamagrostis pseudophragmites</i>	Calamagrostide faux roseau
---------------------------------------	----------------------------

1

Acer pseudoplatanus L.
Erable sycamore
Aceracées

Description

- L'érable sycamore est un arbre de grande taille, pouvant atteindre 20 à 30 m.
- L'écorce d'abord lisse, gris jaunâtre, brun-rouge (fig. 2), se desquamant avec l'âge. Les jeunes rameaux, glabres, brun-gris, sont couverts de poils courts (fig. 3).
- Les bourgeons sont ovoïdes, à écailles glabres, vert clair et bordés de brun (fig. 3), le terminal étant plus grand que les axillaires.
- Les feuilles, opposées, à nervation palmée, sont mates dessus (fig. 4) et vert blanchâtre au revers (fig. 5). Elles sont composées de 5 lobes triangulaires inégalement dentés, séparés par des échancrures profondes et étroites.
- Les fleurs, petites et verdâtres, sont rassemblées en panicule terminale pendante longue de 3 à 8 cm (fig. 6).
- Les fruits (doubles samares), en forme de U ou de V ouvert (angle presque droit entre les 2 samares), mesurent de 2 à 6 cm (fig. 7).
- La floraison a lieu d'avril à mai, après la feuillaison.




Fig. 1 - Plant arborescent.




Fig. 2 - Ecorce du tronc brun-rouge.




Fig. 3 - Bourgeons ovoïdes à écailles vert clair bordées de brun.




Fig. 4 - Feuille à échancrures profondes.




Fig. 5 - Feuille vert blanchâtre au revers.

174

4

Écologie

- L'érable sycamore est une espèce très commune, présente dans différents types de forêts de feuillus (forêts de ravin, aulnaies blanches, frênaies, hêtraies, pessières, sapinières, chênaies-charmaies, boisements rudéraux, etc.) et zones forestières (en situation pionnière). Il colonise préférentiellement les secteurs à humidité atmosphérique élevée.
- Il croît sur des sols à granulométrie variable (limons, sables, graviers, blocs), généralement assez profonds, frais et aérés, basiques à légèrement acides, riches en nutriments.
- Il présente un optimum écologique dans les forêts fraîches de ravin (Frilo-Acerion).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).




Fig. 6 - Inflorescence en panicule pendante.




Fig. 7 - Samares en V ouvert.

175

Utilisation en génie végétal

L'érable sycamore est largement utilisé en aménagement, notamment comme arbre d'alignement en milieu urbanisé, mais aussi pour la création de haies et la restauration des terrains de montagne. Il offre également un très bon potentiel en génie végétal, en particulier pour la stabilisation des berges des rivières de montagne.

Doté d'un système racinaire ramifié très étendu, d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et d'une croissance juvénile rapide, il est capable de se développer dans des terrains à forte pente régulièrement perturbés (fig. 8). Il supporte ainsi de nombreux chocs sans que ceux-ci n'affectent significativement sa vitalité (forte capacité de cicatrisation et de régénération par recépéage). La destruction d'une partie de son système racinaire ne ralentit que faiblement sa croissance et favorise même, à long terme, le développement de racines plus longues (Hippes et al. 1996). Résistant à l'ensevelissement, il est capable de supporter un recouvrement important de la base de son tronc par des matériaux gravello-terreux. Suite à un recouvrement prolongé, il va créer rapidement des racines adventives utiles pour fixer les couches superficielles du sol. Certains individus peuvent ainsi supporter un recouvrement de la base du tronc de près de 30 % de leur hauteur (Schiechtel 1973). Sa grande amplitude écologique, sa résistance au froid et à la sécheresse, permettent de l'utiliser dans un grand nombre de situations, y compris sur des substrats bruts drainants jusqu'à 2 000 m d'altitude (Pandera 2006). Il est aussi tolérant au sel, ce qui autorise une implantation à proximité immédiate de routes régulièrement déneigées en hiver.

Les essais de bouturage en laboratoire à l'aide d'hormones de croissance synthétiques ont permis d'atteindre un taux de réussite de 96 % (Schiechtel 1973). Les essais de reproduction végétative en conditions naturelles n'étant toutefois pas aussi satisfaisants, l'utilisation de plants en racines neuvra être privilégiée. Sa capacité à produire des racines adventives permet d'intégrer cette espèce dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés. Toutefois, en limiter son utilisation ou on l'évitera sur les pentes trop inclinées, pour les effets de bras de levier qu'il est susceptible de produire à l'état adulte. Ce problème peut toutefois se résoudre par un entretien régulier (recépéage). De par sa faible tolérance à l'immersion prolongée et la formation d'un tronc rigide à l'état adulte, il est déconseillé de l'utiliser en pied de berge. Il pourra notamment être associé à l'aune blanc (*Alnus incana*), au bouleau pendule (*Betula pendula*), au frêne (*Fraxinus excelsior*), au tremble (*Populus tremula*) ou encore aux saules marsault (*Salix caprea*) et appendiculé (*S. appendiculata*).

L'érable sycamore est facilement disponible dans le commerce. Compte tenu de la présence de nombreux cultivars utilisés en ornement, une attention particulière devra être portée à l'utilisation de plants indigènes de provenance locale. La production et la commercialisation de plants d'érable sycamore à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en France et en Suisse (chap. III.3.2.4).

5

Fig. 1 - Vue générale d'une fiche espèce.

4.2. Comment lire une fiche espèce ?

La présentation des espèces susceptibles d'être utilisées en génie végétal s'organise en cinq rubriques illustrées par des photographies inédites (fig. 1).

1 Nomenclature

Toutes les fiches sont classées par ordre alphabétique selon le nom latin. Le nom latin correspond au nom scientifique valide de l'espèce. Dans un souci de simplification, les synonymes n'ont pas été indiqués sur les fiches. Les plus usités sont cependant listés page 313.

Le nom français est issu des flores françaises ou suisses de référence utilisées dans la région considérée, comme la Flore de la Suisse et des territoires limitrophes (Aeschimann et Burdet 1994), *Flora Helvetica* (Lauber et Wagner 1998), *Flora Alpina* (Aeschimann et al. 2004), *Flora vegetativa* (Eggenberg et Möhl 2008) ou encore la *Flore forestière française* (Rameau et al. 1993). En cas de divergence entre ces ouvrages, un choix arbitraire a été effectué.

2 Description

Ce chapitre présente les traits morphologiques de l'espèce et leur variabilité, l'éventuelle présence de sous-espèces et les confusions possibles avec d'autres taxons.

Les traits morphologiques présentés concernent :

- le port (type biologique, hauteur, etc.) ;
- les rameaux (couleur, pilosité, etc.) ;
- les bourgeons (forme, disposition, taille, etc.) ;
- les feuilles (forme, disposition, taille, couleur, etc.) ;
- les fleurs et inflorescences (type, couleur, etc.) ;
- les fruits (type, forme, taille, couleur, etc.).

La description d'éventuelles sous-espèces ne concerne que les taxons présents dans les Alpes du Nord occidentales. Seuls les traits distinctifs de ces dernières sont succinctement présentés. Les autres sous-espèces existantes sont mentionnées à titre indicatif.

Les confusions possibles avec d'autres espèces morphologiquement proches sont mentionnées. Des critères diagnostiques discriminants sont indiqués à toutes fins utiles.

Les traits morphologiques et les critères différentiels présentés sont issus de la démarche et des sources suivantes :

- une synthèse des données de la littérature floristique franco-suisse de référence (voir ci-dessus) ;
- une évaluation des données collectées par confrontation aux échantillons d'herbiers des collections de référence des Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève (prise de mensuration, vérification des critères qualitatifs). Lors de cette étape, les récoltes provenant des subdivisions administratives concernées par le projet (Berne, Fribourg, Valais,

Vaud, Haute-Savoie, Isère, Savoie) ont été privilégiées afin de fournir une description la plus appropriée possible ;

- une acquisition de données biométriques nouvelles relatives aux dimensions et à la disposition des bourgeons du genre *Salix* issues d'échantillons fraîchement collectés ou des herbiers personnels des auteurs ; ces données ont par la suite fait l'objet d'analyses statistiques élémentaires ;
- des observations personnelles de terrain.

3 Distribution et vulnérabilité

Ce chapitre se subdivise en trois points :

- la distribution mondiale ;
- la distribution au sein du territoire franco-suisse ;
- la distribution et la vulnérabilité dans les Alpes du Nord.

Le premier point est issu de différentes sources bibliographiques, notamment *Flora Alpina* (op. cit.), *Flora Europaea* (Tutin et al. 1964-1980) et *Atlas Florae Europaea* (Jalas et Suominen 1972-1999 ; Kurtto et Lampinen 2004-2010).

Les distributions nationales ont été appréciées à partir de la consultation des sites Internet du *Centre national de données et d'informations sur la flore de Suisse* (*Info Flora* – www.crsf.ch) et de la *Flore électronique française* en ligne (www.tela-botanica.org), ainsi que de quelques publications spécialisées.

La distribution au sein des Alpes du Nord a été appréciée à partir des indications figurant dans *Flora Alpina* (op. cit.), le *Catalogue départemental de la Haute-Savoie* (Charpin et Jordan 1990-1992) et la *Liste commentée des plantes vasculaires de Savoie* (Delahaye et Prunier 2006).

La vulnérabilité est issue des indications de la *Liste rouge des fougères et plantes à fleurs menacées de Suisse* (Moser et al. 2002) et du *Catalogue de la flore vasculaire de la région Rhône-Alpes* (CBNA et CBNMC 2011).

4 Écologie

Ce chapitre présente :

- les milieux de vie de l'espèce (habitats et exigences en termes de lumière) ;
- les exigences édaphiques (granulométrie, pH, humidité, teneur en nutriments, etc.) ;
- l'optimum phytosociologique (communauté végétale où l'espèce trouve son optimum de développement) ;
- la répartition altitudinale (étage de végétation).

Dans la mesure du possible et selon l'état des connaissances à disposition, ces exigences ont été précisées pour les différentes sous-espèces présentes dans les Alpes du Nord.

Les sources qui ont permis de synthétiser ces différents éléments sont :

- la *Base de données phytosociologiques suisse* de Robert Pantke (1997) ;
- les ouvrages tels que le *Guide des milieux naturels de Suisse* (Delarze et Gonseth 2008), *Flora Alpina* (op. cit.) ou la *Flore forestière française* (op. cit.) et diverses publications spécialisées ;
- les analyses pédologiques non publiées conduites ces dernières années par les diplômants d'hepia (Kölher 2006 ; Greulich 2008 ; Greuter 2011) ;
- les observations personnelles des auteurs.

5 Utilisation en génie végétal

Ce chapitre s'articule autour de six points à prendre en compte pour une utilisation de l'espèce en génie végétal :

- les aptitudes biotechniques découlant des caractéristiques morphologiques (port, type d'enracinement, rapport entre le volume de l'appareil souterrain et le volume du système aérien – noté « rapp. vol. syst. sout./aérien », souplesse des tiges, résistance mécanique) ;
- les exigences écologiques déterminant l'éventuelle possibilité d'implantation de l'espèce (limites altitudinales, position sur la berge, optimum édaphique, exigences en lumière) ;
- les caractéristiques physiologiques déterminant l'aptitude et les modalités de croissance de l'espèce (type de croissance et de développement, rapidité de colonisation, capacité à produire des racines adventives, taux de reprise au bouturage, viabilité des semences) ;
- les compositions végétales à privilégier en tenant compte des associations naturelles (autres espèces ayant des exigences écologiques et/ou des caractéristiques biotechniques similaires ou complémentaires) ;
- l'adéquation de l'espèce aux techniques existantes (lits de plants et plançons, fascines, caissons en rondins végétalisés, bouturage) ;
- la disponibilité dans le commerce (semences, plants en racines nues, plants en motte, boutures) et les possibilités de prélèvement en milieu naturel (fréquence, vulnérabilité, modes de prélèvement, protection).

Ce chapitre s'appuie sur une synthèse bibliographique de différents ouvrages de référence et autres publications spécialisées (articles scientifiques, monographies, actes de colloques) : Barker 1995, Crozat 2005, Dinger 1997, Donat 1995, Florineth 2004, Lachat 1994, Morgan et Rickson 1995, Norris et al. 2008, Rey et al. 2003, Schiechtl 1973, Schiechtl 1992, Stokes et al. 2007, Zeh 2007, etc. Il s'appuie également sur différents retours d'expériences, obtenus lors de ce projet ou dans d'autres cadres.

4.3. Présentation des 50 espèces

Acer pseudoplatanus L.

Érable sycomore

Aceracées

Description

- L'érable sycomore est un arbre caducifolié au tronc droit, pouvant atteindre 20 à 30 m (fig. 1).
- L'écorce d'abord lisse, gris jaunâtre puis brun-rouge (fig. 2), se desquame avec le temps. Les jeunes rameaux, glabres, brun-gris, sont opposés (fig. 3).
- Les bourgeons sont ovoïdes, à écailles glabres, vert clair et bordées de brun (fig. 3), le terminal étant plus grand que les axillaires.
- Les feuilles, opposées, à nervation palmée, sont mates dessus (fig. 4) et vert blanchâtre au revers (fig. 5). Elles sont composées de 5 lobes triangulaires inégalement dentés, séparés par des échancrures profondes et étroites.
- Les fleurs, petites et verdâtres, sont rassemblées en panicule terminale pendante longue de 3 à 8 cm (fig. 6).
- Les fruits (doubles samares), en forme de U ou de V ouvert (angle presque droit entre les 2 samares), mesurent de 2 à 6 cm (fig. 7).
- La floraison a lieu d'avril à mai, après la feuillaison.



Fig. 1 - Port arborescent.



Fig. 4 - Feuille à échancrures profondes.



Fig. 2 - Écorce du tronc brun-rouge.



Fig. 3 - Bourgeons ovoïdes à écailles vert clair bordées de brun.



Fig. 5 - Feuille vert blanchâtre au revers.

- L'érable sycomore se distingue des autres érables (*A. opalus* et *A. platanoides* notamment) par ses feuilles aux échancrures aiguës et ses fleurs rassemblées en panicule (et non en corymbe).

Distribution et vulnérabilité

L'érable sycomore est surtout présent dans les régions montagneuses d'Europe centrale et orientale. Il est commun sur l'ensemble du territoire franco-suisse à l'exception du sud et de l'ouest de la France (Bretagne, Pyrénées et Côte d'Azur notamment), où il est toutefois régulièrement planté.

Cette espèce est très fréquente sur l'ensemble des Alpes du Nord.

Écologie

- L'érable sycomore est une espèce post-pionnière ubiquiste de demi-ombre se rencontrant dans différents types de forêts de feuillus et de conifères (forêts de ravins, aulnaies blanches, frênaies, hêtraies, pessières, sapinières, chênaies-charmaies, boisements rudéraux, etc.) et accrus forestiers (en situation pionnière). Il colonise préférentiellement les secteurs à humidité atmosphérique élevée.
- Il croît sur des sols à granulométrie variable (limons, sables, graviers, blocs), généralement assez profonds, frais et aérés, basiques à légèrement acides, riches en nutriments.
- Il présente un optimum écologique dans les forêts fraîches de ravins (*Tilio-Acerion*).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 6 - Inflorescence en panicule pendante.



Fig. 7 - Samares en V ouvert.

Utilisation en génie végétal

L'érable sycomore est largement utilisé en aménagement, notamment comme arbre d'alignement en milieu urbanisé, mais aussi pour la création de haies et la restauration des terrains de montagne. Il offre également un très bon potentiel en génie végétal, en particulier pour la stabilisation des berges des rivières de montagne.

Doté d'un système racinaire ramifié très étendu, d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et d'une croissance juvénile rapide, il est capable de se développer dans des terrains à forte pente régulièrement perturbés (fig. 8). Il supporte ainsi de nombreux chocs sans que ceux-ci n'affectent significativement sa vitalité (forte capacité de cicatrisation et de régénération par recépage). La destruction d'une partie de son système racinaire ne ralentit que faiblement sa croissance

et favorise même, à long terme, le développement de racines fines plus longues (Hippis *et al.* 1996). Résistant à l'ensevelissement, il est capable de supporter un recouvrement important de la base de son tronc par des matériaux gravo-terreux. Suite à un recouvrement prolongé, il va créer rapidement des racines adventives utiles pour fixer les couches superficielles du sol. Certains individus peuvent ainsi supporter un recouvrement de la base du tronc de près de 30 % de leur hauteur (Schiechtel 1973). Sa grande amplitude écologique, sa résistance au froid et à la sécheresse, permettent de l'utiliser dans un grand nombre de situations, y compris sur des substrats bruts drainants jusqu'à 2 000 m d'altitude (Pandera 2006). Il est aussi tolérant au sel, ce qui autorise une implantation à proximité immédiate de routes régulièrement déneigées en hiver.

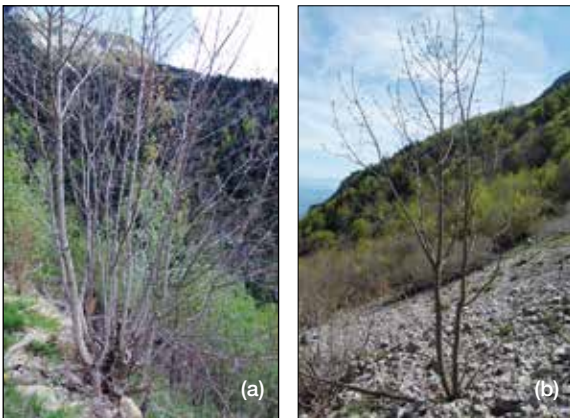


Fig. 8 - L'érable sycomore est une espèce dotée d'une forte capacité de régénération (a), capable de se développer sur des terrains à forte pente régulièrement perturbés (b).

Les essais de bouturage en laboratoire à l'aide d'hormones de croissance synthétiques ont permis d'atteindre un taux de réussite de 96 % (Schiechtel 1973). Les essais de reproduction végétative en conditions naturelles n'étant toutefois pas aussi satisfaisants, l'utilisation de plants en racines nues devra être

privilegiée. Sa capacité à produire des racines adventives permet d'intégrer cette espèce dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés. Toutefois, on limitera son utilisation ou on l'évitera sur les pentes trop inclinées, pour les effets de bras de levier qu'il est susceptible de produire à l'état adulte. Ce problème peut toutefois se résoudre par un entretien régulier (recépage). De par sa faible tolérance à l'immersion prolongée et la formation d'un tronc rigide à l'état adulte, il est déconseillé de l'utiliser en pied de berge. Il pourra notamment être associé à l'aulne blanc (*Alnus incana*), au bouleau pendant (*Betula pendula*), au frêne (*Fraxinus excelsior*), au tremble (*Populus tremula*) ou encore aux saules marsault (*Salix caprea*) et appendiculé (*S. appendiculata*).

L'érable sycomore est facilement disponible dans le commerce. Compte tenu de la présence de nombreux cultivars utilisés en ornement, une attention particulière devra être portée à l'utilisation de plants indigènes de provenance locale.

La production et la commercialisation de plants d'érable sycomore à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en France et en Suisse (chap. III.3.2.4).

Achnatherum calamagrostis (L.) P. Beauv.

Calamagrostide argentée

Poacées

Description

- La calamagrostide argentée est une espèce vivace cespiteuse formant généralement de grosses touffes mesurant de 40 à 120 cm de haut (fig. 1).
- Les tiges, raides, sont dressées et très feuillées. Elles sont rouge violacé à la base et pourvues d'une griffe de courts rejets latéraux dressés perçant la gaine principale (fig. 2).
- Les feuilles sont longues et enroulées à l'extrémité. Elles sont larges de 2 à 6 mm et scabres sur le dessus. Les gaines, rougeâtres, sont terminées par une ligule courte et poilue (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule longue de 10 à 25 cm souvent inclinée au sommet, d'abord étalée (fig. 4), puis contractée à maturité (fig. 5).
- Les épillets, uniflores, sont initialement blanchâtres et argentés puis deviennent jaunâtres à maturité. La glumelle extérieure, longue de 3 à 6 mm, est couverte de longs poils blancs (fig. 6). Elle porte une longue arête, généralement coudée, mesurant 8 à 15 mm.
- La floraison a lieu de mai à août.
- Les espèces du genre *Calamagrostis* (*C. epigeios*, *C. varia*, etc.) se distinguent de la calamagrostide argentée par leurs ligules longues de plus de 3 mm et leurs glumelles glabres renfermant un faisceau de poils uniquement présent à la base de la glumelle inférieure.



Fig. 1 - Port.



Fig. 2 - Rejets latéraux dressés.



Fig. 3 - Gaine rougeâtre et ligule courte et poilue.



Fig. 4 - Panicule généralement étalée à la floraison.

Distribution et vulnérabilité

La calamagrostide argentée est une espèce montagnarde d'Europe méridionale. Elle est assez commune dans les Alpes, le sud du Jura, les Cévennes et les Pyrénées.

Elle est relativement fréquente dans les Alpes du Nord, notamment sur les versants ensoleillés où elle peut être localement abondante.

Écologie

- La calamagrostide argentée est une espèce pionnière de pleine lumière des talus, éboulis et rochers, terrasses alluviales, pelouses ou pinèdes sèches bien exposés. Elle est parfois présente en situation secondaire dans des gravières ou carrières abandonnées.
- Elle croît sur des substrats grossiers (gravier, cailloux, galets, blocs, rochers) secs à très secs, souvent pauvres en terre fine et en nutriments, le plus souvent calcaires ou schisteux, parfois marneux, basiques à légèrement acides.
- Elle présente un optimum écologique dans les éboulis calcaires thermophiles (*Stipion calamagrostis* - fig. 7).
- Elle se développe aux étages collinéen et montagnard (jusqu'à 1 700 m).



Fig. 5 - Panicule généralement contractée après la floraison.



Fig. 6 - Glumelle extérieure couverte de longs poils blancs.

Utilisation en génie végétal

La calamagrostide argentée est encore assez peu utilisée en génie végétal. Seules quelques expérimentations ont été faites dans le cadre de la végétalisation de pentes soumises aux phénomènes d'érosion (restauration des terrains de montagne notamment). Elle s'avère très adaptée pour la stabilisation des berges de cours d'eau de montagne.

Son système racinaire pouvant atteindre 1 m de profondeur et son port cespiteux (vol. syst. sout./aérien ≥ 1) lui procure une excellente résistance à la traction (Schiechtl 1973). Cette espèce favorise également une stabilisation efficace des sols en profondeur comme en surface (espèce résistant bien à l'ensevelissement). La dissipation de l'énergie du courant lors des crues et le piégeage des sédiments fins, induit par son port en touffe, facilitent ainsi l'installation d'autres espèces. Dotée d'une forte tolérance à la sécheresse, cette espèce pionnière peut être utilisée sur des substrats bruts très drainants. Le diamètre des particules influence d'ailleurs positivement la production de racines (plus le substrat est grossier, plus la biomasse racinaire est importante). Si l'ensoleillement est adapté, elle peut être implantée jusqu'à 1 700 m dans les Alpes du Nord (éviter une utilisation en vallées encaissées au-dessus de 1 200 m).



Fig. 7 - Situation typique sur éboulis calcaires thermophiles (recolonisation de carrière).

Malgré une dormance importante durant les premiers mois, les graines présentent un taux de germination élevé à plus long terme, notamment celles conservées au sec plus de deux ans (75 % à 20 °C après 10 jours). Des essais de végétalisation par semis ont montré de bons résultats sur versant Nord (constatés 5 ans après ensemencement). Les tests effectués sur substrat grossier en exposition Sud se sont révélés toutefois moins prometteurs (Crosaz 2005). Lorsque l'espèce est localement abondante, il est aussi possible de récolter des inflorescences pour les disposer directement sur le sol en les recouvrant d'un géo-

textile. Cette méthode, ayant fait l'objet de quelques expérimentations, offre l'avantage de supprimer les opérations de tri des semences comme l'emploi de produits collants. Le tapis de paille créé constitue par ailleurs une couche de matière organique recouvrant le substrat. Les graines ainsi positionnées présentent toutefois un faible taux de germination (moins de 10 % après 10 jours - Crosaz 2005).

Il est enfin envisageable de transplanter des individus depuis des populations naturelles, garantissant la provenance locale et une meilleure reprise. Les touffes peuvent en effet être facilement divisées au printemps ou à l'automne et intégrées dans des fascines, voire directement sur les talus. Son association avec le brachypode des rochers (*Brachypodium rupestre*), la fétuque courbée (*Festuca laevigata*), l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*), le liondent hispide (*Leontodon hispidus*) ou encore l'épilobe à feuilles de romarin (*Epilobium dodonaei*) est particulièrement pertinente.

La calamagrostide argentée est disponible dans certaines pépinières spécialisées. Compte tenu de la présence de plusieurs cultivars, une attention particulière devra être portée sur le choix de plants indigènes.

Agrostis capillaris L.

Agrostide capillaire

Poacées

Description

- L'agrostide capillaire est une espèce vivace rhizomateuse très polymorphe haute de 20 à 70 cm formant généralement de vastes colonies (fig. 1).
- Les tiges, genouillées-ascendantes (fig. 2), ne produisent pas de stolons (fig. 3).
- Les feuilles, d'un vert franc, planes et glabres, sont larges de 2 à 5 mm. Les gaines, lisses, sont terminées par une ligule courte et tronquée (fig. 4) mesurant moins de 2 mm de long.
- L'inflorescence est une panicule lâche mesurant 4 à 16 cm de long, étalée même après la floraison (fig. 5).
- Les épillets, violacés, uniflores, sont portés par des rameaux fins et lisses, longs de 1,5 à 2,5 mm (fig. 6). Les glumelles, parfois aristées, sont dépourvues de poils à la base.
- La floraison a lieu de juin à août.



Fig. 3 - Souche rhizomateuse.



Fig. 4 - Gaine lisse terminée par une ligule courte et tronquée.



Fig. 5 - Inflorescence en panicule lâche.



Fig. 1 - Espèce sociale formant de vastes colonies.



Fig. 2 - Tiges genouillées ascendantes.

- Deux sous-espèces sont actuellement décrites :
 - subsp. **capillaris** (voir description ci-dessus) ;
 - subsp. **castellana** au port en touffes (absence ou présence de très courts rhizomes) et à la panicule contractée après la floraison.
- L'agrostide stolonifère se différencie de l'agrostide capillaire s. str. par la présence de stolons, par ses ligules dépassant 2 mm et par son inflorescence contractée après la floraison.
- L'agrostide de Schrader se différencie de l'agrostide capillaire s. str. par ses ligules dépassant 2 mm, son inflorescence plus ou moins contractée et par la présence d'un faisceau de poils à la base des glumelles.

Distribution et vulnérabilité

L'agrostide capillaire est une espèce eurasiatique très commune sur l'ensemble du territoire franco-suisse à l'exception de la région méditerranéenne.

La sous-espèce type est très commune dans toutes les Alpes du Nord. La sous-espèce *castellana*, de distribution sud-européenne, est absente des Alpes du Nord.

Écologie

- L'agrostide capillaire est une espèce de pleine lumière des pelouses, prairies, landes, coupes et lisières forestières, parfois des boisements clairs (chênaies, pinèdes, pessières, etc.).
- Elle croît sur des matériaux siliceux ou décalcifiés de taille variée (argiles, limons, sables, graviers) pauvres en bases et en éléments nutritifs, secs à frais.
- Elle présente un optimum écologique au sein des pelouses d'altitudes acidophiles (*Caricetea curvulae* – fig. 7) et des prairies et pâturages mésotrophes d'altitude (*Poion alpinae* et *Polygono-Trisetion pro parte*).
- Elle se développe de l'étage collinéen à l'étage alpin (jusqu'à 3 000 m) avec un optimum aux étages montagnard et subalpin.



Fig. 6 - Vue de détail des épillets.

Utilisation en génie végétal

L'agrostide capillaire est régulièrement intégrée dans de nombreux mélanges grainiers pour l'ensemencement des aires de jeu, parcs et jardins, talus routiers, berges de cours d'eau, etc.

Dotée d'une capacité de dissémination importante et d'un fort pouvoir de multiplication végétative, cette espèce est capable de créer rapidement un couvert végétal dense et régulier. Elle est aussi utile pour fixer efficacement les couches superficielles du sol après aménagement, notamment contre les effets du ruissellement.

Capable de se développer sur des sols secs et pauvres en nutriments, elle peut être utilisée sur des substrats bruts, pauvres en matière organique et drainants, jusqu'à 3 000 m d'altitude.

Son appareil souterrain plutôt superficiel et son port en touffes assez lâches permettent d'apporter une bonne complémentarité avec la plupart des graminées, notamment la fétuque noirâtre (*Festuca nigrescens*), la fétuque courbée (*Festuca laevigata*), le brachypode des rochers (*Brachypodium rupestre*) ou la canche flexueuse (*Deschampsia flexuosa*). Elle pourra également être associée à des dicotylédones comme l'anhyllide vulnérable (*Anhyllis vulneraria*), le trèfle des montagnes (*Trifolium montanum*), le trèfle brun (*Trifolium badium*) ou encore le liondent hispide (*Leontodon hispidus*). Elle a toutefois tendance à devenir monopolisatrice et faire concurrence aux autres espèces (Krautzer *et al.* 2005). Elle devra ainsi être intégrée avec un faible pourcentage dans les mélanges grainiers (moins de 5 % en poids).



Fig. 7 - Situation typique dans une pelouse d'altitude avec *Nardus stricta*.

L'agrostide capillaire est disponible dans le commerce et est intégrée par défaut dans de nombreux mélanges grainiers. Relativement fréquente et localement très abondante de l'étage collinéen à l'étage subalpin sur terrain acide, elle peut également être multipliée et transplantée à partir de ses rhizomes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement.

La production en vue de la commercialisation de semences d'agrostide capillaire est soumise à une réglementation spécifique en France (chap. III.3.2.4).

Agrostis schraderiana Bech.

Agrostide de Schrader

Poacées

Description

- L'agrostide de Schrader est une espèce vivace rhizomateuse mesurant 20 à 60 cm (fig. 1) et formant souvent des tapis denses.
- Les tiges, grêles et genouillées-ascendantes, sont pourvues de rhizomes souterrains (fig. 2).
- Les feuilles, planes et souples, sont larges de 2 à 6 mm. Celles-ci sont vert franc à glauques, sillonnées et scabres sur les bords. La ligule, généralement laciniée, est longue de 2 à 4 mm (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule étroite, plus ou moins contractée, longue de 5 à 17 cm (fig. 4).
- Les épillets, blanchâtres à violacés, sont uniflores. Ils sont portés par des rameaux grêles, souvent flexueux et dépourvus d'arête (fig. 5). Contrairement aux autres espèces du genre *Agrostis*, la base de la glumelle est entourée d'un faisceau de poils pouvant atteindre la moitié de la longueur de celle-ci (fig. 6).



Fig. 3 - Feuille plane sillonnée et ligule longue et laciniée.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule étroite.



Fig. 5 - Épillets uniflores, violacés et dépourvus d'arête.



Fig. 1 - Port étalé.



Fig. 2 - Souche rhizomateuse.

- La floraison a lieu de juillet à août.
- L'agrostide stolonifère se différencie de l'agrostide de Schrader par la présence de stolons aériens, une inflorescence blanchâtre et l'absence d'un faisceau de poils à la base des glumelles.
- L'agrostide capillaire se différencie de l'agrostide de Schrader par ses ligules mesurant moins de 2 mm, son inflorescence étalée (pour la sous-espèce type) et par l'absence de poils à la base des glumelles.

Distribution et vulnérabilité

L'agrostide de Schrader est une espèce montagnarde du Sud-Ouest de l'Europe. Elle est exclusivement présente dans les Pyrénées, les Alpes et les Apennins. Elle est protégée en région Franche-Comté.

Dans les Alpes du Nord, elle est assez commune dans la zone intra-alpine, mais est plus rare dans les Préalpes.

Écologie

- L'agrostide de Schrader est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre se développant au sein des pentes et ravins ombragés, dans les brousses et landes subalpines fraîches (aulnaies vertes – fig. 7, landes à rhododendron), les pelouses maigres et les mégaphorbiaies d'altitude (fig. 8).
- Elle croît sur divers types de matériaux : sables, graviers, cailloux, blocs, schisteux ou granitiques, acides, pauvres en bases, humides à légèrement secs et plus ou moins riches en nutriments.
- Elle présente un optimum écologique dans les mégaphorbiaies supraforestières colluviales à graminées (*Agrostion schraderianae* – fig. 8).
- Elle se développe aux étages subalpin et alpin.



Fig. 6 - Base de la glumelle entourée d'un faisceau de poils atteignant la moitié de la longueur de celle-ci.

Utilisation en génie végétal

L'agrostide de Schrader est encore relativement peu utilisée dans les aménagements, hormis pour la restauration des pistes de ski. Néanmoins, en raison de son caractère pionnier et de son rôle structurant dans certaines pelouses et mégaphorbiaies d'altitude, elle s'avère très adaptée pour le génie végétal.

Dotée d'une forte aptitude à la multiplication végétative, elle couvre rapidement le substrat après travaux, garantissant ainsi la protection des couches superficielles du sol. Capable de former des tapis denses en développant aussi bien des racines en surface (rhizomes) qu'en profondeur, elle offre également une forte résistance à la traction. En conditions naturelles, elle se retrouve d'ailleurs souvent sur des pentes très raides soumises à des perturbations régulières : couloirs d'avalanche (fig. 7), zones de glissement de terrain et d'accumulation de débris rocheux, etc.

Dotée d'une plasticité écologique élevée pour ce qui est de l'hygrométrie du sol et des conditions d'ensoleillement, elle est capable de se maintenir sur tout le profil de la berge et sur divers types de matériaux (terre végétale, substrat grossier, etc.), en conditions d'ensoleillement importantes comme en fond de vallon. Elle devra cependant être utilisée de l'étage montagnard supérieur à l'étage alpin, exclusivement sur des substrats acides surtout présents dans les Alpes internes. Elle pourra notamment être associée à l'agrostide capillaire (*Agrostis capillaris*), à la fétuque noirâtre (*Festuca nigrescens*), à la flouve des Alpes (*Anthoxanthum alpinum*), au nard raide (*Nardus stricta*), à la laiche toujours verte (*Carex sempervirens*) ou encore à l'impéatoire (*Peucedanum ostruthium*).

L'agrostide de Schrader n'est cependant pas disponible dans le commerce. Étant localement abondante à l'étage subalpin, elle peut être multipliée et transplantée à partir de ses rhizomes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement. Des essais de plantation réalisés à partir de cette technique sur de petites zones érodées en montagne dans le Sud Tyrol, sous couvert d'une végétation pionnière préétablie, ont d'ailleurs fourni d'excellents résultats (Florineth in Barker et al. 1995).



Fig. 7 - Situation typique en association avec les brousses subalpines fraîches à aulne vert.



Fig. 8 - Mégaphorbiaie subalpine à graminées (*Agrostion schraderianae*).

Alnus incana L.

Aulne blanc

Bétulacées

Description

- L'aulne blanc est un arbre caducifolié pouvant atteindre 20 m de haut (fig. 1).
- L'écorce, lisse, d'abord gris clair (fig. 2) devient gris noirâtre avec l'âge. Les jeunes rameaux, grisâtres et pubescents, sont légèrement anguleux.
- Les bourgeons sont arrondis, pubescents et faiblement pédonculés (pédoncule long de 1 à 4 mm), brunâtres à violacés (fig. 3).
- Les feuilles, pétiolées et alternes, sont ovales, généralement aiguës à acuminées, doublement dentées. Celles-ci sont vert foncé dessus (fig. 4) et grises à blanchâtres au revers (fig. 5). Elles présentent 9 à 15 paires de nervures latérales saillantes.
- Les chatons mâles, longs de 6 à 8 cm, pendent à l'extrémité des rameaux. Les chatons femelles sont portés par un pédoncule arqué et sont réunis par 2 à 6 sur les rameaux de la même année (fig. 6).
- Les cônes (strobiles), mesurant de 1 à 1,5 cm de long, sont ovoïdes et sessiles (fig. 7).
- La floraison a lieu de fin février à avril.



Fig. 1 - Port.



Fig. 4 - Feuille à face supérieure vert foncé.



Fig. 2 - Écorce lisse, gris clair à l'état jeune.



Fig. 3 - Bourgeon pubescent et faiblement pédonculé.



Fig. 5 - Feuille blanchâtre au revers.

- L'aulne blanc se distingue des autres aulnes (*A. viridis* et *A. glutinosa*) par ses rameaux et bourgeons pubescents (loupe parfois nécessaire) et par ses feuilles blanchâtres au revers présentant plus de 9 paires de nervures latérales.

Distribution et vulnérabilité

L'aulne blanc est une espèce médio-européenne périlpine. Elle est présente sur l'ensemble du territoire suisse. En France, elle s'observe dans les massifs montagneux de l'Est du pays, ainsi que dans la vallée du Rhin.

Elle est fréquente dans les Alpes du Nord.

Écologie

- L'aulne blanc est une espèce de pleine lumière se rencontrant généralement le long des torrents et rivières (aulnaies blanches, frênaies, saulaies alluviales, etc.). Supportant mal la concurrence des autres ligneux, il ne s'observe qu'occasionnellement dans les hêtraies et les pessières où il est cantonné aux accrues forestiers.
- Il croît préférentiellement sur sols riches en bases et en azote, à forte réserve en eau. Il peut néanmoins être présent sur des terrains secs et acides. L'optimum de croissance de l'aulne blanc s'observe sur les substrats alluvionnaires grossiers, sableux à caillouteux où il s'installe en pionnier (fig. 8).
- Il présente un optimum écologique dans les aulnaies blanches (*Alnion incanae*).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (de 100 à 2 000 m).



Fig. 6 - Chatons mâles pendants à l'extrémité des rameaux.



Fig. 7 - Chatons femelles et strobiles de l'année précédente.

Utilisation en génie végétal

L'aulne blanc est largement utilisé en génie végétal, notamment pour la fixation des berges graveleuses et des sols soumis aux risques de glissement de terrain (réaménagement paysager de terrils ou de carrières).

Son système racinaire très étendu (racines obliques et horizontales se développant dans les horizons superficiels du sol – Kutschera et Lichtenegger 2002), sa capacité à drageonner, à rejeter de souche et à produire des racines adventives en font un élément essentiel pour la stabilisation des couches superficielles du sol, notamment sur les terrains à forte pente. Sa rapidité de croissance et d'établissement lui permet de se développer rapidement après plantation, assurant ainsi une protection immédiate des berges.



Fig. 8 - Situation en terrasse alluviale sur substrat grossier.

Tout comme les fabacées, les aulnes ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique (nodosités à actinomycètes symbiotiques) permettant d'enrichir rapidement le sol et favorisant ainsi la croissance des autres plantes.

Doté de fortes résistances au froid et à la sécheresse, il peut être implanté sur des substrats bruts drainants jusqu'à 2 000 m d'altitude. Sa tolérance aux substrats grossiers (fig. 8) en fait un auxiliaire adapté pour l'aménagement des berges de cours d'eau de montagne.

Son port arboré pouvant atteindre 20 m de hauteur rend toutefois délicate toute utilisation en pied de berge (possibilité d'induire des turbulences lors de crues ou de créer un effet bras de levier sur des pentes abruptes) ou, du moins, nécessite de l'associer avec des espèces arbustives plus fortement ancrées comme le saule drapé (*Salix elaeagnos*), le saule pourpre (*S. purpurea*), le noisetier (*Corylus avellana*) ou l'aulne vert (*Alnus viridis*).

L'aulne blanc présentant un faible taux de reprise au bouturage de branches (en moyenne inférieur à 30 % – Schiechl 1973), l'utilisation de boutures, de plançons ou de couches de branches dans les aménagements devra être proscrite, d'autant plus que la production de racines après bouturage est faible (Francis *et al.* 2005). Il présente

néanmoins un taux de reprise élevé en bouturage de racines. Cette technique étant toutefois peu applicable en génie végétal (à développer éventuellement à titre expérimental ou dans le domaine de la restauration de milieux), les plants à racines nues devront être privilégiés (facilement disponibles dans de nombreuses pépinières). Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer sous cette forme dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés. Il peut être associé notamment à l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), au bouleau pendant (*Betula pendula*), au frêne commun (*Fraxinus excelsior*), au merisier à grappes (*Prunus padus*) et à certaines espèces de saules comme les saules noirissant (*Salix myrsinifolia*), pourpre (*S. purpurea*) ou drapé (*S. elaeagnos*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

La production et la commercialisation de plants d'aulne blanc à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en Europe et en France (chap. III.3.2.4).

Alnus viridis (Chaix) DC.

Aulne vert

Bétulacées

Description

- L'aulne vert est un arbrisseau caducifolié haut de 1 à 4 mètres, comportant de nombreuses tiges arquées fréquemment couchées par la neige (fig. 1).
- Les jeunes rameaux, rougeâtres à violacés, sont anguleux (fig. 2) et sillonnés. Les rameaux âgés sont gris brunâtre et arrondis.
- Les bourgeons sont ovoïdes, pointus, bruns à rougeâtres, sessiles à faiblement pédonculés (pédoncule de moins de 1 mm), glabres et parfois visqueux (fig. 3).
- Les feuilles sont vertes, non brillantes, ovales à elliptiques et denticulées (fig. 4). Elles présentent 5 à 8 paires de nervures latérales pubescentes au revers (fig. 5).
- Les chatons mâles, longs de 2 à 6 cm, sont sessiles et pendent à l'extrémité des rameaux à maturité (fig. 6). Les chatons femelles, nettement pédonculés, sont solitaires ou réunis par 2 à 4 en grappes dressées sur les rameaux de l'année.
- Les cônes (strobiles), globuleux, initialement dressés puis pendants, mesurent de 7 à 15 mm (fig. 7).



Fig. 1- Port dense présentant des tiges arquées.



Fig. 2 - Rameau de l'année, anguleux, et bourgeon pointu et sessile.



Fig. 3 - Bourgeon terminal et chaton mâle en formation.



Fig. 4 - Feuille ovale à elliptique, denticulée.



Fig. 5 - Feuille à nervures pubescentes au revers.

- La floraison a lieu d'avril à juin, les fleurs mâles apparaissant dès l'automne (fig. 3).
- Trois sous-espèces sont actuellement décrites :
 - subsp. **viridis** ;
 - subsp. **brembana** ;
 - subsp. **suaveolens**.
- L'aulne vert se distingue des autres aulnes (*A. glutinosa* et *A. incana*) par son port en boule ne dépassant pas 4 m de haut, ses bourgeons glabres et pointus presque sessiles, ses feuilles vertes sur les 2 faces et ses chatons mâles visibles dès l'automne.

Distribution et vulnérabilité

L'aulne vert est une espèce relativement commune dans les zones périalpines franco-suisse. Elle est rare dans les Alpes du Sud et le Jura.

La sous-espèce *viridis* est commune à l'étage subalpin des Alpes du Nord. Les sous-espèces *brembana* (des Alpes orientales) et *suaveolens* (de Corse) sont absentes des Alpes du Nord.

Écologie

- L'aulne vert est une espèce pionnière de pleine lumière formant des colonies denses et souvent monospécifiques sur les versants ombragés, en association avec les mégaphorbiaies et les landes. Il s'observe également au bord des torrents de montagne (fig. 8), au sein des ravins et couloirs d'avalanche (fig. 1) et, plus ponctuellement, dans les pessières et mélézins frais, ainsi que dans les saulaies buissonnantes subalpines.
- Il croît préférentiellement sur des substrats limono-argileux, mais peut également se rencontrer sur matériaux plus grossiers, frais à humides tout au long de l'année, neutres à légèrement acides, riches en bases et en nutriments.
- Il présente un optimum écologique au sein des brousses subalpines fraîches (aulnaies vertes – *Alnion viridis*).
- Il se développe aux étages montagnard et subalpin (de 1 400 à 2 300 m), mais peut descendre jusqu'à 800 m, notamment par avalaison.



Fig. 6 - Chatons mâles sessiles.



Fig. 7 - Cônes (strobiles).

Utilisation en génie végétal

L'aulne vert est assez régulièrement utilisé pour la fixation des terrains de montagne, notamment pour fixer les éboulis instables et assurer une protection contre les avalanches.

Doté d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et d'une croissance juvénile rapide (notamment en largeur), l'aulne vert est un « bon » colonisateur s'établissant rapidement à la suite de perturbations (avalanches, crues, etc.). Il protège ainsi rapidement le sol après plantation et assure une protection efficace des ouvrages contre les crues.



Fig. 8 - Situation en pied de berge.

L'aulne vert peut être largement exploité en génie végétal, notamment grâce à son port très fourni et son bon maintien en terrain incliné, utile pour fixer les éboulis et les talus instables soumis aux coulées de neige (Wiedmer et Senn-Irlet 2006). Ses tiges souples, son port non arborescent et son système racinaire se développant aussi bien en surface qu'en profondeur (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,6 – Schiechl 1973) permettent de l'utiliser en pied de berge. Ces caractéristiques lui procurent une résistance importante à la traction et permettent de dissiper l'énergie du courant en cas de crue.

Il favorise également l'établissement d'autres espèces en agissant sur les propriétés chimiques du substrat par fixation de l'azote atmosphérique (nodosités à actinomycètes symbiotiques) permettant un enrichissement du sol.

Sa résistance au froid et au gel autorise une utilisation dans les versants ombragés à des altitudes dépassant 2 000 m. Inversement, il ne peut guère être intégré dans les aménagements réalisés à moins de 1 400 m dans des conditions d'ensoleillement important.

Tout comme l'aulne blanc, cette espèce se prête mal au bouturage (taux de reprise inférieur à 10 %). L'aulne vert étant assez facilement disponible dans le commerce (provenances alpines certifiées), l'utilisation de plants en racines nues doit donc être privilégiée. Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer sous cette forme dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés, du pied jusqu'au sommet de berge. Il peut notamment être associé au merisier à grappes (*Prunus padus*), au saule appendiculé (*Salix appendiculata*), au rosier des Alpes (*Rosa pendulina*), au bouleau pendant (*Betula pendula*) ou encore au sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*).

La production et la commercialisation de plants d'aulne vert à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en Suisse (chap. III.3.2.4). Cette espèce bénéficie également d'un statut de protection partielle dans certains cantons suisses et d'une protection totale dans certaines régions françaises (Franche-Comté).

Anthyllis vulneraria L.

Anthyllide vulnéraire

Fabacées

Description

- L'anthyllide vulnéraire est une espèce herbacée vivace mesurant 5 à 50 cm de haut et formant des touffes compactes (fig. 1).
- Les tiges, entièrement herbacées, sont glabrescentes (poils épars) à nettement velues (fig. 2), ascendantes à dressées.
- Les feuilles, imparipennées (parfois unifoliées – fig. 3), sont composées de 3 à 11 folioles, la terminale étant généralement plus grande que les latérales, notamment sur les feuilles inférieures.
- Les fleurs, jaunes à blanchâtres, parfois rougeâtres, sont rassemblées en glomérules denses portées par un long pédoncule et entourées de bractées foliacées palmées. Le calice, renflé, est plus ou moins velu selon les sous-espèces (fig. 4 à 6).
- Les gousses, glabres, ovales, sont renfermées dans le calice.
- La floraison a lieu de mai à septembre.



Fig. 1 - Port en touffes compactes.



Fig. 2 - Tiges plus ou moins velues (subsp. *polyphylla*).



Fig. 3 - Feuilles souvent unifoliées (subsp. *alpestris*).



Fig. 4 - Inflorescence (subsp. *alpestris*).



Fig. 5 - Inflorescence (subsp. *carpatica*).

- L'anthyllide vulnéraire est une espèce extrêmement polymorphe. Elle possède de nombreuses sous-espèces (et variétés), dont sept sont présentes dans les Alpes du Nord :

- subsp. *alpestris* (fig. 3 et 4) ;
- subsp. *carpatica* (fig. 5) ;
- subsp. *guyoti* ;
- subsp. *polyphylla* (fig. 2) ;
- subsp. *valesiaca* (fig. 6) ;
- subsp. *vulneraria* ;
- subsp. *vulnerarioides*.

Distribution et vulnérabilité

L'anthyllide vulnéraire est une espèce subatlantique et sub-méditerranéenne très commune en France et en Suisse.

Parmi les 7 taxons représentés dans les Alpes du Nord, les sous-espèces *alpestris*, *carpatica* et *valesiaca* sont les plus fréquentes.

Les sous-espèces *guyoti*, *vulnerarioides* et *polyphylla* sont plus rares à l'état spontané ; cette dernière étant régulièrement présente dans les mélanges grainiers, comme la sous-espèce type, qui n'est pas indigène.

Écologie

- L'anthyllide vulnérable est une espèce héliophile se développant au sein des prairies maigres, pelouses d'altitude et forêts claires thermophiles.
- Elle croît sur divers types de substrats, des matériaux argileux jusqu'aux blocs, pour peu qu'ils soient suffisamment secs, neutres à basiques.
- Les sous-espèces *alpestris* et *valesiaca* présentent leur optimum écologique au sein des pelouses subalpines et alpines calcicoles (*Elyno-Seslerietea* – fig. 7).
- La sous-espèce *carpatica* présente un optimum dans les prairies maigres mésophiles (*Mesobromion*) aux étages collinéen et montagnard.
- Les sous-espèces *guyoti* et *polyphylla* présentent leur optimum dans les pelouses steppiques (*Stipo-Poion carniolicae*) de l'étage collinéen à l'étage subalpin.
- La sous-espèce *vulnerarioides* présente un optimum au sein des crêtes ventées calcicoles (*Oxytropo-Elynon*) aux étages subalpin et alpin.



Fig. 6 - Inflorescence (subsp. *valesiaca*).

Utilisation en génie végétal

L'anthyllide vulnérable est exploitée de longue date pour la production de fourrage et pour l'ensemencement des talus routiers, berges de cours d'eau, prairies ornementales et pistes de ski.

Son caractère pionnier permet de l'utiliser sur des substrats bruts pauvres en matière organique. À l'état naturel, elle forme d'ailleurs de vastes colonies sur les bancs de sédiments nus des zones alluviales ou des secteurs rocaillieux stabilisés en zone supraforestière (fig. 7). Suite à des mouvements de terrain, elle figure parmi les premières espèces colonisatrices. Comme toutes les légumineuses, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique permet d'enrichir rapidement le sol, favorisant ainsi la croissance des autres plantes.

Grâce à sa croissance rapide, son système racinaire pivotant profondément ancré et ramifié et son port fourni, elle assure la stabilisation rapide des couches superficielles du sol tout en améliorant les qualités paysagère et écologique des sites. Présentant une forte capacité de dissémination en situation pionnière, elle s'installe rapidement dans les vides créés par d'éventuelles lacunes de l'ensemencement (Krautzer *et al.* 2004). Sa large amplitude altitudinale, sa tolérance au froid et à la sécheresse sont des arguments de choix pour une utilisation en rivières de montagne, notamment les sous-espèces *alpestris* et *valesiaca*.

Supportant mal la concurrence des autres espèces herbacées (notamment celle des fléoles), le recouvrement de cette espèce a tendance à diminuer lorsque le couvert végétal augmente. Néanmoins, au vu de son fort potentiel de colonisation, elle constitue un auxiliaire fondamental pour des aménagements sur substrat brut, sans apport complémentaire de terre végétale, et à plus forte raison dans la phase initiale d'évolution de l'aménagement. Elle pourra être associée notamment au lotier des Alpes (*Lotus alpinus*), au trèfle des montagnes (*Trifolium montanum*), à la séslerie bleuâtre (*Sesleria caerulea*), à la féтуque courbée (*Festuca laevigata*), assurant ainsi une complémentarité à la couverture du sol et à l'enracinement (Crosaz et Dinger 1999). Les sous-espèces *alpestris*, *carpatica*, *polyphylla* et *valesiaca* sont disponibles dans le commerce.

La production en vue de la commercialisation de semences d'anthyllide vulnérable est soumise à une réglementation spécifique en France (chap. III.3.2.4).



Fig. 7 - Situation typique en pelouse calcicole subalpine.

Avenula pubescens (Huds.) Dumort.

Avoine pubescente

Poacées

Description

- L'avoine pubescente est une espèce cespiteuse haute de 30 à 100 cm (fig. 1).
- Les feuilles, larges de 2 à 5 mm, sont pourvues de 2 nervures médianes bien visibles (« trace de skis ») et sont terminées en pointe carénée. Elles sont souples, de couleur vert franc et couvertes de poils étalés (fig. 2). Les supérieures sont courtes (moins de 5 cm de long) et dressées. Les ligules des feuilles supérieures, longues de 4 à 8 mm, sont pointues (fig. 3). Les gaines, au moins les inférieures, sont généralement hirsutes. Elles peuvent parfois être glabrescentes, notamment pour la sous-espèce *laevigata*.
- L'inflorescence est une panicule mesurant de 7 à 16 cm, à rameaux étalés-dressés (fig. 4), généralement contractée et retombante après floraison (fig. 5).
- Les épillets, mesurant de 8 à 18 mm sans les arêtes, sont luisants à reflets argentés (fig. 6). Ils sont composés de 2 à 4 fleurs portées par un pédicelle muni de longs poils blanchâtres (fig. 7). Les glumelles extérieures, longues de 8 à 14 mm, portent une arête genouillée dépassant nettement l'épillet.
- La floraison a lieu de mai à juillet.
- Deux sous-espèces sont actuellement décrites :
 - subsp. ***pubescens***, dont les rameaux inférieurs de l'inflorescence sont rassemblés par 3 à 5 et dont les épillets, composés de 2 à 3 fleurs, mesurent généralement moins de 12 mm ;
 - subsp. ***laevigata***, dont les rameaux inférieurs de l'inflorescence sont rassemblés par 1 ou 2 et dont les épillets, mesurant généralement plus de 12 mm, sont composés de 3 à 4 fleurs.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule à rameaux étalés à la floraison.



Fig. 5 - Panicule contractée après floraison.



Fig. 1 - Port cespiteux.



Fig. 2 - Feuille présentant des « traces de ski » et des poils étalés.



Fig. 3 - Ligule longue et pointue.

- L'avoine des prés (*A. pratensis*) et l'avoine bigarrée (*A. versicolor*) se distinguent de l'avoine pubescente par leurs feuilles totalement glabres et leurs ligules plus courtes (les supérieures mesurant moins de 5 mm).
- L'avoine pubescente peut également être confondue avec le fromental (*Arrhenatherum elatius*), qui s'en distingue par ses feuilles dépourvues de « trace de skis », ses gaines glabres et ses épillets munis d'une seule longue arête.

Distribution et vulnérabilité

L'avoine pubescente est une espèce eurasiatique largement répandue en France et en Suisse. Elle est commune dans les Alpes du Nord.

La sous-espèce *laevigata*, plus rare, semble être uniquement présente dans les secteurs subalpains des Alpes et des Carpates.

Écologie

- L'avoine pubescente est une espèce de pleine lumière des prairies mésophiles et des pelouses subalpines.
- Elle croît sur les sols frais à secs, plus ou moins riches en nutriments, basiques à légèrement acides.
- Elle présente un optimum au sein des prairies de fauche de basse altitude et de montagne (*Arrhenatherion*, *Polygono-Trisetion* – fig. 8), et des prairies mi-sèches médio-européennes (*Mesobromion*).
- Elle se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin. La sous-espèce *laevigata* semble se développer préférentiellement à l'étage subalpin tandis que la sous-espèce *pubescens* croît ordinairement dans les prairies collinéennes et montagnardes.



Fig. 6 - Glumelles extérieures portant une arête genouillée dépassant nettement l'épillet.



Fig. 7 - Fleur portée par un pédicelle muni de longs poils blanchâtres.

Utilisation en génie végétal

L'avoine pubescente est largement utilisée pour la production de fourrage, ainsi que pour l'ensemencement des talus routiers, berges de cours d'eau et prairies ornementales.

De par sa bonne capacité de dissémination (reproduction végétative et grenaison importante), sa rapidité de croissance et sa large amplitude altitudinale, c'est une graminée adaptée pour l'ensemencement des berges et des talus en montagne.

Son port cespiteux relativement lâche et son système racinaire fasciculé lui permettent de stabiliser efficacement les couches supérieures du sol et assurent une bonne complémentarité avec les légumineuses à racines pivotantes et port dense comme l'anhyllide vulnérable (*Anhyllis vulneraria*), le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) ou le sainfoin des montagnes (*Onobrychis montana*).



Fig. 8 - Situation typique dans une pelouse montagnarde (subsp. *laevigata*).

Sa plasticité écologique autorise une utilisation sur divers types de sols pour peu qu'ils soient composés d'un minimum de terre végétale et pas trop acides (éviter les sols graveleux ou tourbeux), de l'étage collinéen à l'étage subalpin. L'avoine pubescente constitue donc une graminée de base pour de nombreux types de mélanges grainiers. Elle présente toutefois un taux de germination inconstant en conditions naturelles et devra être associée à d'autres espèces prairiales à fort pouvoir colonisateur comme l'agrostide capillaire (*Agrostis capillaris*), le brachypode des rochers (*Brachypodium rupestre*), le brome érigé (*Bromus erectus*), la fétuque noirâtre (*Festuca nigrescens*) ou l'avoine dorée (*Trisetum flavescens*).

L'avoine pubescente est facilement disponible dans le commerce sous forme de graines ou de plants en pots. La sous-espèce *laevigata* semble, par contre, ne pas encore être cultivée en pépinière.

Berberis vulgaris L.

Épine-vinette

Berbéridacées

Description

- L'épine-vinette est un arbrisseau caducifolié formant des cépées denses mesurant de 1 à 3 m de haut (fig. 1).
- Ses tiges, fines et nombreuses, sont d'abord dressées puis arquées et pourvues d'épines trifides (stipules épineuses – fig. 2). Les jeunes rameaux, cannelés, portent souvent des épines simples (fig. 3). L'écorce, de couleur gris-beige, est jaune au revers.
- Les bourgeons, de couleur brun clair, sont constitués d'écailles coriaces et mucronées (fig. 3).
- Les feuilles, alternes, obovales à lancéolées et finement denticulées, sont atténuées à la base et portées par un court pétiole. Elles sont glabres, vert clair dessus (fig. 4) et glauques dessous.
- Les fleurs, jaune clair, sont rassemblées en grappes latérales pendantes (fig. 5).
- Les fruits sont des baies allongées, rouges à maturité, longues de 8 à 10 mm et larges de 3 à 5 mm (fig. 6). Elles persistent sur les rameaux jusqu'en hiver.
- La floraison a lieu de mi-avril à mi-juin.



Fig. 1 - Port en cépées denses.



Fig. 2 - Épine trifide.



Fig. 3 - Bourgeon sur rameau de l'année.



Fig. 4 - Bouquet de feuilles obovales à lancéolées.

- L'épine-vinette peut difficilement être confondue, hormis avec les autres espèces du genre *Berberis* (*B. aetnensis*, *B. thunbergii*, etc.) qui ne sont toutefois pas présentes dans les Alpes du Nord. En période hivernale, elle peut éventuellement être confondue avec le groseillier à maquereau (*Ribes uva-crispa*) qui s'en distingue par ses bourgeons à écailles obtuses et ciliées sur les bords.

Distribution et vulnérabilité

L'épine-vinette est une espèce eurasiatique présente de façon inconstante de l'Ouest de l'Asie au Sud de l'Europe, à l'exception de la région méditerranéenne. Elle est présente de façon disséminée sur l'ensemble du territoire franco-suisse (elle est rare voire absente en Bretagne et sur la Côte d'Azur).

Elle croît sur l'ensemble de l'Arc alpin mais est cependant plus fréquente dans les zones intra-alpines (massifs de la Vanoise, des Écrins, Valais, etc.).

Écologie

- L'épine-vinette est une espèce pionnière de pleine lumière tolérant l'ombrage se rencontrant dans les haies, les fourrés, les forêts sèches (chênaies, pinèdes, tilliaies, etc.), les pelouses en cours d'embroussaillage, mais aussi le long de certains cours d'eau sur matériaux grossiers.
- Elle croît préférentiellement sur des substrats drainants (sables, graviers, cailloux, blocs), basiques à légèrement acides, calcaires ou siliceux.
- Elle présente un optimum écologique dans les fourrés xérophiiles (*Berberidion* – fig. 7).
- Elle se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 5 - Inflorescence en grappe pendante.



Fig. 6 - Baies allongées, rouges à maturité.

Utilisation en génie végétal

L'épine-vinette est régulièrement utilisée en ornement, notamment pour la création de haies ou la végétalisation des talus routiers, parcs et jardins. Elle présente également de nombreuses potentialités pour le génie végétal.

C'est une espèce vigoureuse adaptée aux températures extrêmes et pouvant se développer aussi bien en plein soleil qu'en situation mi-ombragée. Son développement racinaire extrêmement rapide et très ramifié (pouvant atteindre 4,5 m de long) assure une protection rapide du sol. Elle peut être utilisée sur des matériaux grossiers et filtrants, jusqu'à 2 000 m d'altitude, sur des roches calcaires ou siliceuses. Elle supporte toutefois mal les inondations prolongées et les sols asphyxiants. Elle ne devra donc pas être implantée en pied de berge et devra être privilégiée pour la stabilisation de sols graveleux à caillouteux.



Fig. 7 - Situation typique (*Berberidion*) en mosaïque avec une pelouse steppique.

Ses tiges souples et son port exclusivement buissonnant lui confèrent de nombreux atouts pour le génie végétal, notamment pour la stabilisation de talus inclinés. L'épine-vinette supporte un recouvrement important de la base du tronc par des matériaux graveleux-terreux, lors d'une crue ou d'un glissement de terrain par exemple. Elle crée dans ce cas des racines adventives utiles pour fixer les couches superficielles du sol, certains individus pouvant supporter un recouvrement de la base du tronc de près de 40 % de leur hauteur.

De par ses fleurs mellifères jaunes et ses baies rouge vif très appréciées des oiseaux, son intégration dans les ouvrages permet d'améliorer la qualité paysagère et écologique d'un site. Il est par contre important de noter qu'elle constitue un hôte intermédiaire de la rouille du blé et ne devra pas être utilisée à proximité de cultures céréalières.

Bien que l'épine-vinette présente un faible taux de reprise au bouturage (inférieur à 15 %), l'utilisation de boutures peut être envisagée en raison de leur capacité à produire rapidement des racines (Schiechtel 1973 – à intégrer en association avec des plantes ayant des taux de reprise élevés). Elle présente aussi une capacité de reprise importante en bouturage de racines. Cette technique étant toutefois peu applicable en génie végétal (à développer éventuellement à titre expérimental), les plants à racines nues, facilement disponible en pépinière, devront être privilégiés. Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer sous cette forme dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés. Elle peut être associée notamment à l'argousier (*Hippophae rhamnoides*), au bouleau pendant (*Betula pendula*), au troène (*Ligustrum vulgare*) ou à la viorne lantane (*Viburnum lantana*) avec lesquels elle se retrouve fréquemment en milieu naturel. Étant donné l'existence de nombreux cultivars ornementaux dans le commerce, une attention particulière devra être portée à l'utilisation de plants indigènes.

Betula pendula Roth

Bouleau pendant

Bétulacées

Description

- Le bouleau pendant est un arbre caducifolié à tronc droit ou arqué atteignant 25 m de haut (fig. 1).
- L'écorce, d'abord lisse et blanche, se détache en lanières horizontales, devenant ainsi crevassée et noirâtre à la base du tronc (fig. 2). Les jeunes rameaux, d'abord dressés puis retombants, sont glabres, bruns à rougeâtres et couverts de verrues blanchâtres à grisâtres en densité variable (fig. 3).
- Les bourgeons, coniques et allongés, sont bruns à roux (fig. 3).
- Les feuilles, alternes et longuement pétiolées, sont triangulaires et glabres sur les deux faces, doublement dentées. Elles sont vertes et luisantes dessus (fig. 4), vert clair à glauques au revers (fig. 5).
- Les fleurs mâles sont disposées en chatons sessiles (de 3 à 7 cm de long) pendants à l'extrémité des rameaux (fig. 6). Les fleurs femelles sont regroupées en chatons pédonculés et dressés mesurant de 1 à 3 cm de long.
- Les fruits (samares) sont regroupés en petits cônes pendants longs de 2 à 4 cm se dissociant sur l'arbre (fig. 7).



Fig. 4 - Feuille verte et luisante sur le dessus.



Fig. 5 - Feuille vert clair à glauque au revers.



Fig. 1 - Port présentant des tiges souvent arquées.



Fig. 2 - Écorce à la base du tronc noirâtre et crevassée.



Fig. 3 - Bourgeons coniques sur rameau de l'année verruqueux.

- La floraison a lieu d'avril à mai.
- Le bouleau pubescent (*B. pubescens* incl. *B. carpatica*) se distingue du bouleau pendant par son écorce plus blanche (même à la base du tronc), ses rameaux dressés non verruqueux (généralement pubescents) et ses feuilles simplement dentées.

Distribution et vulnérabilité

Le bouleau pendant est une espèce eurasiatique très commune en Suisse et en France, à l'exception de la région méditerranéenne où elle est absente.

Elle est largement répandue sur l'ensemble des Alpes du Nord, tout en étant plus fréquente dans les zones intra-alpines.

Écologie

- Le bouleau pendant est une espèce de pleine lumière supportant mal la compétition des ligneux sociaux. Ubiquiste et peu exigeant, il se rencontre préférentiellement dans les stades pionniers de divers types de boisements de feuillus et de conifères, ainsi que dans les landes et recrus forestiers.
- Il croît sur différents types de substrats (limons, sables, cailloux ou tourbe), acides à basiques, secs ou humides.
- Il présente un optimum écologique au sein des forêts acidophiles (*Quercetea robori-petraeae* – fig. 8).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 6 - Chatons mâles (pendants) et femelles (dressés).



Fig. 7 - Jeunes cônes.

Utilisation en génie végétal

Le bouleau pendant est largement utilisé dans de nombreux aménagements, notamment pour la végétalisation de carrières, les plantations de bords de route et la stabilisation des talus et des terrains à forte pente.

C'est une espèce vigoureuse capable de se développer dans des terrains très inclinés, régulièrement perturbés (glissements de terrain, crues, éboulis, etc. – fig. 9). De par sa croissance juvénile rapide et sa capacité à rejeter de souche (Ambrozy 2010), le bouleau pendant est particulièrement adapté pour la protection des sols contre l'érosion. Sa large répartition altitudinale et son caractère ubiquiste permettent de l'utiliser dans diverses conditions, en particulier sur des substrats bruts très drainants, jusqu'à 2 000 m d'altitude.

Son système racinaire très superficiel dépassant rarement 1 m de profondeur sur sol humide (Kutschera et Lichtenegger 2002) et son port essentiellement arboré le rendent toutefois difficilement utilisable en pied de berge, en raison de sa faible résistance à l'arrachement et de la création possible de turbulences lors de crues.

De par son très faible taux de reprise en reproduction végétative, le bouleau pendant ne peut être utilisé que sous forme de plants forestiers. Capable de produire des racines adventives, il pourra être intégré dans les lits de plants et plançons et dans les caissons en rondins végétalisés, du milieu jusqu'en sommet de berge (Florineth *et al.* 2002). Il peut notamment être associé au frêne commun (*Fraxinus excelsior*), au noisetier (*Corylus avellana*), au sureau à grappes (*Sambucus racemosa*), au tremble (*Populus tremula*) ou encore au saule marsault (*Salix caprea*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

Le bouleau pendant est disponible dans de nombreuses pépinières. Compte tenu de la présence de nombreux cultivars utilisés pour l'ornement, une attention particulière devra être portée au choix de plants indigènes.

La production et la commercialisation de plants de bouleau pendant à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en France et en Suisse (chap. III.3.2.4). Cette espèce bénéficie également d'une protection partielle dans certains cantons suisses.



Fig. 8 - Faciès à bouleau d'une chênaie acidophile.



Fig. 9 - Individu se développant sur éboulis et montrant sa forte capacité de colonisation.

Brachypodium rupestre (Host) Roem. & Schult.

Brachypode des rochers

Poacées

Description

- Le brachypode des rochers est une espèce vivace rhizomateuse haute de 40 à 100 cm, formant généralement des gazons lâches (fig. 1).
- Les tiges, dressées, sont généralement poilues aux nœuds et dépourvues de feuille au sommet. La souche, brun clair, est munie de rhizomes plus ou moins allongés (fig. 2).
- Les feuilles, larges de 2 à 7 mm, sont dressées, raides, brillantes, vert clair, plus ou moins lisses et velues, souvent enroulées (fig. 3). Elles sont pourvues d'une ligule courte, tronquée, mesurant moins de 2 mm (fig. 4).
- L'inflorescence est un épi allongé, d'abord entièrement dressé, puis généralement penché à l'extrémité après floraison (fig. 1). Elle est composée de 6 à 15 épillets courtement pédicellés et écartés de l'axe à maturité (fig. 5).
- Les épillets sont longs de 2 à 5 cm, souvent un peu arqués (fig. 6). La glumelle extérieure est généralement glabre et munie d'une arête de plus de 3 mm. L'intérieure, tronquée, est ciliée à la marge (fig. 5).
- La floraison a lieu de juin à août.



Fig. 3 - Feuille enroulée.



Fig. 4 - Ligule courte et tronquée.



Fig. 1 - Espèce sociale formant des gazons lâches.



Fig. 2 - Souche rhizomateuse, brun clair.

- Cette espèce est morphologiquement très proche du brachypode penné (*B. pinnatum*) avec lequel elle a souvent été confondue. Ce dernier s'en différencie par ses feuilles plus larges et non enroulées, mates, scabres au revers et ses épillets aux glumelles velues.
- Elle peut également être confondue avec le brachypode des forêts (*B. sylvaticum*) dont l'inflorescence scorpioïde présente des glumelles à arêtes allongées égalant environ la longueur de la glumelle.

Distribution et vulnérabilité

Le brachypode des rochers est une espèce européenne présente des Pyrénées aux Carpates.

Compte tenu des confusions régulières entre *B. rupestre* et *B. pinnatum*, la répartition précise de ce dernier demeure mal connue dans les Alpes du Nord. Il est actuellement recensé en Suisse et en Haute-Savoie avec une fréquence inférieure à celle de *B. rupestre*, commun sur cette zone biogéographique.

Écologie

- Le brachypode des rochers est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre des pelouses et pâturages secs, lisières, clairières, accrus forestiers et boisements clairs (chênaies pubescentes, hêtraies sèches, pinèdes).
- Il croît sur des substrats plutôt fins (argiles, limons et sables) et généralement calcaires, basiques à légèrement acides, pauvres en nutriments et plutôt secs.
- Il présente un optimum écologique dans les ourlets maigres (*Trifolio-Geranietea* – fig. 7) et pelouses maigres basophiles (*Festuco-Brometea*).
- Il se développe aux étages collinéen et montagnard (jusqu'à 1 700 m).



Fig. 5 - Inflorescence en épi allongé.



Fig. 6 - Épillet courtement pédicellé.

Utilisation en génie végétal

Contrairement au brachypode penné (*B. pinnatum*), le brachypode des rochers est très peu cité dans les différents ouvrages de référence traitant du génie végétal. Or, dans de très nombreux cas, c'est bien ce dernier qui est effectivement utilisé. Il est en effet beaucoup plus fréquent que le précédent, notamment en France. La majorité des références attribuées au brachypode penné sont donc en réalité à rapporter au brachypode des rochers, d'ailleurs plus adapté que le précédent pour une utilisation en génie végétal.

Fort de ce constat, le brachypode des rochers est ainsi largement utilisé dans les aménagements, notamment pour l'ensemencement des talus routiers, pour la végétalisation des carrières ou la protection des pentes soumises aux phénomènes d'érosion.



Fig. 7 - Situation typique en ourlet maigre.

Doté d'un fort potentiel de colonisation dû à sa production de rhizomes et d'un système racinaire fasciculé pouvant atteindre 1 m de profondeur, il couvre rapidement le sol et permet une stabilisation rapide de celui-ci après ensemencement. Résistant bien à la sécheresse, le brachypode des rochers peut être utilisé sur des substrats bruts drainants (fig. 7). Supportant relativement bien l'ombrage, il pourra se maintenir longtemps au stade végétatif sous couvert de ligneux. Il ne pourra toutefois pas être utilisé à plus de 1200 m d'altitude sur des cours d'eau encaissés.

Ayant tendance à concurrencer les autres semis, cette espèce à forte capacité d'établissement devra être intégrée avec un faible pourcentage dans les mélanges grainiers (moins de 10 % en poids dans un mélange graminéen pur). Elle peut notamment être utilisée en association avec d'autres graminées à forte compétitivité comme les calamagrostides argentée (*Achnatherum calamagrostis*), bigarée (*Calamagrostis varia*) et commune (*C. epigeios*) ou encore la molinie faux roseau (*Molinia arundinacea*).

Bien que non référencé dans les listes des semences, le brachypode des rochers est souvent disponible dans le commerce sous l'appellation « *brachypode penné* ». L'origine des graines devra toutefois être contrôlée afin de garantir l'exactitude du taxon utilisé. Pouvant être localement abondant aux étages collinéen et montagnard, il peut aussi être multiplié et transplanté à partir de la division de ses rhizomes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement.

Le brachypode des rochers bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale dans le canton de Nidwald).

Calamagrostis epigejos

(L.) Roth

Calamagrostide commune

Poacées

Description

- La calamagrostide commune est une espèce vivace rhizomateuse mesurant de 60 à 150 cm de haut et formant des colonies denses souvent monospécifiques (fig. 1).
- Les tiges, robustes, dressées et rudes au sommet, sont pourvues à la base de longs rhizomes traçants.
- Les feuilles, longues, raides et coupantes, sont généralement dressées (fig. 2) et mesurent de 4 à 9 mm de large. Les ligules sont allongées (4 à 8 mm de long), fermes et souvent laciniées (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule dense et dressée mesurant de 15 à 30 cm de long (fig. 4).
- Les épillets, longs de 5 à 7 mm, uniflores, sont généralement lavés de violet (fig. 5). Les glumes, presque égales, sont étroites et acuminées. La glumelle inférieure est munie, à sa base, de longs poils égalant les glumes (fig. 6). Elle porte une arête dorsale peu visible.
- La floraison a lieu de juin à août.



Fig. 1 - Espèce sociale formant des colonies denses.



Fig. 2 - Feuilles et tiges dressées.



Fig. 3 - Ligule longue et laciniée.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule dense et dressée.



Fig. 5 - Épillets généralement lavés de violet.

- La calamagrostide faux roseau (*C. pseudophragmites*) se distingue de la calamagrostide commune par ses feuilles bleutées, ses inflorescences d'un rouge plus vif, la position de l'arête des glumelles insérée à leur extrémité et sa situation plus strictement alluviale, bien que ces deux espèces puissent parfois croître dans un même site.

Distribution et vulnérabilité

La calamagrostide commune est une espèce eurasiatique. Elle est présente sur l'ensemble du territoire franco-suisse à l'exception du Nord-Ouest et du Sud-Ouest de la France et des secteurs de haute montagne.

Elle est assez commune dans les secteurs intra-forestiers des Alpes du Nord.

Écologie

- La calamagrostide commune est une espèce pionnière de pleine lumière ou de demi-ombre des coupes et lisières forestières (fig. 7), boisements clairs, alluvions et prairies plus ou moins humides.
- Elle croît sur des substrats plus ou moins riches en nutriments, limoneux à graveleux, acides à basiques, secs à humides (engorgement hivernal possible).
- Elle présente un optimum écologique dans les coupes et clairières forestières (*Epilobietea angustifolii*).
- Elle se développe aux étages collinéen et montagnard (jusqu'à 1 300 m).



Fig. 6 - Glumelle inférieure munie, à sa base, de longs poils égalant les glumes.

Utilisation en génie végétal

La calamagrostide commune est déjà utilisée dans le domaine de l'aménagement, notamment pour la végétalisation des carrières et la stabilisation des talus routiers.

Son système racinaire fasciculé pouvant atteindre plus de 50 cm de profondeur et la densité de ses tiges aériennes lui procurent une excellente résistance à la traction (rapp. vol. syst. sout./aérien = 0,5). Ils favorisent également une stabilisation efficace des sols en surface, la dissipation de l'énergie du courant lors des crues et le piégeage des sédiments fins.



Fig. 7 - Situation typique en lisière forestière.

Dotée d'une croissance rapide et de rhizomes vigoureux, cette espèce pionnière est capable de couvrir rapidement le sol après ensemencement, assurant ainsi une protection efficace des berges. Supportant relativement bien l'ombre et la sécheresse, elle peut être utilisée sur des substrats bruts très drainants, y compris dans des vallées encaissées et boisées. Elle ne pourra toutefois pas être implantée à plus de 1 300 m d'altitude.

Ayant tendance à concurrencer les autres semis, cette espèce à forte capacité d'établissement devra être intégrée avec un faible pourcentage dans les mélanges grainiers (moins de 10 % en poids dans un mélange graminéen pur). Il est ainsi conseillé de l'utiliser en mélange avec d'autres espèces à forte compétitivité comme les calamagrostides argentée (*Achnatherum calamagrostis*) et bigarrée (*Calamagrostis varia*) ou la molinie faux roseau (*Molinia arundinacea*).

La calamagrostide commune est disponible dans le commerce sous forme de graines ou de plantes en pots. Peu de données sont actuellement disponibles sur la réussite des semis en conditions naturelles. Pouvant être localement abondante aux étages collinéen et montagnard où elle peut parfois former de vastes colonies, elle peut aussi être multipliée et transplantée à partir de la

division de ses rhizomes ou de ses touffes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement. Elle peut aussi être intégrée sous forme de mottes dans une fascine, pour peu que celle-ci ne soit pas constamment immergée. Il peut s'avérer également opportun de récolter les inflorescences à l'automne et de les disposer directement sur le sol en les recouvrant d'un géotextile. Cette méthode offre l'avantage de supprimer les opérations de tri des semences comme l'emploi de produits collants et permet de créer un tapis de paille apportant de la matière organique au substrat. Compte tenu du manque de données fiables concernant la germination de cette espèce (dormance des graines, conditions de germination, etc.), cette technique ne pourra toutefois être employée que dans un but expérimental. Il conviendrait donc d'effectuer des tests de germination afin de préciser les possibilités d'ensemencement pour cette espèce.

Calamagrostis varia (Schard.) Host

Calamagrostide bigarrée

Poacées

Description

- La calamagrostide bigarrée est une espèce vivace rhizomateuse mesurant de 50 à 120 cm de haut et formant des colonies généralement denses, plus ou moins étalées (fig. 1).
- Les tiges, dressées et grêles, sont pourvues d'une souche rampante enfouie dans le sol (fig. 2).
- Les feuilles, vert pâle, mates, sont planes, scabres, relativement souples et mesurent de 3 à 8 mm de large. Elles sont parfois munies d'un faisceau de poils sur la face inférieure au niveau de la ligule. Celle-ci est longue de 3 à 6 mm, laciniée (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule longue de 7 à 20 cm, dressée, relativement étroite (fig. 4) et contractée après la floraison (fig. 1).
- Les épillets, uniflores, longs de 4 à 5 mm, sont blanchâtres à vert pâle, teintés de violet (fig. 4). La glumelle inférieure est munie à la base de poils dépassant sa demi-longueur et d'une arête coudée faisant généralement saillie à l'extrémité de l'épillet (fig. 5).
- La floraison a lieu de juillet à août.
- La calamagrostide roseau (*C. arundinacea*), très rare dans les Alpes du Nord, se distingue de la calamagrostide bigarrée par ses feuilles d'un vert franc, ainsi que par ses glumelles aux arêtes longuement saillantes et pourvues à la base d'une touffe de poils ne dépassant pas leur demi-longueur.



Fig. 1 - Espèce sociale formant des colonies denses.



Fig. 2 - Feuilles souples, vert pâle.



Fig. 3 - Ligule lacérée et faisceau de poils à la base des feuilles.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule dressée.



Fig. 5 - Glumelle munie d'un faisceau de poils à la base.

Distribution et vulnérabilité

La calamagrostide bigarrée est une espèce européenne montagnarde présente des Pyrénées aux Carpates. Elle est présente sur la quasi-totalité du territoire suisse. En France, elle ne se rencontre que dans les Pyrénées, le Tarn, les Alpes et le Jura.

Elle est assez commune dans les montagnes des Alpes du Nord et peut être localement abondante.

Écologie

- La calamagrostide bigarrée est une espèce de demi-ombre ou de pleine lumière se développant au sein des pelouses, boisements (hêtraies, pessières et pinèdes principalement), alluvions, éboulis et landes de montagne, généralement en situation de lisière ou en versant Nord.
- Elle croît sur des substrats plutôt secs et généralement calcaires, argileux à graveleux (avec un optimum sur matériaux fins présentant une variation de leur hygrométrie), plus ou moins riches en éléments nutritifs, basiques à légèrement acides.
- Elle présente un optimum écologique au sein des pelouses marnicoles fraîches (*Calamagrostion variae* – fig. 6) et des pinèdes calcicoles mésophiles (*Erico-Pinetea*).
- Elle se développe de l'étage collinéen supérieur à l'étage subalpin (jusqu'à 2 200 m) avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Situation typique en pelouse marnicole fraîche (*Calamagrostion variae*).

Utilisation en génie végétal

La calamagrostide bigarrée n'a, à notre connaissance, encore jamais été utilisée dans le domaine du génie végétal. Elle offre cependant de nombreuses potentialités pour la stabilisation des berges de cours d'eau de montagne et la stabilisation des pentes soumises aux phénomènes d'érosion.

Son système racinaire fasciculé bien développé et la densité de ses tiges aériennes (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,2) lui procurent une excellente résistance à la traction. Cela favorise également une stabilisation efficace des sols en surface, la dissipation de l'énergie du courant lors des crues et le piégeage des sédiments fins. Dotée d'une croissance rapide, elle est capable de couvrir rapidement le sol, assurant ainsi une protection efficace des berges contre les phénomènes d'érosion et les glissements de terrain. En conditions naturelles, cette espèce se développe d'ailleurs assez régulièrement sur les loupes de glissement (fig. 7), couloirs d'avalanche et éboulis stabilisés (fig. 8). Supportant bien l'ombre et la sécheresse, cette espèce pionnière peut être utilisée sur des substrats bruts drainants, dans des vallées encaissées et boisées jusqu'à 1 800 m, en association notamment avec le brachypode des rochers (*Brachypodium rupestre*), les laiches ferrugineuse (*Carex ferruginea*) et toujours verte (*C. sempervirens*), le sainfoin des montagnes (*Onobrychis montana*) et le trèfle brun (*Trifolium badium*).

La calamagrostide bigarrée n'est, pour le moment, pas disponible dans le commerce. Elle semble en effet présenter un taux de germination très inconstant en conditions *ex-situ* (moins de 10 % - Regvar *et al.* 2006). Pouvant être localement abondante à l'étage montagnard et formant ponctuellement de vastes colonies, elle peut toutefois être multipliée et transplantée à partir de la division de ses rhizomes ou de ses touffes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement. Il peut également s'avérer intéressant de récolter les inflorescences à l'automne et de les déposer directement sur le sol en les recouvrant d'un géotextile. Compte tenu du manque de données fiables concernant la germination de cette espèce (dormance des graines, conditions de germination, etc.), cette technique est à employer à titre expérimental.



Fig. 7 - Situation sur loupe de glissement.



Fig. 8 - Situation sur éboulis stabilisés.

Carex paniculata L.

Laiche paniculée

Cypéracées

Description

- La laiche paniculée est une espèce vivace cespiteuse mesurant de 30 à 180 cm de haut et formant souvent d'imposants touradons (fig. 1).
- Les tiges sont robustes et trigones à angles aigus. Elles sont scabres sur toute leur longueur et mesurent moins de 2,5 mm de large dans le tiers supérieur.
- Les feuilles, vert foncé, sont rudes et coupantes. Elles mesurent de 3 à 6 mm de large et sont brusquement rétrécies en pointe courte au sommet (fig. 2). Les gaines basiliaires, brunâtres, entières et luisantes, ne se désagrègent pas en fibres (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule fauve dressée ou pendante et plus ou moins compacte (fig. 4 et 5). Elle mesure de 3 à 12 cm à maturité. Les épillets, très nombreux, sont sessiles (fig. 6). Les fleurs femelles, insérées à la base de l'épillet, sont protégées par une écaille membraneuse aiguë égalant plus ou moins l'utricule.
- Les utricules, longs d'environ 3 mm, sont bruns, luisants, nettement ailés et faiblement nervés.



Fig. 1 - Port en touradon.



Fig. 4 - Inflorescence lâche et pendante.



Fig. 2 - Feuille rétrécie en une pointe courte au sommet.



Fig. 3 - Gaine basilaire brunâtre et luisante.



Fig. 5 - Inflorescence compacte et dressée.



Fig. 6 - Épillets sessiles.

- Deux sous-espèces sont actuellement décrites : subsp. **paniculata** et subsp. **lusitanica**, cette dernière étant uniquement présente, en Europe, dans la partie Ouest de la péninsule Ibérique.
- La laiche à épis rapprochés (*C. appropinquata*) se différencie de la laiche paniculée par ses gaines basiliaires déchirées en fibres et ses utricules mats, plus distinctement nervés. Les laiches d'Otruba (*Carex otrubae*) et des renards (*C. vulpina*) ne présentent pas de port en touradon et présentent une tige mesurant plus de 2,5 mm de large dans le tiers supérieur.

Distribution et vulnérabilité

La laiche paniculée est une espèce eurasiatique, subocéanique présente sur l'ensemble du territoire franco-suisse à l'exception de la région méditerranéenne.

Elle est relativement commune dans les Alpes du Nord, tout en étant plus fréquente dans les secteurs périalpins.

Écologie

- La laiche paniculée est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre formant souvent des groupements monospécifiques au sein des marais (fig. 7), des prés humides, au bord des lacs et cours d'eau, dans les fossés, aux abords des sources (groupements fontinaux) et dans les aulnaies marécageuses (fig. 8).
- Elle croît sur les sols humides principalement tourbeux ou tuffeux, plus occasionnellement sur des substrats argileux à sableux, basiques à légèrement acides et riches en éléments nutritifs.
- Elle présente un optimum écologique dans les magnocariçaies (*Magnocaricion*), notamment en situation eutrophe (*Caricetum paniculatae* – fig. 7) et dans les prairies grasses humides montagnardes (*Calthion*).
- Elle se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 1 700 m).



Fig. 7 - Magnocariçaie à laiche paniculée (*Caricetum paniculatae*).

Utilisation en génie végétal

Encore assez peu utilisée en génie végétal, la laiche paniculée présente un fort potentiel pour la stabilisation des berges des rivières à l'étage montagnard.

Grâce à son système racinaire fasciculé dense et à son port en touffe, elle permet une stabilisation et une protection durable des sols. Implantée en pied de berge, ses touffes, formant parfois d'imposants touradons (fig. 9), permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces.

Dans des conditions optimales de développement, cette espèce peut toutefois devenir monopolisatrice et limiter la croissance des ligneux. Cette faculté constitue un atout lorsqu'il est souhaité de maintenir une berge ouverte. De ce fait, il est conseillé de ne pas la mêler aux plantations de jeunes plants forestiers ou de boutures qui sont susceptibles d'être étouffés.

La laiche paniculée est disponible dans le commerce sous forme de plants ou de graines. Le taux de germination des graines demeure toutefois assez aléatoire et dépend notamment de la luminosité et de l'hygrométrie du sol. Il est ainsi conseillé de l'utiliser sous forme de plants en l'intégrant par exemple dans des fascines d'hélophytes.

Relativement commune aux étages collinéen et montagnard (plus rare à la base de l'étage subalpin), il est aussi possible de la transplanter depuis des populations naturelles (par division de touffes), garantissant la provenance locale et améliorant la vitalité des plants. Elle pourra être associée notamment à la laiche en vessie (*Carex rostrata*), à la canche cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*), aux calamagrostides bigarrée (*Calamagrostis varia*) et commune (*C. epigejos*), aux pétasites (*Petasites spp.*), à l'angélique (*Angelica sylvestris*), à la reine des prés (*Filipendula ulmaria*) ou encore au populage (*Caltha palustris*).



Fig. 8 - Aulnaie marécageuse à laiche paniculée.



Fig. 9 - Vue hivernale des touradons.

Deschampsia cespitosa

(L.) P. Beauv.

Canche cespiteuse

Poacées

Description

- La canche cespiteuse est une espèce vivace cespitueuse pouvant atteindre 150 cm de haut et formant des touffes compactes (fig. 1).
- Les feuilles, larges de 2 à 4 mm, sont scabres, coupantes et parcourues par plusieurs côtes saillantes séparées par des nervures translucides nettement visibles à contre-jour (fig. 2). Les ligules, longues de 4 à 8 mm, sont lancéolées (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule pyramidale longue de 10 à 30 cm et composée de rameaux étalés à dressés (fig. 4).
- Les épillets sont rapprochés et maintenus par des pédicelles plus courts que ceux-ci (fig. 5). Ils mesurent de 2 à 4 mm et sont composés de 2 à 3 fleurs blanchâtres, vert jaunâtre ou violacées (fig. 6). La glumelle extérieure, membraneuse, porte une arête droite insérée à sa base.
- La floraison a lieu de juin à août.
- Plusieurs sous-espèces sont décrites dans le Nord-Est de l'Europe dont :
 - subsp. **alpina**, ne dépassant pas 50 cm de haut, aux feuilles radicales courtes (moins de 10 cm) et à l'inflorescence contractée à maturité ;
 - subsp. **cespitosa**, dépassant généralement 50 cm de haut, aux feuilles radicales mesurant plus de 15 cm et à l'inflorescence généralement étalée à maturité ;
 - subsp. **littoralis**, disparue de France, et présente en Suisse sur les rives des lacs de Joux et de Constance (taxon à forte valeur patrimoniale non décrit ici).



Fig. 1 - Port cespiteux.



Fig. 2 - Vue de détail d'une feuille à contre-jour.



Fig. 3 - Ligule lancéolée.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule pyramidale.



Fig. 5 - Épillets rapprochés portés par de courts pédicelles.

- À l'état végétatif, la canche cespiteuse, assez polymorphe, peut éventuellement être confondue avec certaines laïches cespitueuses comme *Carex paniculata* ou *C. elata*. La présence de nervures translucides sur les feuilles permet toutefois de reconnaître facilement les touffes de canche.

Distribution et vulnérabilité

La canche cespiteuse est une espèce eurasiatique commune dans tout le territoire franco-suisse à l'exception de la région méditerranéenne.

Elle est très commune dans les Alpes du Nord. La distribution de la sous-espèce *alpina* est encore méconnue.

Écologie

- La canche cespiteuse est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre des prairies humides, des abords des sources, des cours d'eau (fig. 7) et des boisements frais à marécageux (aulnaies, chênaies, saulaies, etc.).
- Elle croît sur divers types de substrats (argiles, limons, sables, tourbes), généralement profonds et assez riches en éléments nutritifs, neutres à moyennement acides, frais à humides.
- Elle présente un optimum écologique dans les prairies humides (*Molinietalia*).
- Elle se développe de l'étage collinéen à l'étage alpin (jusqu'à 2 700 m) avec un optimum aux étages montagnard et subalpin.



Fig. 6 - Épillet généralement violacé.

Utilisation en génie végétal

La canche cespiteuse est une graminée essentielle pour les aménagements de génie végétal aux étages montagnard et subalpin.

Grâce à son système racinaire fasciculé pouvant dépasser 1 m de profondeur et à son port cespiteux (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,6), elle permet une stabilisation et une protection durable des sols en profondeur et présente une résistance importante à la traction (Schiechtel 1973). Implantée en pied de berge, ses touffes imposantes permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues (fig. 7) et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces. Sa plasticité écologique lui permet d'être utilisée dans différents types d'aménagements et sur tous types de substrats, aussi bien dans des vallées très encaissées que sur des talus exposés, jusqu'à 2 500 m d'altitude (Krautzer *et al.* 2004).

Dans des conditions optimales de développement, cette espèce peut toutefois devenir monopolisatrice et ainsi gêner la croissance des ligneux. Il est ainsi conseillé de ne pas la mêler aux plantations de jeunes plants forestiers ou de boutures qui risquent d'être étouffés.

La canche cespiteuse est disponible dans le commerce sous forme de plants en motte ou de graines. Elle présente un taux de germination très élevé en conditions naturelles et peut facilement être divisée au printemps (division des touffes). Très commune aux étages montagnard et subalpin, il est ainsi possible de la transplanter depuis des populations naturelles, garantissant la provenance locale et améliorant la vitalité des plants.

Elle pourra ainsi être implantée sous forme de plants dans des fascines d'hélophytes ou sous forme de graines dans les mélanges grainiers. Compte tenu de sa forte capacité de propagation et de son taux de germination élevé, elle devra toutefois être intégrée avec un faible pourcentage dans les mélanges grainiers (moins de 10 % en poids dans un mélange graminéen pur). Elle pourra notamment être associée aux laiches paniculée (*Carex paniculata*) et en vessie (*C. rostrata*), aux calamagrostides bigarrée (*Calamagrostis varia*) et commune (*C. epigejos*), aux pétasites (*Petasites spp.*), à l'épilobe à feuilles étroites (*Epilobium angustifolium*), à l'angélique (*Angelica sylvestris*), à la reine des prés (*Filipendula ulmaria*), au cerfeuil hirsute (*Chaerophyllum hirsutum*) ou encore au populage des marais (*Caltha palustris*), assurant ainsi une complémentarité à l'enracinement et à la couverture du sol.



Fig. 7 - Situation en pied de berge d'un torrent de montagne permettant la dissipation de l'énergie du courant.

Festuca laevigata Gaudin

Fétuque courbée

Poacées

Description

- La fétuque courbée est une espèce vivace cespiteuse mesurant de 20 à 40 cm de haut et formant des touffes compactes (fig. 1 et 6).
- Les tiges, ascendantes à dressées, sont pourvues à la base de gaines desséchées brun clair ne se décomposant pas en réseau de fibres (fig. 2).
- Les feuilles caulinaires et basales, larges de 0,7 à 1,1 mm, sont toutes filiformes et plus ou moins compressées latéralement. Elles sont raides, arquées ou simplement incurvées à l'extrémité (fig. 3), glauques à vert foncé selon les sous-espèces. Elles sont munies de gaines glabres, ouvertes sur plus de la moitié de leur longueur.
- L'inflorescence est une panicule plus ou moins dense mesurant de 3 à 9 cm de long (fig. 4).
- Les épillets, verts à violacés, mesurent de 7 à 12 mm et sont composés de 4 à 6 fleurs. La glumelle inférieure est munie d'une arête à son sommet atteignant généralement la moitié de la longueur de celle-ci et dépassant 1,5 mm (fig. 5).
- La floraison a lieu de mai à juillet.
- Deux sous-espèces dont la valeur systématique est parfois discutée sont actuellement décrites :
 - subsp. ***crassifolia*** aux feuilles vertes, luisantes (fig. 6) et non compressées latéralement, à glumes supérieures munies d'une marge scariée ;
 - subsp. ***laevigata*** aux feuilles glauques à vert grisâtre, mates et compressées latéralement, à glumes supérieures dépourvues de marge scariée.



Fig. 1 - Port cespiteux (subsp. *laevigata*).



Fig. 2 - Gainés basales ne se décomposant pas en réseau de fibres (subsp. *laevigata*).



Fig. 3 - Feuilles glauques et arquées (subsp. *laevigata*).



Fig. 4 - Inflorescence en panicule dense (subsp. *laevigata*).



Fig. 5 - Épillets violacés à glumelles munies de longues arêtes (subsp. *laevigata*).

- La fétuque courbée fait partie du groupe complexe des fétuques ovines (*Festuca ovina* aggr.) rassemblant de nombreuses espèces et sous-espèces morphologiquement proches. Elle se distingue des autres taxons de ce groupe par la longueur de ses arêtes dépassant 1,5 mm.

Distribution et vulnérabilité

La sous-espèce *crassifolia* est une plante ouest-alpine uniquement présente dans le Valais, la Haute-Savoie, la Savoie, l'Isère, les Alpes-Maritimes et les Apennins. Elle est relativement rare dans les Alpes du Nord (sa distribution est à préciser).

La sous-espèce *laevigata* est une plante montagnarde Sud-Ouest européenne présente des Pyrénées jusqu'aux Alpes centrales (Ouest de l'Autriche). Elle est relativement commune dans les secteurs supraforestiers des Alpes du Nord.

Écologie

- La fétuque courbée est une espèce de pleine lumière des dalles, éboulis et pelouses rocailleuses.
- Elle croît sur des substrats grossiers (graviers, blocs), généralement calcaires, très secs, pauvres en nutriments, neutres à basiques.
- Elle présente un optimum écologique dans les groupements pionniers montagnards sur dalles calcaires (*Drabo-Seslerion* – fig. 7).
- La sous-espèce *crassifolia* se développe aux étages collinéen et montagnard. La sous-espèce *laevigata* croît quant à elle de l'étage collinéen à l'étage alpin, avec un optimum aux étages montagnard et subalpin.



Fig. 6 - Port cespiteux (subsp. *crassifolia*).

Utilisation en génie végétal

Les fétuques du groupe *ovina* (fétuques ovines au sens large) auquel appartient la fétuque courbée sont assez régulièrement employées pour l'ensemencement des substrats très drainants (talus routiers, anciennes carrières, piste de ski) ou la création de gazons ornementaux. La fétuque courbée présente également un bon potentiel pour la stabilisation des berges des cours d'eau de montagne.

Son système racinaire fasciculé très ramifié pouvant atteindre 50 cm de profondeur et la densité de ses touffes (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,1), lui procurent une excellente résistance à la traction (Schiechtl 1973). Elle couvre efficacement le sol, assurant ainsi une protection aussi bien contre les phénomènes de ruissellement que lors d'épisodes de crues.

Présentant une très forte résistance à la sécheresse, la fétuque courbée est capable de se développer sur des pentes extrêmement raides et sur des substrats bruts très drainants (graviers, cailloux, blocs, etc. – fig. 7). Contrairement à d'autres espèces du groupe *ovina* ne tolérant pas les basses températures, la fétuque courbée peut être utilisée jusqu'à l'étage alpin.

Dotée d'une croissance relativement lente, cette espèce structurante pourra être incorporée comme graminée dominante dans de nombreux mélanges grainiers avec des pourcentages pouvant dépasser 20 % en poids de graines (Schiechtl 1973). Elle pourra notamment être associée à des légumineuses à racines pivotantes comme l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*), le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) ou le sanfoin des montagnes (*Onobrychis montana*), ou à d'autres graminées comme la fétuque noirâtre (*Festuca nigrescens*), le pâturin des Alpes (*Poa alpina*) ou encore l'agrostide capillaire (*Agrostis capillaris*), assurant ainsi une complémentarité à l'enracinement et à la couverture du sol.

Les fétuques ovines au sens large sont facilement disponibles dans le commerce, mais leur identité taxonomique est souvent imprécise. Dans la majorité des cas, il s'agit probablement de *F. guestfalica*, plus adaptée à basse altitude. La production de semences de fétuque courbée devrait être développée pour les aménagements en altitude. Pouvant être localement abondante aux étages montagnard et subalpin, elle peut aussi être multipliée et transplantée à partir de la division de ses touffes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement.

La production en vue de la commercialisation de semences de fétuque ovine est soumise à une réglementation spécifique en France (chap. III.3.2.4).



Fig. 7 - Situation typique sur dalle calcaire.

Festuca nigrescens Lam.

Fétuque noirâtre

Poacées

Description

- La fétuque noirâtre est une espèce vivace cespiteuse mesurant de 20 à 80 cm et formant des touffes denses (fig. 1).
- Les tiges, dressées à ascendantes, sont munies d'une souche courte entourée de gaines desséchées brun rougeâtre se décomposant généralement en réseau de fibres (fig. 2).
- Les feuilles caulinaires, planes, ou plus rarement canaliculées (en forme de V), sont larges de 1,5 à 2,5 mm. Les feuilles basales, filiformes, sont larges de 0,5 à 0,7 mm (fig. 3). Elles sont munies d'une gaine soudée sur toute leur longueur.
- L'inflorescence est une panicule dressée longue de 5 à 13 cm (fig. 4).
- Les épillets, verdâtres et généralement lavés de rouge ou de violet, sont longs de 6 à 10 mm (fig. 5). Les glumelles, ciliées sur le bord supérieur, sont munies d'une longue arête (fig. 6).
- La floraison a lieu de juin à août.
- Deux sous-espèces, dont la valeur systématique est parfois discutée, sont décrites :
 - subsp. **microphylla** aux feuilles glauques, scabres et à arête dépassant la moitié de la longueur de la glumelle ;
 - subsp. **nigrescens** aux feuilles vert foncé, lisses et à arête environ aussi longue que la moitié de la glumelle.



Fig. 1 - Port cespiteux.



Fig. 2 - Gaine basale se décomposant en réseau de fibres.



Fig. 3 - Feuilles basales filiformes.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule dressée.



Fig. 5 - Épillets verdâtres généralement lavés de pourpre.

- La fétuque noirâtre fait partie du groupe des fétuques rouges (*F. rubra* aggr.) rassemblant de nombreuses espèces et sous-espèces morphologiquement proches. La fétuque rouge s. str. (*Festuca rubra* L.) se différencie de la fétuque noirâtre par la présence de fins rhizomes allongés traçants (plante formant des gazons et non des touffes).

Distribution et vulnérabilité

La fétuque noirâtre est une espèce européenne présente des Pyrénées aux Carpates. Elle est relativement commune dans les Alpes du Nord.

La répartition des deux sous-espèces mentionnées est encore méconnue. La sous-espèce *microphylla*, plus rare que le type, est plus spécifiquement inféodée aux montagnes du Sud de l'Europe.

Écologie

- La fétuque noirâtre est une espèce de pleine lumière des pelouses, prairies, landes et forêts claires acidophiles.
- Elle croît sur des sols généralement profonds, tourbeux ou limoneux, plus ou moins pauvres en éléments nutritifs, neutres à acides, frais à humides.
- Elle présente un optimum écologique dans les pâturages maigres acides d'altitude (*Nardion strictae* - fig. 7).
- Elle se développe de l'étage collinéen à l'étage alpin inférieur (jusqu'à 2 600 m) avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Glumelles munies de longues arêtes.

Utilisation en génie végétal

Les fétuques du groupe *rubra* (fétuques rouges au sens large) auquel appartient la fétuque noirâtre sont régulièrement employées pour l'ensemencement des prairies, talus routiers, berges de cours d'eau, pelouses et gazons. La fétuque noirâtre, encore assez peu utilisée dans le domaine de l'aménagement, est toutefois employée localement pour la stabilisation des sols érodés.

De par sa bonne capacité de dissémination et son système racinaire fasciculé ramifié, cette espèce permet une stabilisation rapide du sol après ensemencement. Elle couvre efficacement le sol, assurant ainsi une protection aussi bien contre les phénomènes de ruissellement que lors d'épisodes de crues.

Dotée d'une large amplitude écologique, elle est capable de se développer sur différents types de substrats, y compris sur matériaux drainants (fig. 1) pour peu qu'ils soient suffisamment riches en particules fines et dans diverses conditions d'exposition, aussi bien en sommet qu'en pied de berge. Contrairement à d'autres espèces du groupe *rubra* plus adaptées aux basses altitudes, la fétuque noirâtre peut être utilisée jusqu'à l'étage alpin (Krautzer *et al.* 2004).

La fétuque noirâtre assure ainsi une bonne complémentarité avec les légumineuses à racines pivotantes comme l'anhyllide vulnérable (*Anhyllis vulneraria*) ou le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*), et d'autres graminées formant des touffes plus lâches ou des gazons comme la fétuque rouge (*Festuca rubra* s.str.), l'agrostide capillaire (*Agrostis capillaris*) ou le pâturin des prés (*Poa pratensis*). Dotée d'une croissance relativement lente, cette espèce structurante pourra être incorporée comme graminée dominante dans de nombreux mélanges grainiers avec des pourcentages pouvant dépasser 20 % en poids de graines.

Les fétuques rouges (au sens large) sont facilement disponibles dans le commerce mais leur identité taxonomique est quelquefois imprécise. Dans la majorité des cas, il s'agit de *F. rubra* subsp. *rubra*, produisant des gazons lâches. La fétuque noirâtre est toutefois disponible dans certaines pépinières spécialisées (culture effectuée à partir de souches alpines). Le taux moyen de germination de cette espèce en laboratoire est de 95 % (Peratoner et Spatz 2004). Pouvant être localement abondante aux étages montagnard et subalpin, elle peut aussi être multipliée et transplantée à partir de la division de ses touffes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement. Des essais de plantations de cette espèce réalisés sur de petites zones érodées en montagne à partir de cette technique, sous couvert d'une végétation pionnière préétablie, ont d'ailleurs donné d'excellents résultats (Florineth *in* Barker *et al.* 1995).

Il est important de noter que la production en vue de la commercialisation de semences de fétuque rouge est soumise à une réglementation spécifique en Europe et en France (chap. I.1.2.1 et III.3.3.4).



Fig. 7 - Situation typique en pelouse acidophile d'altitude (*Nardion strictae*).

Fraxinus excelsior L.

Frêne commun

Oléacées

Description

- Le frêne commun est un arbre caducifolié à tronc droit et élancé pouvant atteindre 30 m de haut (fig. 1).
- L'écorce, d'abord lisse et verdâtre, se fissure et devient grise à beige (fig. 2). Les jeunes rameaux, opposés et plus ou moins aplatis, présentent de nombreuses cicatrices foliaires bien visibles (fig. 3).
- Les bourgeons sont globuleux, noirs, veloutés et mats, le terminal étant nettement plus gros que les axillaires (fig. 3).
- Les feuilles, opposées, sont imparipennées. Elles sont généralement composées de 9 à 15 folioles glabres, ovales à lancéolées, finement denticulées, subsessiles (fig. 4).
- Les fleurs, discrètes (sans calice ni corolle), sont rassemblées en thyrses terminaux denses (fig. 5). Les fleurs mâles, globuleuses, sont pourpre à noirâtres, les femelles, plus allongées, sont violacées.
- Les fruits (sames), formant parfois des bouquets denses pouvant réunir jusqu'à 150 éléments, sont pendants sur l'arbre et persistent durant l'hiver. Longs de 3 à 5 cm, ils sont composés d'une seule graine et d'une aile étroitement ovale (fig. 6).
- La floraison a lieu de mars à mai, bien avant la feuillaison.
- Le frêne à feuilles étroites (*F. angustifolia*) se distingue du frêne commun par ses bourgeons ordinairement bruns, ses folioles plus étroites, grossièrement et irrégulièrement dentées, généralement atténuées en coin à la base, ainsi que ses fruits disposés en grappes réunissant ordinairement moins de 20 éléments.



Fig. 1 - Port élancé.



Fig. 2 - Écorce du tronc grise à beige.



Fig. 3 - Bourgeon terminal nettement plus gros que les axillaires.



Fig. 4 - Feuille imparipennée.

- Le frêne orne (*F. ornus*) se distingue du frêne commun par ses bourgeons grisâtres, ses folioles plus larges, moins nombreuses (de 5 à 9 unités), nettement pétiolées, ainsi que ses fruits atténués en coin à la base.

Distribution et vulnérabilité

Le frêne commun est une espèce européenne à large répartition. Elle est commune sur tout le territoire franco-suisse à l'exception de la région méditerranéenne.

Elle est très fréquente dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le frêne commun est une espèce post-pionnière de pleine lumière ou de demi-ombre, se rencontrant dans différents types de boisements frais (chênaies, érablaies, frênaies, hêtraies, sapinières, boisements rudéraux), au bord des rivières et plans d'eau, dans les accrus et recrus forestiers (fig. 7).
- Il croît préférentiellement sur des sols profonds et riches en nutriments, basiques à légèrement acides, frais à humides, mais souvent bien drainés. Il présente un optimum sur des matériaux fins (argiles et limons), mais peut également se développer sur des substrats plus grossiers (cailloux ou blocs), notamment à l'étage montagnard.
- Il présente un optimum écologique au sein des frênaies alluviales (*Fraxinion*).
- Il se développe aux étages collinéen et montagnard (jusqu'à 1 500 m).



Fig. 5 - Inflorescences rassemblées en thyrses terminaux denses.



Fig. 6 - Samares pendants.

Utilisation en génie végétal

Le frêne commun est une espèce déjà largement utilisée en génie végétal et dans les aménagements paysagers. Son bois souple et son système racinaire robuste et très ramifié (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,5) lui procurent une excellente résistance aux chocs et à l'arrachement. Sa rapidité de croissance et d'implantation lui permettent de protéger efficacement les sols contre l'érosion et les glissements de terrain (Kerr et Cahalan 2004). Dotée d'une très large amplitude écologique et d'une forte résistance au froid et à l'ombrage, cette espèce rustique peut être utilisée sur différents types de substrats et dans diverses conditions d'ensoleillement, jusqu'à 1 500 m d'altitude. Tolérante au sel, elle peut aussi être implantée à proximité immédiate de routes régulièrement salées l'hiver.

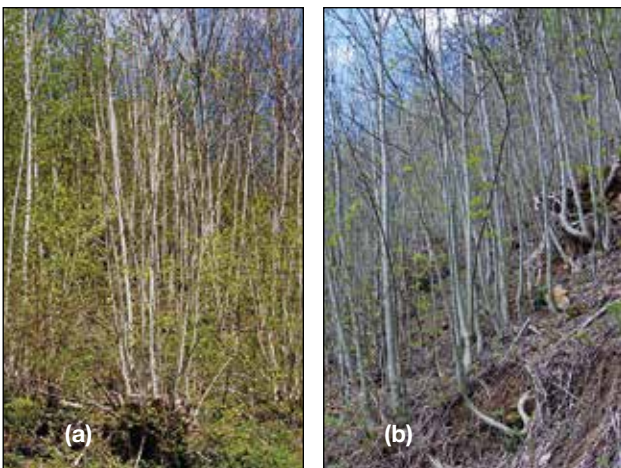


Fig. 7 - Deux aptitudes permettant au frêne de se développer sur des terrains instables à forte pente : (a) rejets de souche et (b) souplesse des tiges aériennes.

Bien qu'il puisse rejeter de souche (fig. 7a), son port arboré limite l'utilisation en pied de berge, car le tronc, rigide à l'état adulte, est susceptible de favoriser des turbulences. De plus, en situation escarpée, un grand frêne peut induire un effet de bras de levier, défavorable à la stabilité de la berge. En cépée, son port fourni permet toutefois de dissiper efficacement l'énergie du courant lors des crues. L'architecture de son système racinaire varie en fonction de la structure du sol (notamment selon la granulométrie) et peut ainsi être mixte (racines traçantes accompagnées de racines fasciculées) ou traçant. Sur des substrats grossiers, sa tendance à créer prioritairement des racines traçantes, notamment chez les individus âgés, nécessite de l'utiliser en association avec des espèces à enracinement plus profond.

Le frêne présentant une très faible aptitude à la multiplication végétative, il n'est pas possible de l'implanter sous forme de boutures, plançons ou couches de branches dans les aménagements. Les plants à racines nues, disponibles à faible coût dans de nombreuses pépinières, sont

à privilégier. Doté d'une bonne résistance à la transplantation et étant abondamment présent aux abords des rivières à l'étage montagnard, il est aussi possible de prélever des jeunes plants provenant de semis spontanés (fig. 7b), garantissant ainsi leur provenance locale et, potentiellement, leur vitalité.

Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés, du pied (s'il est entretenu en cépée) jusqu'au sommet de berge. Il peut être notamment associé à l'aulne blanc (*Alnus incana*), au bouleau pendant (*Betula pendula*), à l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), au merisier à grappes (*Prunus padus*) et à divers saules comme les saules pourpre (*Salix purpurea*) ou noirissant (*S. myrsinifolia*). La qualité de son bois en fait aussi un excellent matériau pour la réalisation des ouvrages bois : seuils, caissons (moises et longrines), pieux pour ouvrages de pied de berge.

La production et la commercialisation de plants de frêne commun à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en France et en Suisse (chap. III.3.2.4).

Hippophae rhamnoides L.

Argousier

Éléagnacées

Description

- L'argousier est un arbrisseau épineux caducifolié touffu atteignant 5 m de haut et présentant de nombreux drageons (fig. 1).
- L'écorce est grise à argentée. Les tiges, dressées et très ramifiées, donnent naissance à des rameaux courts épineux (fig. 2). Les jeunes rameaux, orangés ou beiges à brun foncé, sont ponctués de roux (fig. 3).
- Les bourgeons, globuleux et bosselés, sont alternes, marron à orangés et ponctués de brun (fig. 3).
- Les feuilles, oblongues à lancéolées, mesurent de 2 à 7 cm de long. Elles sont vert sombre et ponctuées de gris dessus (fig. 4), gris argenté et ponctuées de roux au revers (fig. 5).
- Les fleurs, tubulaires et lobées, sont très petites (3 mm) et présentent deux sépales verdâtres. Les fleurs mâles sont disposées en courts chatons brunâtres sessiles, les femelles verdâtres étant solitaires ou disposées en petites grappes pauciflores.
- Les baies, globuleuses, sont orange ou jaunâtres et mesurent de 7 à 8 mm de diamètre à maturité (fig. 6).
- La floraison a lieu de mars à avril, avant l'apparition des feuilles.



Fig. 4 - Feuille vert sombre ponctuée de gris sur la face supérieure.



Fig. 5 - Feuille gris argenté ponctuée de roux au revers.



Fig. 1 - Port buissonnant dense.



Fig. 2 - Rameau épineux.



Fig. 3 - Bourgeons globuleux et bosselés.

- Deux sous-espèces sont actuellement décrites : subsp. *fluviatilis* et subsp. *rhamnoides*. Seule la première est présente dans les Alpes du Nord.
- L'argousier peut difficilement être confondu avec d'autres espèces, si ce n'est avec les saules à feuilles étroites (*S. elaeagnos*, *S. rosmarinifolia*, etc.) qui s'en distinguent par l'absence de rameaux épineux.

Distribution et vulnérabilité

L'argousier est une espèce eurasiatique à large distribution en Europe.

La sous-espèce *rhamnoides*, d'affinité atlantique, est propre aux arrières dunes littorales du Nord-Ouest de la France.

La sous-espèce *fluviatilis* est assez commune dans les bassins versants du Rhône et du Rhin. Elle est assez fréquente aux abords des torrents alpins et dans certains ravins des Alpes du Nord, notamment en zone intra-alpine. Elle est plus rare ailleurs, souvent naturalisée ou subspontanée. Elle est protégée dans le canton de Vaud.

Écologie

- L'argousier est une espèce pionnière de pleine lumière des bords de torrents, terrasses alluviales, pelouses sèches, fourrés xérophiles et lisières.
- Il croît préférentiellement sur alluvions pauvres en sédiments fins (sables, graviers, galets) et apprécie les sols secs à temporairement humides, neutres à basiques et riches en nutriments (azote notamment). Tolérant les variations d'humidité du sol, il supporte toutefois mal les sécheresses intenses et prolongées.
- Il présente un optimum écologique dans les fourrés xérophiles (*Berberidion*) et les saulaies alluviales sur matériaux grossiers (*Salicion elaeagni*), notamment la saulaie à argousier (*Salici-Hippophaetum* – fig. 7).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 1 800 m).



Fig. 6 - Baies orange globuleuses.

Utilisation en génie végétal

L'argousier est une espèce largement utilisée en aménagement, notamment pour l'ornement (parcs, jardins, talus autoroutiers), la création de haies et la stabilisation des terrains de montagne soumis à l'érosion.

Tout comme les fabacées, cette espèce a la capacité de fixer l'azote atmosphérique (nodosités à bactéries fixatrices d'azote) permettant d'enrichir rapidement le sol et favorisant la croissance des autres plantes (Stewart et Pearson 1967). Sa ramure souple, son aptitude au drageonnement et son enracinement traçant et ramifié (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1) lui procurent une résistance élevée à l'arrachement lors de crues ou de glissements de terrain (Schiechtel 1973). Capable de résister à des inondations comme à des sécheresses temporaires, il peut être utilisé sur toute la hauteur de la berge, sur des substrats grossiers et très drainants. Il est aussi tolérant au sel, ce qui permet une implantation à proximité immédiate de routes régulièrement déneigées l'hiver. De par sa fructification abondante (nombreuses baies orange très appréciées des oiseaux), son intégration dans les ouvrages permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements.



Fig. 7 - Situation typique en compagnie du saule drapé (*Salici-Hippophaetum*).

Malgré un taux de reprise au bouturage élevé en laboratoire (jusqu'à 95 % de réussite avec de meilleurs résultats enregistrés au printemps sur de jeunes rameaux – Li et Beveridge 2004), l'utilisation de boutures dans les aménagements reste difficile en raison de leur faible capacité à produire des racines les premières années et du caractère aléatoire de leur survie (la disponibilité en eau et les températures du premier hiver étant des facteurs limitants). Cette technique mérite toutefois d'être testée expérimentalement. L'argousier peut également être multiplié à partir de drageons ou de boutures de racines. Ces techniques étant toutefois peu applicables en génie végétal, l'utilisation de plants en racines nues devra être privilégiée. Différentes expériences ont également montré que les graines d'argousier présentent un taux de germination élevé (90 % sur graines non stratifiées semées en automne – Rousseau 2002). La germination de cette espèce étant épigée, il suffit alors de disposer les fruits à la surface du sol, de les recouvrir de moins de 1 cm de substrat et de les protéger par un géotextile (Busing et Slabaugh 2008). Cette technique offre l'avantage de n'utiliser que des souches locales.

L'argousier peut être intégré dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés. En sommet de berge sur substrat drainant, il peut notamment être associé à l'épine-vinette (*Berberis vulgaris*), à l'amélanchier (*Amelanchier ovalis*), au troène (*Ligustrum vulgare*), à la viorne lantane (*Viburnum lantana*) ou à divers saules tolérant la sécheresse comme les saules drapé (*Salix elaeagnos*), faux daphné (*S. daphnoides*) ou pourpre (*S. purpurea*). En pied de berge, il s'accommodera parfaitement avec la myricaire (*Myricaria germanica*), les saules pourpre ou noircissant (*S. myrsinifolia*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

Cette espèce est disponible dans de nombreuses pépinières, mais, compte tenu de la présence de plusieurs cultivars ornementaux, une attention particulière devra être portée à l'origine des plants.

L'argousier bénéficie d'un statut de protection totale dans certains cantons suisses (Vaud).

Laburnum alpinum (Mill.) Bercht. & J. Presl

Cytise des Alpes

Fabacées

Description

- Le cytise des Alpes est un arbuste caducifolié aux tiges dressées pouvant atteindre 7 m de haut (fig. 1).
- L'écorce, vert brunâtre, lisse et pourvue de nombreuses lenticelles grisâtres (fig. 2), se fissure avec l'âge. Les jeunes rameaux, vert clair, sont glabres à la base et légèrement velus à l'extrémité (fig. 3).
- Les bourgeons, ovoïdes à coniques, sont composés d'écailles brun-vert clair pourvues de nombreux poils argentés (fig. 3).
- Les feuilles, trifoliolées, vert foncé et luisantes à la face supérieure (surtout à l'état jeune – fig. 4), sont munies de poils allongés épars (plus de 1 mm) à la marge et sur le pétiole. Elles sont vert clair au revers et généralement munies de quelques poils aux abords des nervures (fig. 5). Les folioles sont ovales à elliptiques.
- Les fleurs, longues de 13 à 19 mm, jaunes et odorantes, sont regroupées en grappes grêles et pendantes mesurant 18 à 40 cm (fig. 6). Le calice est velu.
- Les gousses, luisantes et glabres, mesurent de 2 à 5 cm et possèdent une suture ailée large de 2 mm (fig. 7).



Fig. 1 - Arbuste aux tiges dressées.



Fig. 2 - Écorce vert brunâtre pourvue de nombreuses lenticelles grisâtres.



Fig. 3 - Jeune rameau vert clair, légèrement velu à l'extrémité.



Fig. 4 - Feuille vert foncé, luisante à la face supérieure.



Fig. 5 - Feuilles vert clair au revers et munies de quelques poils aux abords des nervures.

- La floraison a lieu de mai à juillet.
- Le cytise aubour (*L. anagyroides*) se différencie du cytise des Alpes par ses feuilles mates à la face supérieure, ses gousses et ses rameaux nettement velus, une pilosité plus courte, ainsi que ses inflorescences moins allongées (mesurant ordinairement moins de 15 cm).

Distribution et vulnérabilité

Le cytise des Alpes est une espèce sud-européenne montagnarde assez rare sur l'ensemble du territoire franco-suisse. Elle est uniquement présente dans les Alpes et le Jura.

Dans les Alpes du Nord, elle est globalement peu fréquente et très localisée. Elle peut toutefois former de vastes populations de plusieurs milliers de pieds sur certains secteurs.

Écologie

- Le cytise des Alpes est une espèce pionnière de pleine lumière ou de demi-ombre se rencontrant dans des fourrés montagnards (fig. 8) ou en lisière forestière (hêtraies et pessières principalement, parfois mélézins).
- Il croît préférentiellement sur des substrats grossiers (blocs, galets, graviers), calcaires et peu profonds, pauvres en éléments nutritifs, basiques à légèrement acides, mais peut aussi se retrouver sur sédiments fins (argiles de décarbonatation et limons).
- Il présente un optimum écologique au sein des fourrés xérophiles (*Berberidion*) à mésophiles (*Corylo-Populion*).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (de 400 à 1 900 m) avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Inflorescence en grappe grêle et pendante.



Fig. 7 - Gousses luisantes et glabres.

Utilisation en génie végétal

Le cytise des Alpes est utilisé dans les aménagements, notamment en ornement et pour la stabilisation de terrains en zone de montagne.

L'élasticité et la densité de ses tiges lui permettent de résister à des charges importantes et, ainsi, de protéger rapidement les terrains en pente soumis aux risques d'érosion et de glissement de surface. L'important pouvoir de succion de ses racines lui permet de drainer efficacement le sol et ainsi de limiter la création de loupes de glissement. Comme toutes les légumineuses, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique permet d'enrichir rapidement le sol, favorisant ainsi la croissance des autres plantes. Par ses fleurs jaunes mellifères, son intégration dans les ouvrages permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des sites.



Fig. 8 - Situation typique sur pente rocheuse bien exposée.

Tolérant le gel, la sécheresse et les sols pauvres en éléments nutritifs, le cytise des Alpes peut être largement utilisé aux abords des rivières de montagne, notamment sur des substrats bruts très drainants jusqu'à 1 900 m. Doté d'un système racinaire relativement superficiel bien que très étendu (Kutschera et Lichtenegger 2002) et d'une faible tolérance aux immersions prolongées, il ne convient pas pour une implantation en pied de berge.

Le cytise des Alpes est disponible dans le commerce sous forme de graines, de plants en racines nues ou en motte. Compte tenu de l'existence de plusieurs cultivars ornementaux (« *Pendulum* » et « *Pyramidale* » notamment), une attention particulière devra être portée à la provenance des plants. Il est aussi possible de le bouturer (taux de reprise supérieur à 70 % à la fin de l'été – Graf *et al.* 2003). Si cette technique présente l'avantage d'implanter des souches locales adaptées aux conditions stationnelles, il est en revanche parfois difficile de trouver des populations suffisamment importantes pour prélever le matériel nécessaire à proximité des chantiers. Les plants ainsi créés présentent également l'inconvénient d'avoir une faible production racinaire les premières années, ce qui peut poser des problèmes pour la stabilisation des couches supérieures du sol après travaux.

Capable de produire des racines adventives, le cytise des Alpes peut être utilisé dans différents types d'aménagements comme les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés ou encore les couches de branches à rejets. On privilégiera toutefois son implantation sur les couches supérieures pour ces ouvrages ou encore dans les plantations de sommet de berge. Il peut notamment être associé à l'argousier (*Hippophae rhamnoides*), à l'alisier de Mougeot (*Sorbus mougeotii*), à l'épine-vinette (*Berberis vulgaris*), à l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), au sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) ou encore au saule appendiculé (*Salix appendiculata*).

Leontodon hispidus L.

Liondent hispide

Astéracées

Description

- Le liondent hispide est une espèce vivace mesurant de 10 à 60 cm (fig. 1).
- Les tiges, simples et monocéphales, sont velues ou glabres selon les sous-espèces. Elles sont nues ou munies de 1 à 3 écailles foliacées dans la partie supérieure et souvent épaissies sous le capitule (fig. 2).
- Les feuilles, disposées en rosette basale (fig. 1), sont oblongues à lancéolées et plus ou moins découpées selon les sous-espèces (fig. 3 et 4).
- Les fleurs, toutes ligulées, jaunes, sont disposées en capitule penché avant floraison (fig. 2). Le réceptacle est dépourvu de paillettes. L'involucre, long de 1 à 2 cm, est parsemé de poils très courts.
- Les akènes, glabres, mesurent 4 à 8 mm de long et sont surmontés d'un faisceau blanc à brunâtre de soies (aigrettes) dont les intérieures sont plumeuses (fig. 5).
- La floraison a lieu de juin à octobre.
- Le liondent hispide est une espèce très polymorphe comprenant six sous-espèces considérées parfois comme des espèces ou des variétés selon les auteurs. Quatre sont particulièrement adaptées pour une utilisation en génie végétal :
 - subsp. **hastilis** aux feuilles glabres grossièrement dentées (fig. 3) et tige grêle allongée (au moins 2 fois plus longues que les feuilles) ;
 - subsp. **hispidus** se distinguant de la précédente par ses feuilles nettement velues ;



Fig. 3 - Feuille grossièrement dentée (subsp. *hastilis*).



Fig. 4 - Feuille à divisions étroites (subsp. *hyoseroides*).



Fig. 1 - Port (subsp. *hyoseroides*).



Fig. 2 - Capitule penché avant floraison.

- subsp. **hyoseroides** aux feuilles glabres pennatifides à pennatiséquées à divisions étroites (fig. 4), rougeâtres à la base ;
 - subsp. **pseudocrispus** se distinguant de la précédente par ses feuilles ondulées-crêpues, nettement velues.
- À noter la présence de deux autres sous-espèces non décrites ici : subsp. **alpinus** et subsp. **opimus**.

Distribution et vulnérabilité

Le liondent hispide est une espèce européenne. Les différentes sous-espèces ont des distributions sensiblement différentes.

La sous-espèce *hastilis*, centre-européenne, est encore méconnue dans les Alpes du Nord. Elle est fréquente localement.

La sous-espèce *hispidus*, européenne, est très commune dans les Alpes du Nord.

La sous-espèce *hyoseroides*, des montagnes sud-européennes (des Alpes aux Carpates), est assez commune localement dans les secteurs supraforestiers du Nord des Alpes.

La sous-espèce *pseudocrispus*, centre et ouest-alpine, est assez commune sur le secteur.

Écologie

- Le liondent hispide est une espèce de pleine lumière se développant aussi bien en milieux herbacés (prairies grasses ou tourbeuses, pâturages, pelouses) qu'en milieux rocheux (éboulis, alluvions, rochers, etc.).
- Il croît sur des substrats généralement calcaires, plus ou moins grossiers (limons, sables, graviers, cailloux, blocs), assez riches en nutriments, secs à humides et plutôt neutres.
- La sous-espèce *hastilis* présente un optimum écologique dans les saulaies alluviales sur matériaux grossiers (*Salicion elaeagni*) de l'étage collinéen à l'étage subalpin (fig. 6a).
- La sous-espèce *hispidus* présente un optimum dans les prairies et pâturages gras (*Arrhenatheretalia*) de l'étage collinéen à l'étage subalpin.
- Les sous-espèces *hyoseroides* et *pseudocrispus* présentent un optimum au sein des éboulis calcaires frais (*Petasition paradoxii*) ou secs (*Stipion calamagrostis*) de l'étage montagnard à l'étage alpin (fig. 6b).



Fig. 5 - Akènes surmontés d'aigrettes.

Utilisation en génie végétal

Le liondent hispide (*L. hispidus*) est une espèce présente dans de nombreux mélanges grainiers (type « prairies fleuries » ou « gazons fleuris ») utilisés pour les ensemencements des parcs, talus autoroutiers et pistes de ski.

De par sa large répartition altitudinale (collinéen à alpin) et sa tolérance à la sécheresse, cette espèce peut être utilisée dans un grand nombre de situations, notamment sur des substrats bruts très drainants (fig. 6) aux étages montagnard et subalpin. Il faut toutefois veiller à ne pas l'utiliser sur des sols trop acides ou en conditions ombragées.

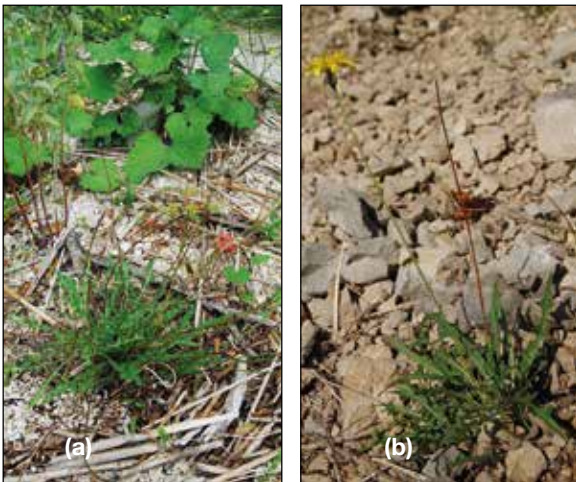


Fig. 6 - Deux situations typiques sur matériaux grossiers : (a) subsp. *hastilis* sur alluvions et (b) subsp. *hyoseroides* sur éboulis calcaires.

subsp. *rhaeticum*) ou le trèfle brun (*Trifolium badium*). Sur substrats plus grossiers, les sous-espèces *hastilis*, *hyoseroides* et *pseudocrispus* pourront être associées à la calamagrostide argentée (*Achnatherum calamagrostis*), à l'épilobe à feuilles de romarin (*Epilobium dodonaei*), au pétasite paradoxal (*Petasites paradoxus*), à la valériane des montagnes (*Valeriana montana*) ou au tussilage (*Tussilago farfara*).

Le liondent hispide est disponible dans le commerce sous forme de graines ou de plants en pots sans toutefois pouvoir certifier de quelle sous-espèce il s'agit (probablement majoritairement la subsp. *hispidus*). La commercialisation des sous-espèces *hastilis*, *hyoseroides* et *pseudocrispus*, plus résistantes à la sécheresse, devrait être développée.

Son système racinaire pivotant pouvant atteindre 50 cm de longueur lui permet de s'ancrer profondément dans le sol, créant ainsi une bonne complémentarité avec les autres espèces herbacées à système racinaire fasciculé. La production de rosettes de feuilles plaquées sur le sol et sa capacité à produire des racines latérales par croissance clonale (rapp. vol. syst. sout./aérien = 2,8 – Schiechtl 1973) lui confèrent une résistance importante à l'arrachement lors des crues.

Supportant mal la concurrence des autres espèces herbacées (notamment celle des fléoles), le recouvrement du liondent hispide a tendance à diminuer lorsque le couvert végétal augmente. Il offre toutefois une bonne capacité de dissémination les premières années et s'installe rapidement dans les vides créés par d'éventuelles lacunes de l'ensemencement. Son taux de germination élevé lui permet en effet d'occuper rapidement les trouées laissées par les semences à développement plus lent (Isselin-Nondedeu 2005).

Sur matériaux fins, la sous-espèce *hispidus* pourra être associée à d'autres espèces prairiales comme le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), la fléole des Alpes rhétiques (*Phleum alpinum*).

Lotus corniculatus L.

Lotier corniculé

Fabacées

Description

- Le lotier corniculé est une espèce herbacée vivace haute de 5 à 40 cm (fig. 1).
- Les tiges, ascendantes ou dressées, sont pleines et anguleuses. Elles sont glabres à nettement velues selon les sous-espèces.
- Les feuilles sont composées de 3 folioles supérieures obovales, oblancéolées ou oblongues et de deux stipules ovales, simulant des folioles (fig. 2). Elles sont ordinairement glabres et ciliées à la marge, parfois à pilosité étalée.
- Les fleurs, jaunes à orange, généralement lavées de rouge avant la floraison, sont solitaires ou rassemblées par 2 à 8 en glomérules ombelliformes longuement pédonculés (fig. 3). L'extrémité de la carène est terminée par un bec ascendant (fig. 4).
- Les gousses, droites, mesurent de 1,5 à 3,5 cm (fig. 5).
- La floraison a lieu de mai à septembre.
- Le lotier corniculé est une espèce très polymorphe comprenant quatre sous-espèces, parfois considérées comme des espèces à part entière par certains auteurs :



Fig. 1 - Port (subsp. *corniculatus*).



Fig. 2 - Feuille trifoliée accompagnée de 2 stipules simulant des folioles (subsp. *corniculatus*).



Fig. 3 - Inflorescence regroupant 3 à 8 fleurs (subsp. *corniculatus*).



Fig. 4 - Inflorescence regroupant moins de 3 fleurs (subsp. *alpinus*).

- subsp. **alpinus** (lotier des Alpes) de petite taille (moins de 10 cm), aux fleurs peu nombreuses (souvent moins de trois) devenant orange (fig. 4) et montrant une carène à pointe pourpre foncé ;
- subsp. **corniculatus** (lotier corniculé) glabre ou peu velue, comportant de 3 à 8 fleurs jaunes (fig. 3) et à pointe de la carène jaune ou rougeâtre ;
- subsp. **tenuis** (lotier glabre) se différencie du type par ses folioles linéaires à lancéolées plus étroites (moins de 4 mm) ;
- subsp. **valdepilosus** (lotier hirsute) velue à pilosité étalée, parfois dense, et silhouette souvent plus grêle.

Distribution et vulnérabilité

La sous-espèce *alpinus* est présente dans les montagnes sud-européennes. Elle est commune dans les secteurs supraforestiers nord-alpins.

La sous-espèce *corniculatus* est présente dans toute l'Eurasie et en Afrique septentrionale. Elle est très commune dans les Alpes du Nord.

La sous-espèce *valdepilosus*, de distribution sud-européenne, est commune dans les vallées intra-alpines et plus ponctuelle ailleurs.

La sous-espèce *tenuis*, d'affinité méridionale, est présente en Eurasie et en Afrique septentrionale. Elle est rare dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) est une espèce de pleine lumière se rencontrant le plus souvent dans les milieux herbacés, mais également dans les milieux rudéraux (sur substrat sablo-graveleux) et sur alluvions (fig. 6).
- Il croît sur divers types de matériaux, frais à moyennement secs, basiques à légèrement acides (fig. 6 et 7).
- La sous-espèce *alpinus* présente un optimum écologique dans les pelouses subalpines et alpines calcicoles sèches (*Elyno-Seslerietea*) aux étages subalpin et alpin (jusqu'à 3 000 m).
- La sous-espèce *corniculatus* présente un optimum au sein des pelouses sèches (*Festuco-Brometea*) et prairies grasses (*Molinio-Arrhenatheretea*) de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).
- La sous-espèce *tenuis* présente un optimum au sein des prairies humides s'asséchant temporairement (*Molinion*) aux étages collinéen et montagnard inférieur.
- La sous-espèce *valdepilosus* se développe dans les pelouses sèches (*Festuco-Brometea*) aux étages collinéen et montagnard (jusqu'à 1 700 m).



Fig. 5 - Gousses droites (subsp. *corniculatus*).



Fig. 6 - Situation en contexte alluvial sur matériaux grossiers (subsp. *alpinus*).

Utilisation en génie végétal

Le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) est largement employé dans les mélanges grainiers pour l'ensemencement des prairies, des talus autoroutiers, des berges de rivières et pistes de ski.

De par son développement rapide, son enracinement profond (système racinaire pivotant pouvant atteindre 1 m) et la densité de ses tiges aériennes, cette espèce offre une bonne résistance à la traction et assure une protection rapide des couches superficielles du sol. Comme toutes les fabacées, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique permet d'enrichir rapidement le substrat, favorisant ainsi la croissance des autres plantes.

De par ses fleurs jaunes très attractives pour les insectes, son intégration dans les ouvrages permet d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements. Sa large amplitude altitudinale, sa tolérance au froid et à la sécheresse

sont des arguments de choix pour une utilisation en rivière de montagne, notamment la sous-espèce *alpinus* plus adaptée pour les aménagements alluviaux à plus de 1 500 m d'altitude. Il convient parfaitement en association avec des graminées au système racinaire de type fasciculé telles que le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), la canche cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*), la calamagrostide bigarrée (*Calamagrostis varia*), la fléole des Alpes (*Phleum alpinum*) ou la seslérie bleuâtre (*Sesleria caerulea*), dont il favorise la croissance et assure une complémentarité à l'enracinement et à la couverture végétale. Il peut aussi être associé à d'autres fabacées comme l'anthyllide alpestre (*Anthyllis vulneraria* subsp. *alpestris*), le trèfle brun (*Trifolium badium*) ou le trèfle de Thal (*Trifolium thalii*) avec lesquelles il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

L'utilisation régulière de cette espèce dans les aménagements et la présence de nombreux cultivars dans le commerce ont eu pour effet de créer de nombreuses hybridations et introgressions avec des souches non alpines. Il est donc important, à l'avenir, de privilégier



Fig. 7 - Situation sur matériaux graveleux-terreux (subsp. *alpinus*).

l'usage de souches locales dans les ouvrages afin de limiter ces phénomènes et de favoriser la rapidité d'établissement des graines. Les sous-espèces *alpinus* et *corniculatus* sont disponibles dans le commerce et sont parfois intégrées par défaut dans certains mélanges grainiers.

La production en vue de la commercialisation de semences de lotier corniculé est soumise à une réglementation spécifique en France (chap. III.3.2.4).

Myricaria germanica

(L.) Desv.

Myricaire

Tamaricacées

Description

- La myricaire est un arbrisseau élané formant généralement des buissons denses atteignant parfois 2,5 m (fig. 1).
- Les rameaux, grêles et flexibles, sont dressés. Initialement verts, ils deviennent pourpres à rosés avec l'âge (fig. 2).
- Les bourgeons, glabres et globuleux, atteignent 3 mm de diamètre. Les écailles, nombreuses, sont marron à verdâtres et pourvues d'une marge plus claire (fig. 2).
- Les feuilles sont glauques. Celles des rameaux principaux, linéaires à lancéolées, atteignent 1 cm et sont rapidement caduques (fig. 3). Celles des rameaux axillaires, en forme d'écailles plus ou moins imbriquées, mesurent moins de 4 mm.
- Les fleurs, brièvement pédicellées, de couleur rose pâle, sont rassemblées en grappes terminales longues de 3 à 15 cm (fig. 4). Elles sont composées de 5 pétales d'environ 4 mm de long, de 5 sépales et de 10 étamines soudées (fleurs pentamères).
- Les capsules, piriformes, longues de 8 à 12 mm, sont grises à verdâtres (fig. 5). Les graines sont munies d'aigrettes pédicellées.
- La floraison a lieu de mai à juillet.
- La myricaire peut éventuellement être confondue avec les tamaris (*Tamarix spp.*). Ces derniers, d'affinité littorale, ne sont toutefois pas spontanés dans les Alpes du Nord (ils sont parfois plantés à proximité des habitations).



Fig. 1 - Port buissonnant.



Fig. 2 - Bourgeons glabres et globuleux.



Fig. 3 - Feuilles glauques, linéaires à lancéolées.



Fig. 4 - Fleurs rassemblées en grappe terminale.



Fig. 5 - Capsules piriformes.

Distribution et vulnérabilité

La myricaire est une espèce eurasiatique peu fréquente, dispersée sur l'ensemble des massifs montagneux du territoire franco-suisse.

Elle est rare dans les Pyrénées, aux abords du Rhin, dans le Jura et sur le Plateau suisse. Elle est plus fréquente dans les Alpes où elle demeure toutefois assez localisée.

Dans les Alpes du Nord, elle peut être localement abondante, mais est globalement peu fréquente et dispersée (abords de l'Arve, de l'Arc, de l'Isère, du Drac, du Giffre, du Rhône, du Trient, de la Navisence, de la Borgne, etc.).

Écologie

- La myricaie est une espèce pionnière de pleine lumière, des terrasses alluviales (lit majeur) des rivières et torrents de montagne (fig. 6).
- Elle se développe sur des substrats alluviaux plutôt grossiers (sables, graviers, galets), assez riches en nutriments, à humidité variable, soumis à des crues régulières, neutres à basiques. La survie des plantules est toutefois conditionnée à la présence de matériaux fins et humides.
- Elle trouve son optimum écologique au sein des saulaies alluviales sur matériaux grossiers (*Salicion elaeagni*) et dans les communautés herbacées riveraines d'altitude (*Epilobion fleischeri*).
- Elle se rencontre de l'étage collinéen à l'étage subalpin (jusqu'à 2 100 m) avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Situation typique sur banc d'alluvions à l'étage subalpin.

Utilisation en génie végétal

La myricaie est une espèce à fort potentiel pour le génie végétal même si elle est encore assez peu utilisée dans ce domaine. Elle colonise naturellement les terrasses alluviales de l'étage montagnard et forme souvent des colonies denses à proximité immédiate du lit mineur.

Adaptée aux substrats alluviaux grossiers, cette espèce peut être utilisée sur des matériaux bruts drainants, à condition d'être implantée en pied de berge, à proximité de la nappe. Dans cette situation, son port buissonnant fourni et la souplesse de ses tiges aériennes lui permettent de dissiper efficacement l'énergie du courant (fig. 7) et de piéger les sédiments fins (espèce tolérant un ensevelissement important). Son système racinaire profond lui offre une bonne résistance aux forces d'arrachement et favorise le maintien des couches superficielles du sol. La myricaie est capable de supporter de longues et intenses périodes de sécheresse à condition que son système racinaire soit suffisamment développé.



Fig. 7 - Situation en pied de berge.

Cette espèce offre un très bon taux de reprise en reproduction végétative (plus de 80 % en pied de berge). Elle peut ainsi être utilisée sous forme de boutures ou de plançons dans divers types d'aménagements comme les caissons en rondins végétalisés, les lits de plants et plançons, les boutures ou les ramilles anti-affouillement. Les boutures supportent toutefois mal les sécheresses prolongées après leur plantation (Lavaine *et al.* 2011). Il est ainsi préconisé, le cas échéant, de les arroser abondamment en début de reprise végétative. Compte tenu du faible diamètre de ses rameaux, le bouturage demeure assez aléatoire et le matériel végétal requis (rameaux de plus de 25 cm) est rarement abondant aux abords des chantiers.

La myricaie peut être utilisée jusqu'à 2 000 m en complément des saules se développant sur des matériaux grossiers (*Salix daphnoides*, *S. elaeagnos*, *S. myrsinifolia* et *S. purpurea* notamment), favorisant ainsi la diversification spécifique au sein des aménagements. Elle présente toutefois une plus faible compétitivité que ces derniers qui produisent plus de biomasse aérienne, notamment à partir de boutures. Il est ainsi préconisé de l'utiliser avec des densités importantes, en pied de berge dans des zones très perturbées, afin de limiter la compétition des autres espèces ligneuses. Elle peut enfin être insérée sous forme de ramilles vivantes plaquées au sol à l'horizontal sous une fascine morte ou sous un enrochement de pied de berge.

La myricaie est disponible dans certaines pépinières, mais provient souvent de populations asiatiques. L'utilisation de boutures issues de populations naturelles proches des chantiers devra donc être privilégiée, garantissant ainsi l'implantation de souches locales.

La myricaie bénéficie d'un statut de protection totale dans certains cantons suisses (Genève et Vaud).

Onobrychis montana DC.

Sainfoin des montagnes

Fabacées

Description

- Le sainfoin des montagnes est une espèce vivace cespiteuse mesurant généralement moins de 30 cm (fig. 1).
- Les tiges, couchées à ascendantes, sont courtes et pubescentes. Les stipules, membraneuses, sont nettement soudées à la base et terminées par une longue pointe fine.
- Les feuilles, imparipennées, sont composées de 9 à 17 folioles étroitement elliptiques (fig. 2).
- Les fleurs, rose, veinées de pourpre, sont rassemblées en grappes courtes et denses présentant une silhouette pyramidale à ovoïde en début de floraison (fig. 3), s'allongeant à la fructification. L'étendard, plus court que la carène, est généralement plus pâle que celle-ci (fig. 4). Les ailes sont ordinairement aussi longues que le calice.
- Les fruits sont des gousses ovoïdes et comprimées mesurant 6 à 8 mm de diamètre. Elles sont alvéolées, pubescentes et munies de pointes longues de 0,5 à 1,5 mm (fig. 5).
- La floraison a lieu de juin à août.



Fig. 1 - Port cespiteux.



Fig. 2 - Feuille imparipennée.



Fig. 3 - Fleurs rassemblées en grappe courte et dense.



Fig. 4 - Fleurs à étendard plus court que la carène.



Fig. 5 - Gousse ovoïde, comprimée et alvéolée.

- Le sainfoin à feuilles de vesce (*Onobrychis viciifolia*) se distingue du sainfoin des montagnes par un port dressé, des fleurs à étendard égalant ou dépassant la carène, des ailes plus courtes que le calice et des gousses munies de pointes mesurant moins de 0,5 mm. À l'étage montagnard, on observe régulièrement des introgressions entre ces deux espèces. Il en résulte de nombreuses plantes à la morphologie intermédiaire, notamment entre 1 000 et 1 500 m.

Distribution et vulnérabilité

Le sainfoin des montagnes est une espèce sud-européenne montagnarde. En France et en Suisse, il est surtout présent dans les Alpes et beaucoup plus rare dans le Jura.

Il est commun dans les secteurs périalpins et intra-alpins des Alpes du Nord.

Écologie

- Le sainfoin des montagnes est une espèce de pleine lumière se développant préférentiellement dans les prairies, pelouses et pâturages de montagne (fig. 6), ainsi que sur les terrasses alluviales.
- Il croît indifféremment sur divers types de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, cailloux), généralement calcaires et plutôt secs (fig. 7), neutres à basiques.
- Il présente un optimum écologique dans les pelouses subalpines et alpines calcicoles sèches (*Elyno-Seslerietea*).
- Il se développe de l'étage montagnard à l'étage alpin inférieur (jusqu'à 2 500 m) avec un optimum à l'étage subalpin.



Fig. 6 - Situation en pelouse sèche montagnarde intra-alpine (*Mesobromion*).

Utilisation en génie végétal

Contrairement au sainfoin à feuilles de vesce, présent dans de nombreux mélanges grainiers, le sainfoin des montagnes n'est pas encore utilisé en génie végétal. Il offre toutefois de réelles potentialités dans ce domaine.

Comme toutes les fabacées, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique permet d'enrichir rapidement le substrat, favorisant ainsi la croissance des autres plantes. De par son système racinaire pivotant profondément ancré et la densité de ses tiges aériennes, cette espèce offre une bonne résistance à la traction et assure une protection rapide des couches superficielles du sol. Son port rampant et son importante capacité de dissémination lui permettent de couvrir rapidement le sol après ensemencement (fig. 7).

Sa large amplitude altitudinale, sa tolérance au froid et à la sécheresse permettent de l'utiliser jusqu'à 2 500 m sur des substrats bruts très drainants. De par ses fleurs roses très attractives pour les insectes, son intégration dans les ouvrages permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements.

Il peut être associé à des graminées au système racinaire fasciculé, telles que le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), la calamagrostide bigarrée (*Calamagrostis varia*) ou la fléole des Alpes rhétiques (*Phleum alpinum* subsp. *rhaeticum*), dont il assure une complémentarité à l'enracinement et favorise la croissance.

Le sainfoin des montagnes n'est pas encore disponible dans le commerce.



Fig. 7 - Situation typique sur substrat calcaire sec à l'étage subalpin.

Phleum alpinum L.

Fléole des Alpes

Poacées

Description

- La fléole des Alpes est une espèce vivace mesurant de 15 à 50 cm de haut et formant des touffes plus ou moins denses (fig. 1).
- La tige, ascendante à dressée (fig. 2), est glabre.
- Les feuilles sont scabres au bord seulement. Elles sont larges de 3 à 6 mm et terminées en pointe aiguë ; la supérieure est munie d'une gaine généralement nettement renflée (fig. 3). La ligule, longue d'environ 1 mm, est tronquée (fig. 4).
- L'inflorescence, ovoïde à cylindrique et teintée de violet, est une panicule contractée longue de 1 à 6 cm (fig. 5 et 6). Elle forme un arc continu lorsqu'on la plie.
- Les épillets, insérés directement sur l'axe de l'inflorescence, sont subsessiles, les rameaux étant soudés à l'axe. Les glumes, hérissées de longs cils raides, sont brusquement rétrécies en une arête allongée dépassant 2 mm.
- La floraison a lieu de juin à août.
- Deux sous-espèces sont décrites et parfois considérées comme des espèces à part entière :
 - subsp. **alpinum** (fléole des Alpes au sens strict) présentant une inflorescence ovoïde ne dépassant pas 2 cm de long (fig. 5) ; les arêtes des glumes sont glabres ;
 - subsp. **rhaeticum** (fléole des Alpes rhétiques) présentant une inflorescence cylindrique longue de plus de 2 cm (fig. 6) ; les arêtes des glumes sont ciliées.



Fig. 1 - Port cespiteux (subsp. *alpinum*).



Fig. 2 - Base de la tige ascendante.



Fig. 3 - Feuille supérieure munie d'une gaine nettement renflée.



Fig. 4 - Ligule courte et tronquée.

- La fléole des Alpes peut éventuellement être confondue avec deux autres espèces du genre *Phleum* :
 - la fléole des prés (*P. pratense*) s'en différencie par ses feuilles scabres sur les 2 faces et des arêtes des glumes plus courtes, ne dépassant pas 2 mm ;
 - la fléole hirsute (*P. hirsutum*) présente une panicule contractée qui se fragmente lorsqu'on la plie (ne formant pas un arc continu).

Distribution et vulnérabilité

La fléole des Alpes est une espèce ouest-européenne montagnarde présente dans les Alpes, le Jura, le Massif central, la Corse et les Pyrénées.

Elle est assez commune dans les Alpes du Nord.

La sous-espèce *rhaeticum* des montagnes sud et centre-européennes y est répandue, tandis que la sous-espèce *alpinum*, arctico-alpine, est plus rare et essentiellement intra-alpine.

Écologie

- La fléole des Alpes est une espèce de pleine lumière des prairies et pâturages d'altitude ainsi que des repaires à bétail. Elle se rencontre parfois au sein des tourbières, éboulis humides, combes à neige et zones alluviales d'altitude.
- Elle croît sur des matériaux fins (tourbe, argiles, limons) plus ou moins caillouteux. La sous-espèce *alpinum* se développe préférentiellement sur des sols pauvres en éléments nutritifs, neutres à acides, humides. La sous-espèce *rhaeticum* croît sur des sols riches en éléments nutritifs, basiques à légèrement acides, ni trop secs, ni trop humides.
- La sous-espèce *rhaeticum* présente un optimum écologique dans les pâturages gras subalpins et alpins (*Poion alpinae* – fig. 7).
- La sous-espèce *alpinum* présente un optimum au sein des combes à neige (*Salicetea herbaceae*), bas-marais acide (*Caricion nigrae*) et alluvions d'altitude (*Caricion bicoloris-atrofuscae*).
- Les deux sous-espèces se développent de l'étage montagnard à l'étage alpin (jusqu'à 2 800 m) avec un optimum à l'étage subalpin pour la sous-espèce *rhaeticum*.



Fig. 5 - Inflorescence ovoïde (subsp. *alpinum*).



Fig. 6 - Inflorescence cylindrique (subsp. *rhaeticum*).

Utilisation en génie végétal

La fléole des Alpes rhétiques (*P. alpinum* subsp. *rhaeticum*) est une espèce utilisée dans les mélanges grainiers pour l'ensemencement des pistes de ski. Elle est aussi adaptée pour une utilisation dans les aménagements en rivières de montagne.

Sa tolérance à la sécheresse et sa large amplitude altitudinale permettent d'utiliser cette espèce sur des substrats bruts drainants jusqu'à 2 800 m d'altitude. Sa capacité de dissémination et sa forte compétitivité lui permettent de s'installer rapidement après ensemencement (Krautzer *et al.* 2005), favorisant ainsi la stabilisation rapide des couches superficielles du sol.

Son système racinaire fasciculé et son port en touffe permettent une stabilisation et une protection durable des sols, assurant ainsi une bonne complémentarité avec les légumineuses à racines pivotantes comme l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*) ou le lotier des Alpes (*Lotus alpinus*), et d'autres graminées plus gazonnantes comme l'agrostide capillaire (*Agrostis capillaris*) ou l'avoine dorée (*Trisetum flavescens*). En conditions naturelles, la fléole des Alpes rhétiques se retrouve également régulièrement en association avec le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), le liondent hispide (*Leontodon hispidus*), le trèfle brun (*Trifolium badium*) ou encore la crépide dorée (*Crepis aurea* – fig. 7).



Fig. 7 - Situation typique (subsp. *rhaeticum*) au sein d'un pâturage gras subalpin (*Poion alpinae*).

Dotée d'une forte capacité d'établissement et d'une grande plasticité écologique, elle peut être incorporée dans de nombreux mélanges grainiers, mais ne devra toutefois pas dépasser 5 % du poids total de graines (espèce monopolisatrice). La sous-espèce *rhaeticum* est disponible dans le commerce sous forme de graines.

Compte tenu de son écologie plus stricte et notamment de ses exigences hydriques, la sous-espèce *alpinum* est moins adaptée pour une utilisation en génie végétal. Elle peut néanmoins convenir pour la réalisation d'ensemencements ou d'aménagements à l'étage alpin sur matériaux fins.

Poa alpina L.

Pâturin des Alpes

Poacées

Description

- Le pâturin des Alpes est une espèce vivace cespiteuse haute de 7 à 60 cm (fig. 1).
- La tige, dressée, lisse et cylindrique, est épaissie à la base (fig. 2). Elle est dépourvue de feuille dans sa partie supérieure.
- Les feuilles, à limbes courts, sont pourvues de gaines légèrement renflées. Elles sont larges de 1 à 5 mm et brusquement rétrécies en une pointe aiguë (fig. 3). La feuille supérieure est munie d'une gaine beaucoup plus longue que le limbe. Les ligules des feuilles supérieures, longues et aiguës, mesurent 2,5 à 5 mm (fig. 4). Celles des feuilles inférieures sont courtes et tronquées (fig. 5).
- L'inflorescence est une panicule de 2 à 7 cm plus ou moins compacte (fig. 6 et 7). Les rameaux sont généralement étalés à réfléchis à maturité, minces et flexueux. Les inférieurs sont solitaires ou réunis par deux.
- Les épillets, luisants, violacés, panachés de blanc et de vert, réunissent 5 à 10 fleurs (fig. 8). Ils sont souvent vivipares (fig. 9). Les glumelles sont velues-ciliées sur les bords.
- La floraison a lieu de mai à septembre.
- Le pâturin des Alpes peut facilement être confondu avec le pâturin lâche (*P. laxa*) et le petit pâturin (*P. minor*) dont les rameaux inférieurs de l'inflorescence sont appliqués contre la tige principale.
- Il présente également de grandes similitudes avec le pâturin de Baden (*P. badensis*), aux feuilles très bleu-tées, et le pâturin de Molineri (*P. molinerii*) qui présente des feuilles à marges scariées.



Fig. 6 - Inflorescence en panicule plus ou moins compacte.



Fig. 7 - Inflorescence (forme vivipare).



Fig. 1 - Port cespiteux.



Fig. 2 - Tige épaissie à la base.



Fig. 3 - Feuille brusquement rétrécie en pointe aiguë.



Fig. 4 - Ligule d'une feuille supérieure longue et aiguë.



Fig. 5 - Ligule d'une feuille inférieure courte et tronquée.

Distribution et vulnérabilité

Le pâturin des Alpes présente une distribution euro-sibérienne et nord-américaine. Il est assez commun dans le Jura et les Alpes et est également recensé dans les Pyrénées, le Massif central, les Cévennes et la Corse.

Il est fréquent dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le pâturin des Alpes est une espèce de pleine lumière se développant préférentiellement au sein des prairies et pâturages d'altitude plutôt riches en matière organique. Il se rencontre également dans les combes à neige, sur alluvions et dalles rocheuses, et au sein des boisements clairs de conifères (pessières, mélézins, pinèdes).
- Il croît sur des matériaux très divers (de l'argile jusqu'au bloc), calcaires ou siliceux et a son optimum sur des sols riches en éléments nutritifs, basiques à légèrement acides, ni trop secs, ni trop humides. Il tolère néanmoins la pauvreté en éléments nutritifs et la sécheresse temporaire des sols superficiels sur dalles rocheuses (fig. 10).
- Il présente un optimum écologique dans les pâturages gras subalpins et alpins (*Poion alpinae*).
- Il se développe de l'étage montagnard à l'étage alpin (jusqu'à 3 600 m) avec un optimum à l'étage subalpin, mais atteint ponctuellement les étages collinéen et nival.



Fig. 8 - Épillets violacés panachés de blanc et de vert.



Fig. 9 - Épillets souvent vivipares.

Utilisation en génie végétal

Le pâturin des Alpes est utilisé pour l'ensemencement des pistes de ski et la restauration des terrains de montagne. Il constitue aussi une espèce à fort potentiel pour le génie végétal en rivière de montagne.

Doté d'une grande amplitude écologique et d'un important potentiel de colonisation, notamment grâce à sa faculté de production de plantules par viviparité, il couvre rapidement le sol et colonise les vides créés par d'éventuelles carences de l'ensemencement. Même si son système racinaire reste superficiel, il constitue un couvre-sol important s'il est associé à des espèces à enracinement profond comme le lotier des Alpes (*Lotus alpinus*) ou l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*).

Sa large amplitude altitudinale (de 600 à 3 600 m) et sa tolérance au froid et à la sécheresse sont des atouts importants pour une utilisation en rivières de montagne dans différents contextes. À l'étage subalpin, il croît d'ailleurs régulièrement aux abords des torrents et montre une bonne résistance à la traction et à l'immersion temporaire (fig. 1 et 11). Il pourra être associé notamment à la fléole des Alpes rhétiques (*Phleum alpinum* subsp. *rhaeticum*), à la fétuque noirissante (*Festuca nigrescens*), au liondent hispide (*Leontodon hispidus*) ou encore au trèfle brun (*Trifolium badium*), avec lesquels il est régulièrement observé en milieu naturel.

Le pâturin des Alpes est disponible dans le commerce sous forme de graines. Pouvant être localement abondant aux étages montagnard et subalpin, il peut aussi être multiplié et transplanté à partir de la division de ses touffes, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et favorisant sa rapidité d'établissement. Des essais de plantation de cette espèce réalisés sur de petites zones érodées en montagne à partir de cette technique sous couvert d'une végétation pionnière pré-établie ont donné d'excellents résultats (Florineth in Barker et al. 1995).



Fig. 10 - Situation sur dalle rocheuse.



Fig. 11 - Situation en contexte alluvial.

Prunus padus L.

Merisier à grappes

Rosacées

Description

- Le merisier à grappes est un arbuste ou un petit arbre caducifolié pouvant atteindre 15 m de haut (fig. 1).
- L'écorce, brune à grisâtre et légèrement crevassée, montre des lenticelles rousses devenant blanchâtres (fig. 2). Les jeunes rameaux, rouges à violacés (fig. 3), glabres, dégagent une odeur fétide caractéristique.
- Les bourgeons, brun rougeâtre à orangés, sont ovoïdes, allongés, pointus et plus ou moins appliqués sur le rameau (fig. 3).
- Les feuilles, alternes, ovales à elliptiques, mesurent de 5 à 10 cm de long. Elles sont aiguës au sommet, finement et régulièrement denticulées (fig. 4). Elles sont mates et vert sombre à la face supérieure (fig. 5), plus pâles et parfois velues à l'aisselle des nervures secondaires au revers (fig. 6).
- Les fleurs, blanches, sont disposées en grappes de 5 à 14 cm, d'abord dressées puis pendantes (fig. 7).
- Les fruits sont de petites drupes (merises) globuleuses, noires et brillantes, mesurant de 6 à 9 mm de diamètre (fig. 8).
- La floraison a lieu d'avril à juin, en même temps que la feuillaison.



Fig. 4 - Marge des feuilles finement et régulièrement denticulée.



Fig. 5 - Feuille mate à la face supérieure.



Fig. 6 - Feuille plus pâle au revers.



Fig. 1 - Port pouvant devenir arboré.



Fig. 2 - Écorce d'un jeune rameau présentant des lenticelles rousses devenant blanchâtres (subsp. *borealis*).



Fig. 3 - Bourgeons ovoïdes, pointus et rameau de l'année rougeâtre (subsp. *borealis*).

- Deux sous-espèces sont actuellement décrites : subsp. *padus* et subsp. *borealis*, cette dernière présentant des nervures saillantes sur la face inférieure des feuilles et des grappes dressées à étalées.
- À l'état végétatif, le merisier à grappes peut être confondu avec le merisier (*P. avium*), qui s'en distingue par ses rameaux de l'année beiges à gris clair, ne dégageant pas d'odeur fétide.

Distribution et vulnérabilité

La sous-espèce *padus*, de distribution eurasiatique, est présente dans toute l'Europe à l'exception de la région méditerranéenne et des Balkans.

Elle est présente de façon disséminée sur l'ensemble du territoire franco-suisse. Assez commune des Vosges aux Préalpes, elle demeure relativement rare ailleurs, notamment dans les Alpes internes.

La sous-espèce *borealis*, des montagnes européennes, est présente de façon inconstante des Vosges aux Carpates. Elle est plus commune que la précédente dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le merisier à grappes est une espèce de demi-ombre. La sous-espèce *padus* se rencontre aux abords des rivières et des ruisseaux, dans les boisements humides. La sous-espèce *borealis* se développe dans les brousses subalpines fraîches (aulnaies vertes, saulaies alluviales), voire les forêts claires de conifères et les mégaphorbiaies.
- Le merisier à grappes croît sur des matériaux alluvionnaires limono-argileux à sablo-graveleux, basiques à acides, frais à humides. La sous-espèce *borealis* a un optimum sur les substrats modérément alimentés en eau, sur roches calcaires ou siliceuses. La sous-espèce *padus* se rencontre plus rarement sur silice.
- La sous-espèce *padus* présente un optimum écologique dans les fourrés et forêts alluviales (*Fraxinetalia*), des étages collinéen et montagnard.
- La sous-espèce *borealis* se développe préférentiellement dans les brousses subalpines fraîches (*Betulo-Alnetea* – fig. 9) et les aulnaies alluviales (*Alnion incanae*) aux étages montagnard et subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 7 - Inflorescence en grappe dressée (subsp. *borealis*).



Fig. 8 - Drupes noires et brillantes regroupées en grappe pendante (subsp. *borealis*).

Utilisation en génie végétal

Le merisier à grappes est principalement utilisé en ornement, mais aussi pour la restauration des terrains de montagne. Doté d'une croissance rapide, d'une capacité à rejeter de souche et à drageonner, il offre de nombreuses potentialités dans le domaine du génie végétal. Résistant à l'ensevelissement (neige, coulée de boue, etc.) et produisant un nombre important de racines traçantes et adventives (Kutschera et Lichtenegger 2002), son implantation favorise la stabilisation



Fig. 9 - Situation sur terrasse alluviale en compagnie de saules alpins.

des couches superficielles du sol. L'important pouvoir de succion de ses racines lui permet aussi de drainer efficacement le substrat et de limiter la création de loupes de glissement. Son abondante floraison mellifère et sa production de drupes très appréciées des oiseaux permettent aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des sites.

Dotée d'une grande résistance au froid et à la sécheresse, la sous-espèce *borealis* peut être utilisée jusqu'à 2 000 m sur des substrats bruts drainants, en pied comme en sommet de berge. L'utilisation de la sous-espèce *padus* devra par contre être limitée à l'étage montagnard sur des sols bien alimentés en eau.

La sous-espèce *padus* est disponible dans de nombreuses pépinières. Compte tenu de l'existence de plusieurs cultivars ornementaux (« *Colorata* » et « *Albertii* » notamment), une attention particulière devra être portée à la provenance des plants. La sous-espèce *borealis*, plus adaptée pour les chantiers d'altitude sur terrain filtrant, n'est pas encore disponible dans le commerce. Bien qu'il soit possible de la bouturer en pépinière, l'utilisation de plants en racines nues devra être privilégiée. En effet, le taux de reprise très aléatoire en conditions naturelles (apparemment meilleur à la fin de l'été) et les difficultés pour trouver des populations suffisamment importantes à proximité des chantiers ne permettent pas de l'utiliser sous cette forme.

Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés (Florineth 2004). Pour les chantiers situés à moins de 1200 m, la sous-espèce *padus* peut notamment être associée à l'aulne blanc (*Alnus incana*), au bouleau pendant (*Betula pendula*), au frêne (*Fraxinus excelsior*) et à divers saules comme les saules noirissant (*Salix myrsinifolia*) ou pourpre (*S. purpurea*). Au-dessus de 1200 m, la sous-espèce *borealis* peut être associée à l'aulne vert (*Alnus viridis*), au sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) ainsi qu'aux saules appendiculé (*Salix appendiculata*), alpestre (*S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*), pourpre (*S. purpurea* subsp. *angustior*), fétide (*S. foetida*) et bleuâtre (*S. caesia*), qu'il cotoie fréquemment en milieu naturel (fig. 9).

Ribes alpinum L.

Groseillier des Alpes

Grossulariacées

Description

- Le groseillier des Alpes est un arbrisseau caducifolié mesurant de 0,5 à 2 m de haut (fig. 1).
- Les tiges, dressées ou arquées, sont dépourvues d'épines. L'écorce, d'abord beige à grisâtre et souvent luisante (fig. 2), devient brun noirâtre et s'exfolie avec l'âge (fig. 3).
- Les bourgeons, bruns à orange clair, sont ovales-lancéolés, pointus au sommet et pourvus de plusieurs écailles imbriquées (fig. 2).
- Les feuilles, alternes et petites (de 1 à 5 cm), sont munies de poils appliqués épars sur la face supérieure (fig. 4). Elles sont brillantes, glabres ou légèrement pubescentes sur les nervures au revers (fig. 5). Composées de 3 à 5 lobes plus ou moins incisés et dentés, elles sont portées par un court pétiole ne dépassant généralement pas la longueur du limbe.
- Les fleurs, jaunâtres et unisexuées, sont réunies en courtes grappes dressées. Les inflorescences mâles comprennent de 10 à 30 fleurs (fig. 6), les femelles de 3 à 10. Les pétales, dressés, sont 4 à 5 fois plus courts que les sépales qui sont étalés ou réfléchis.



Fig. 4 - Face supérieure de la feuille munie de poils appliqués.



Fig. 5 - Feuille à face inférieure brillante et plus ou moins glabre.



Fig. 1 - Port dressé à arqué.



Fig. 2 - Bourgeons orange sur rameau de l'année gris et luisant.



Fig. 3 - Écorce âgée devenant brun noirâtre.

- Les fruits sont de petites baies globuleuses rouges et luisantes mesurant de 4 à 8 mm de diamètre (fig. 7).
- La floraison a lieu d'avril à début juin.
- Le groseillier rouge (*R. rubrum*) et le groseillier des rochers (*R. petraeum*) se distinguent du groseillier des Alpes par leurs feuilles munies d'un long pétiole dépassant généralement la longueur du limbe et leurs grappes pendantes.

Distribution et vulnérabilité

Le groseillier des Alpes est une espèce eurasiatique méditerranéenne. Elle est présente dans les montagnes du Centre et du Sud de la France, les Pyrénées, les Vosges, le Jura et les Alpes. Elle est absente de l'Ouest de la France et de la région méditerranéenne.

Elle est assez commune dans les montagnes des Alpes du Nord, notamment les Préalpes (elle est plus rare dans les Alpes internes).

Écologie

- Le groseillier des Alpes est une espèce de demi-ombre se développant dans divers types de fourrés et boisements (hêtraies, charmaies, chênaies, érablaies de ravins, pinèdes).
- Il croît le plus souvent sur des matériaux calcaires à granulométrie élevée (limons, graviers, blocs), basiques à légèrement acides, modérément secs à frais.
- Il présente un optimum écologique au sein des hêtraies et forêts de feuillus associées (*Fagetalia* – fig. 8).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (de 400 à 1 800 m) avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Inflorescence mâle de 10 à 30 fleurs réunies en grappe dressée.



Fig. 7 - Baies rouges et luisantes.

Utilisation en génie végétal

Bien que déjà utilisé en plantations ornementales (talus autoroutiers, réaménagement de carrières et de décharges, aménagement de parcs et jardins), le groseillier des Alpes est encore assez peu utilisé en génie végétal pour la stabilisation des berges de rivières. Il présente cependant de nombreuses potentialités dans ce domaine.

Son port exclusivement buissonnant et ses nombreuses tiges souples (rejetant de souche) lui permettent de protéger efficacement les couches superficielles du sol sur de fortes pentes, lors de crues ou glissements de terrain. Supportant bien le gel et les sécheresses temporaires, il peut être utilisé jusqu'à 1 800 m sur des substrats bruts très caillouteux (fig. 8). Son enracinement superficiel et sa faible tolérance aux immersions prolongées ne permettent toutefois pas son implantation en pied de berge. Supportant un ombrage important, il peut être intégré dans des ouvrages réalisés sur des cours d'eau très encaissés. Il est aussi tolérant au sel, ce qui autorise une implantation à proximité immédiate de routes régulièrement salées l'hiver.



Fig. 8 - Situation typique sur blocs calcaires en lisière d'une hêtraie.

Grâce à sa production abondante de baies rouges très appréciées des oiseaux, son intégration dans les ouvrages permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements.

Bien qu'il soit possible de le bouturer en pépinière, le taux de reprise très aléatoire en conditions naturelles (la probabilité de reprise est plus élevée en début d'hiver) ne permet pas de l'utiliser sous cette forme en génie végétal. L'implantation de plants en racines nues devra ainsi être privilégiée. Il pourra être intégré dans des lits de plants et plançons, des caissons en rondins végétalisés ou des plantations en sommet de berge, en association avec l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le frêne (*Fraxinus excelsior*), le chèvrefeuille des haies (*Lonicera xylosteum*), le chèvrefeuille noir (*Lonicera nigra*), le rosier des Alpes (*Rosa pendulina*) ou encore le saule appendiculé (*Salix appendiculata*).

Le groseillier des Alpes est disponible dans de nombreuses pépinières. Compte tenu de l'existence de plusieurs cultivars ornementaux (« *Aureum* » et « *Nana* » notamment), une attention particulière devra être portée à la provenance des plants.

Le groseillier des Alpes est protégé dans certaines régions françaises (Bourgogne).

Rosa pendulina L.

Rosier des Alpes

Rosacées

Description

- Le rosier des Alpes est un arbrisseau caducifolié mesurant de 0,5 à 2 m de haut (fig. 1).
- Les tiges, dressées, parfois drageonnantes, sont munies d'aiguillons droits et fragiles, présents de façon éparsse seulement à leur base (fig. 2). L'écorce est de couleur variable (verte, vert-jaunâtre, orangée à pourpre).
- Les bourgeons, rouge-orangé à verdâtres, sont ovoïdes à coniques. Les axillaires, plus petits que les apicaux, sont écartés du rameau (fig. 3).
- Les feuilles, imparipennées, sont ordinairement composées de 7 à 11 folioles, ovales à elliptiques, mesurant 2 à 6 cm de long (fig. 4). Elles sont velues sur les nervures, doublement denticulées et munies de glandes rougeâtres sur les marges.
- Les fleurs, généralement solitaires, sont rose à rouge-carmin et portées par un pédicelle long de 1 à 3 cm (fig. 5), souvent muni de poils glanduleux. Les sépales, entiers et velus, sont au moins aussi longs que les pétales. Ils sont étalés à dressés après floraison et persistent à maturité (fig. 6).



Fig. 4 - Feuilles imparipennées.



Fig. 5 - Fleur rouge carmin.



Fig. 1 - Port buissonnant.



Fig. 2 - Base de la tige munie d'aiguillons droits et fragiles.



Fig. 3 - Bourgeons ovoïdes à coniques, l'axillaire étant écarté du rameau.

- Les fruits (cynorrhodons) sont brun-rouge à orange, ovoïdes et rétrécis au sommet. Ils mesurent de 1 à 2 cm de long et sont penchés à maturité (fig. 6).
- La floraison a lieu de mai à juillet.
- Le genre *Rosa* constitue un groupe complexe rassemblant de nombreuses espèces dont la détermination n'est pas toujours aisée. À l'état végétatif, le rosier des Alpes, dépourvu d'épine indurée, peut être confondu avec le rosier des champs (*R. arvensis*) qui s'en distingue par ses tiges décombantes vertes munies d'aiguillons éparses.

Distribution et vulnérabilité

Le rosier des Alpes est une espèce sud-européenne montagnarde présente des Pyrénées aux Carpates. Elle est assez commune dans les Pyrénées, le Massif central, les Vosges, le Jura et les Alpes.

Elle est relativement commune dans les Alpes du Nord, aussi bien dans les vallées internes que dans les Préalpes.

Écologie

- Le rosier des Alpes est une espèce à large amplitude se développant en conditions de demi-ombre ou de pleine lumière dans divers types de fourrés (aulnaies vertes, saulaies, etc.), boisements de montagne (hêtraies, érablaies, pessières, pinèdes, sapinières) et mégaphorbiaies.
- Il croît sur des matériaux très divers (argiles, limons, sables, graviers, blocs), acides à basiques, légèrement humides à modérément secs, plus ou moins riches en éléments nutritifs.
- Il présente un optimum écologique au sein des hêtraies (*Fagion sylvaticae*), brousses subalpines fraîches (*Betulo-Alnetea*) et mégaphorbiaies de montagne (*Mulgedio-Aconitetea* – fig. 7).
- Il se développe aux étages montagnard et subalpin (de 500 à 2 200 m).



Fig. 6 - Cynorrhodon brun-rouge, penché à maturité.

Utilisation en génie végétal

Bien que cultivé comme plante ornementale, le rosier des Alpes n'est pas encore utilisé en génie végétal.

Son port exclusivement buissonnant, ses tiges souples et son enracinement profond de type pivotant, lui procurent pourtant une bonne résistance à la traction. Il constitue donc une espèce particulièrement adaptée pour la stabilisation des berges des rivières de montagne (fig. 8).

Sa forte amplitude écologique autorise une utilisation de 500 m à 2 000 m d'altitude, sur tous types de substrats (calcaire à siliceux, argileux ou grossier), en situation lumineuse ou ombragée.



Fig. 7 - Situation au sein d'une mégaphorbiaie montagnarde.



Fig. 8 - Situation en pied de berge.

Grâce à son abondante floraison mellifère et à sa production de cynorrhodons, son intégration dans les ouvrages permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements.

Bien qu'il soit envisageable de procéder à des boutures de racines, la multiplication végétative de cette espèce reste toutefois très aléatoire. Il faudra ainsi privilégier l'utilisation de plants issus de pépinières (espèce disponible dans le commerce), en prenant soin de privilégier des souches locales. Relativement commun en montagne, il peut aussi être transplanté à partir de populations naturelles.

Il peut être intégré dans les lits de plants et plançons, les caissons en rondins végétalisés du pied jusqu'en sommet de berge, en association avec l'aulne vert (*Alnus viridis*), le bouleau pendant (*Betula pendula*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le merisier à grappes (*Prunus padus*), le sorbier de Mougeot (*Sorbus mougeotii*), le groseillier des Alpes (*Ribes alpinum*), le chèvrefeuille des haies (*Lonicera xylosteum*) ou encore le saule appendiculé (*Salix appendiculata*) avec lesquels il est régulièrement observé en milieu naturel.

Le rosier des Alpes bénéficie d'un statut de protection totale dans certains cantons suisses (Schaffhouse).

Salix appendiculata Vill.

Saule appendiculé

Salicacées

Description

- Le saule appendiculé est un arbuste caducifolié mesurant de 3 à 6 m de haut, composé d'une ou plusieurs tiges ascendantes à dressées (fig.1).
- Les rameaux de l'année, d'abord velus puis glabrescents, sont généralement courts, de couleur marron (plus ou moins foncé) à jaune verdâtre nuancé de brun (fig. 2). Les rameaux de 2 ans, ordinairement glabres, sont pourvus de nombreuses cicatrices foliaires saillantes (fig. 3).
- Les bourgeons, velus ou glabrescents, sont souvent jaunes à rouge orangé. Ils sont ovoïdes à coniques, généralement bombés sur la moitié inférieure et mesurent 3 à 6 mm de long (fig. 2).
- Les feuilles, oblongues à obovales, plus de 2 fois plus longues que larges, sont luisantes sur la face supérieure (fig. 4) et pubescentes sur la face inférieure (fig. 5). Elles sont longues de 5 à 12 cm et larges de 2 à 5 cm, la partie la plus large étant située dans la moitié supérieure. Atténuées à la base, elles présentent généralement plus de 10 paires de nervures latérales. Le pétiole, court, est muni à la base de 2 grandes stipules persistantes.
- Les fleurs sont protégées par une écaille poilue brunâtre au sommet. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines libres et sont regroupées en chatons courts et denses, généralement arqués (fig. 6). Les fleurs femelles, constituées d'une capsule velue longuement pédicellée (pédicelle plus long que l'écaille) surmontée d'un style court sont réunis en chatons oblongs, dressés, plus ou moins lâches (fig. 7).
- La floraison a lieu de fin avril à début juillet, en même temps que la feuillaison.



Fig. 1 - Port ascendant à dressé.



Fig. 2 - Bourgeons jaunes à rouge orangé sur rameau de l'année velu.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans glabre, pourvu de nombreuses cicatrices foliaires saillantes.



Fig. 4 - Feuilles luisantes sur la face supérieure.



Fig. 5 - Feuilles pubescentes au revers.

- Le saule appendiculé peut être confondu avec le saule de Lagger (*S. laggeri*) aux feuilles et rameaux de 2 ans nettement velus (pilosité allongée de plus de 1 mm), et aux bourgeons floraux aplatis à l'extrémité. Il peut également être confondu avec le saule marsault (*S. caprea*) aux feuilles moins de 2 fois plus longues que larges, présentant généralement moins de 9 paires de nervures latérales, et aux stipules courtes, rapidement caduques. Les populations de l'étage montagnard supérieur peuvent d'ailleurs s'hybrider pour produire des individus à la morphologie intermédiaire (phénomène d'introgession).

Distribution et vulnérabilité

Le saule appendiculé est une espèce sud-européenne montagnarde, présente des Pyrénées aux Alpes orientales. Il est assez commun dans les Alpes et le Jura mais est beaucoup plus rare dans les Pyrénées.

Il est commun dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule appendiculé est une espèce pionnière ubiquiste de pleine lumière ou de demi-ombre des brousses subalpines (aulnaies vertes), fourrés (lisières et recrus) et forêts montagnardes fraîches (hêtraies, érablaies, pinèdes, pessières, aulnaies blanches).
- Il croît sur des substrats de taille variable (argileux à caillouteux), frais à humides, riches en bases et en nutriments, neutres à légèrement acides.
- Il présente un optimum écologique dans les brousses subalpines fraîches (*Alnion viridis*), notamment sur matériaux grossiers (*Salicetum appendiculatae* – fig. 17 p. 158).
- Il se développe aux étages montagnard et subalpins (de 800 à 2 300 m), parfois jusqu'à 500 m par avalaison.



Fig. 6 - Chatons mâles courts et denses, généralement arqués.



Fig. 7 - Chatons femelles dressés, plus ou moins lâches.

Utilisation en génie végétal

Le saule appendiculé est une espèce adaptée pour les aménagements à l'étage montagnard ou subalpin, aussi bien pour la protection de berges de torrents que pour la stabilisation de pentes soumises au risque de glissement ou d'érosion.

Dotée d'un système racinaire ramifié, d'un fort pouvoir de régénération et d'une croissance juvénile rapide (notamment en largeur), cette espèce vigoureuse protège rapidement les couches superficielles du sol. Son port souple et dense ne dépassant pas 6 m de hauteur et sa résistance à l'ensevelissement (flexibilité des troncs et production de racines adventives) lui permettent de se développer sur des terrains instables soumis à des perturbations régulières (Beismann *et al.* 2000 – fig. 8). Sa forte amplitude écologique permet de l'implanter sur tous types de substrats et dans diverses conditions d'ensoleillement, du pied jusqu'en sommet de berge, jusqu'à 2 300 m d'altitude.

Les branches du saule appendiculé peuvent produire des plançons, des boutures et des pieux. Son taux de reprise au bouturage est toutefois assez aléatoire en milieu naturel et dépend notamment du type de rameaux utilisés, de la période de plantation et de la disponibilité en eau durant les premiers mois (taux de bouturage variant de 30 à 70 % selon les conditions – Schiechl 1992 et Zouaoui 2011). Il est ainsi préconisé d'utiliser prioritairement des plants en racines nues lorsque la technique le permet. Cette espèce étant parfois abondante aux abords des cours d'eau forestiers de montagne, il est cependant envisageable de l'intégrer sous forme de boutures ou de plançons, à condition de l'implanter avec de fortes densités et en combinaison avec des espèces à fort taux de reprise comme le saule pourpre (*S. purpurea*), le saule drapé (*S. elaeagnos*) ou le saule à trois étamines (*S. triandra*).

Son association avec l'aulne vert (*Alnus viridis*), l'érable sycamore (*Acer pseudoplatanus*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) ou encore le cytise des Alpes (*Laburnum alpinum*) est particulièrement pertinente, notamment dans les lits de plants et plançons et les caissons en rondins végétalisés. Pour les aménagements réalisés à une altitude inférieure à 1 000 m, on privilégiera l'utilisation du saule marsault, sauf en situation encaissée. Le saule appendiculé est disponible dans certaines pépinières spécialisées.



Fig. 8 - Souplesse des tiges et rejets de souche permettant un développement sur terrain instable régulièrement perturbé.

Salix aurita L.

Saule à oreillettes

Salicacées

Description

- Le saule à oreillettes est un arbrisseau caducifolié, densément ramifié, à port étalé atteignant 3 m de haut et formant des peuplements souvent denses et monospécifiques (fig. 1).
- Les jeunes rameaux, généralement anguleux, sont écartés de la tige en tous sens. Ceux de l'année sont grêles, brun rougeâtre à beige orangé et plus ou moins pubescents (fig. 2). Ceux de 2 ans, généralement glabres ou parfois munis de poils épars (fig. 3) sont striés sous l'écorce.
- Les bourgeons, rougeâtres, sont globuleux à ovoïdes et glabres à glabrescents. Ils mesurent moins de 4 mm (fig. 2).
- Les feuilles, obovales, sont longues de 1 à 4 cm. Elles sont gaufrées, ondulées à la marge, obtuses et pourvues d'une petite pointe recourbée au sommet en forme de gouttière (fig. 4). Elles sont mates, rugueuses et pubescentes dessus, tomenteuses blanchâtres et réticulées dessous. Elles sont courtement pétiolées et munies à la base de stipules dentées (oreillettes) longuement persistantes.
- Les fleurs sont protégées par une écaille poilue, brunâtre au sommet. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines velues et sont regroupées en petits chatons (moins de 3 cm) denses et dressés (fig. 5). Les fleurs femelles sont constituées d'un style court terminé par 2 stigmates bilobés et sont rassemblées en chatons oblongs, plus ou moins denses et courbés (fig. 6).
- La floraison a lieu d'avril à mai, avant la feuillaison.



Fig. 4 - Feuilles obovales, gaufrées, ondulées à la marge et munies de stipules dentées.



Fig. 1 - Port étalé.



Fig. 2 - Bourgeons rougeâtres et rameau de l'année pubescent.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans généralement glabre.

- Le saule à oreillettes s'hybride régulièrement (phénomène d'introgression) avec le saule cendré (*S. cinerea*) pour former des populations parfois plus importantes que les types (*Salix x multinervis*).
- Le saule roux (*S. atrocinerea*) et le saule cendré (*S. cinerea*) se distinguent du saule à oreillettes par leurs feuilles non ondulées à la marge dépassant généralement 4 cm.

Distribution et vulnérabilité

Le saule à oreillettes est une espèce eurasiatique présente presque partout en France et en Suisse, à l'exception de la région méditerranéenne et des hautes montagnes.

Elle est assez commune dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule à oreillettes est une espèce pionnière de pleine lumière ou de demi-ombre des fourrés et boisements humides plus ou moins ouverts (saulaies marécageuses, aulnaies et bétulaies tourbeuses, haut marais).
- Il croît sur des substrats organiques ou fins (tourbes, argiles, limons hydromorphes), à engorgement prolongé et pauvres en bases.
- Il présente un optimum écologique dans les saulaies buissonnantes marécageuses (*Salicion cinereae*), notamment à l'étage montagnard aux abords des tourbières (*Frangulo-Salicetum auritae* – fig. 7).
- Il se développe aux étages collinéen et montagnard où il présente son optimum de développement.



Fig. 5 - Chatons mâles courts et dressés.



Fig. 6 - Chaton femelle dense et courbé.

Utilisation en génie végétal

Le saule à oreillettes est une espèce encore assez peu utilisée en génie végétal. Son port buissonnant et son système racinaire très étendu offrent pourtant de nombreuses potentialités dans ce domaine, notamment pour le drainage des terrains argilo-limoneux déstabilisés par des suintements ou à charge en eau importante.

Sa faible amplitude écologique ne permet toutefois pas de l'utiliser en toute situation. Il sera ainsi préférentiellement planté sur des matériaux fins, riches en matière organique et bien alimentés en eau (éviter les substrats grossiers drainants). Il peut s'avérer opportun de l'implanter au niveau des zones d'infiltration d'eau ou de suintement risquant de déstabiliser la berge, en association notamment avec le saule laurier (*Salix pentandra*) ou le saule rampant (*S. repens*). Sa faible compétitivité empêche toutefois de l'associer à des espèces à fort développement et nécessite de l'implanter en forte densité (Adriaens 1993).



Fig. 7 - Situation typique en marge d'une tourbière à l'étage montagnard (*Frangulo-Salicetum auritae*).

Cette espèce présente un taux de reprise au bouturage inconstant, variant de 40 à 70 % selon les conditions, avec de meilleurs résultats obtenus sur des rameaux âgés constamment immergés (Schiechl 1973, 1992). De plus, compte tenu du faible diamètre de ses rameaux, il est souvent difficile de se procurer des boutures d'un diamètre suffisamment large pour être enfoncées mécaniquement, ou des branches suffisamment longues pour être insérées dans des fascines ou des couches de branches à rejets. Il pourra toutefois être implanté sous forme de plançons, dans les lits de plants et plançons ou des caissons en rondins végétalisés. Compte tenu de son taux de reprise plutôt faible, son utilisation en plants en racines nues est à privilégier.

Le saule à oreillette est disponible dans certaines pépinières.

Cette espèce bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale ou partielle).

Salix caesia Vill.

Saule bleuâtre

Salicacées

Description

- Le saule bleuâtre est un arbrisseau caducifolié, densément ramifié, à port étalé ou ascendant, atteignant 1,80 m de haut et formant souvent des peuplements denses, plus ou moins monospécifiques (fig. 1).
- Les rameaux, étalés ou ascendants, sont glabres. Ceux de l'année, luisants, sont rougeâtres à noirâtres (fig. 2 et 3).
- Les bourgeons, glabres, sont globuleux ou ovoïdes, aplatis ou légèrement échancrés au sommet (fig. 2 et 3). Ils mesurent de 2 à 4 mm et sont moins de 2 fois plus longs que larges. Les bourgeons inférieurs sont souvent opposés à subopposés.
- Les feuilles, elliptiques à lancéolées et courtement pétiolées, mesurent de 1 à 3 cm et sont 2 à 3 fois plus longues que larges. Elles sont mates, entièrement glabres, vert pâle dessus et glauques dessous (fig. 4). Les marges, souvent enroulées, sont entières.
- Les fleurs, protégées par une écaille glabrescente jaunâtre devenant brun rougeâtre à l'extrémité, sont rassemblées en petits chatons ovoïdes denses. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines généralement soudées à la base et surmontées d'anthères rougeâtres à violacées (fig. 5). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule pubescente violacée longue de 4 à 5 mm et courtement pédicellée (fig. 6).
- La floraison a lieu de juin à juillet, en même temps que la feuillaison.



Fig. 4 - Feuilles entières, elliptiques à lancéolées, glauques au revers.



Fig. 1 - Port ascendant à étalé.



Fig. 2 - Bourgeons ovoïdes sur rameau de l'année rougeâtre.



Fig. 3 - Bourgeons globuleux sur rameau de l'année noirâtre.

- Le saule bleuâtre peut éventuellement être confondu avec le saule pourpre (*S. purpurea*) qui s'en distingue par ses bourgeons allongés (au moins deux fois plus longs que larges) et ses feuilles dentées à l'extrémité (parfois faiblement). Lors du repos hivernal, le saule bleuâtre peut également être confondu avec le saule fétide (*S. foetida*) aux bourgeons ordinairement velus, deux à trois fois plus longs que larges.

Distribution et vulnérabilité

Le saule bleuâtre est une espèce eurasiatique présente uniquement dans les Alpes et en Asie centrale et boréale.

Bien que pouvant être localement abondant sur certains secteurs intra-alpins, il est globalement assez rare dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule bleuâtre est une espèce pionnière des brousses subalpines fraîches, se rencontrant aux abords des sources et torrents, ainsi que dans les prairies humides et les marais.
- Il croît sur des matériaux alluviaux fins (sables, limons, argiles), parfois tuffeux, sur des sols pauvres en nutriments, frais à humides, basiques à acides.
- Il présente un optimum écologique dans les saulaies buissonnantes subalpines riveraines intra-alpines (*Salicetum caesio-foetidae* – fig. 7).
- Il se développe aux étages subalpin et alpin (de 1 500 à 2 500 m) avec un optimum à l'étage subalpin supérieur.



Fig. 5 - Chaton mâle dense à anthères rougeâtres.



Fig. 6 - Chatons femelles denses, pourpres.

Utilisation en génie végétal

Le saule bleuâtre est une espèce particulièrement adaptée pour le génie végétal. En effet, à l'instar du saule fétide, cette espèce forme naturellement des colonies denses aux abords des torrents subalpins sur matériaux fins (fig. 7).

De par sa ramure très souple, étalée à ascendante, il est particulièrement adapté pour stabiliser les berges des torrents ou les terrains inclinés soumis à des perturbations régulières. Implanté en pied de berge, les buissons denses qu'il forme permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces.

Il peut être utilisé sur des substrats fins ou grossiers, calcaires ou siliceux, de préférence sur des secteurs bien alimentés en eau (proximité de la nappe ou de suintements). Il devra être implanté dans des secteurs ensoleillés (éviter les vallées encaissées et les ripisylves trop denses) entre 1 700 et 2 300 m d'altitude.

Avec un taux de reprise au bouturage relativement faible (environ 50 %) et des rameaux courts, fins et très ramifiés, l'utilisation de boutures ou de branches dans les aménagements peut s'avérer difficile. Il est en effet peu envisageable de trouver des boutures suffisamment larges et rectilignes pour être battues mécaniquement ou des branches suffisamment longues pour être intégrées dans des fascines de saule

ou des couches de branches à rejets. Il peut toutefois être intéressant de l'intégrer sous forme de ramilles vivantes plaquées sous une fascine ou dans des lits de plants et plançons. Cette technique peut s'avérer efficace si les densités sont suffisamment importantes (30 à 40 pièces par mètre) et si les espèces associées sont faiblement concurrentielles. Le saule bleuâtre est disponible dans certaines pépinières spécialisées et pourra être aussi utilisé sous forme de plants en motte ou en racines nues dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés, du pied jusqu'en milieu de berge. Il peut être opportun de l'associer à d'autres saules subalpins exclusivement buissonnants comme les saules fétide (*Salix foetida*) ou hasté (*S. hastata*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

Compte tenu de la relative vulnérabilité de cette espèce dans certains secteurs de l'Arc alpin, une attention particulière devra être portée à sa conservation lors de son utilisation en génie végétal : ne pas prélever de boutures dans le canton de Vaud



Fig. 7 - Situation typique aux abords d'un torrent intra-alpin (*Salicetum caesio-foetidae*).

où l'espèce est protégée, réaliser des prélèvements sporadiques sur des stations suffisamment importantes (plusieurs dizaines de pieds) et privilégier son implantation à proximité de noyaux de populations existants. En respectant ces principes, son intégration dans les ouvrages de génie végétal peut s'avérer pertinente pour la conservation de l'espèce.

Cette espèce bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale ou partielle).

Salix caprea L.

Saule marsault

Salicacées

Description

- Le saule marsault est un arbuste ou un petit arbre caducifolié de 3 à 12 m de haut formant des cépées ou des troncs courts (fig. 1).
- L'écorce, d'abord lisse et gris verdâtre, devient gris noirâtre et se fissure avec l'âge (crevasses en forme de losanges – fig. 2). Les rameaux de l'année, de couleur variable, sont glabres ou pubescents (fig. 3), ceux de 2 ans étant glabres et lisses sous l'écorce.
- Les bourgeons, de couleur variable (souvent bruns, jaunes à rouge orangé) et légèrement pubescents mesurent de 4 à 8 mm. Les bourgeons foliaires, ovoïdes à sub-globuleux, sont petits et appliqués sur le rameau. Les bourgeons floraux, plus gros, sont renflés dans la moitié inférieure et terminés par une pointe légèrement déjetée vers l'extérieur (fig. 3).
- Les feuilles, elliptiques et légèrement ondulées sur les bords, mesurent de 3 à 11 cm. Elles sont glabres dessus (fig. 4), glauques, velues et à nervures saillantes dessous (fig. 5). Elles sont généralement pourvues de moins de 9 paires de nervures latérales.
- Les fleurs sont protégées par une écaille noirâtre longuement velue. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines glabres ou munies de quelques poils à la base du filet et sont regroupées en chatons courts et denses (fig. 6). Les fleurs femelles, constituées d'un style court terminé par deux stigmates bilobés, sont rassemblées en chatons oblongs, dressés, plus ou moins lâches (fig. 7).
- La floraison a lieu de mars à mai, avant la feuillaison.



Fig. 1 - Port dressé.



Fig. 2 - Écorce grise présentant des crevasses en forme de losanges.



Fig. 3 - Bourgeons foliaires et floraux sur rameau de l'année.



Fig. 4 - Feuille elliptique, glabre dessus.



Fig. 5 - Feuille velue et glauque au revers.

- Le saule marsault peut être confondu avec le saule appendiculé (*S. appendiculata*), avec lequel il peut d'ailleurs s'hybrider, dont les feuilles sont plus de 2 fois plus longues que larges et présentent généralement plus de 10 paires de nervures latérales. La distinction hivernale entre ces deux espèces est parfois impossible lorsqu'elles présentent des bourgeons jaunes de taille sensiblement identique. Il peut également être confondu avec le saule cendré dont les rameaux de 2 ans sont nettement velus et striés sous l'écorce.

Distribution et vulnérabilité

Le saule marsault est une espèce eurasiatique présente sur la quasi-totalité du territoire franco-suisse.

Il est très commun dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule marsault est une espèce ubiquiste pionnière de pleine lumière des lisières, clairières, coupes, accrus forestiers, fourrés mésophiles et forêts claires de feuillus (chênaies, hêtraies, frênaies, érablaies, etc.).
- Il croît sur des substrats très divers (argiles, limons, sables plus ou moins caillouteux), souvent sur des sols bruns riches en nutriments, ni trop secs, ni trop humides, basiques à acides.
- Il présente un optimum écologique dans les groupements arbustifs mésophiles préforestiers (*Sambuco-Salicion*), notamment sur matériaux pauvres en bases à l'étage montagnard (*Salicetum capreae* – fig. 8).
- Il se développe aux étages collinéen et montagnard ; parfois à l'étage subalpin inférieur en situation d'adret (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 6 - Chatons mâles courts et denses.



Fig. 7 - Chaton femelle dressé.

Utilisation en génie végétal

Le saule marsault est une espèce largement utilisée en aménagement (création de haies, bosquets, etc.) et notamment en génie végétal (stabilisation de berges et talus).

Dotée d'un système racinaire ramifié, d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche – fig. 9) et d'une croissance juvénile rapide, notamment en largeur, cette espèce vigoureuse protège rapidement les couches supérieures du sol. Elle est capable de supporter de nombreux chocs et de produire de nombreuses racines adventives, ce qui lui permet de se développer sur des terrains instables soumis à des glissements de terrain réguliers et de résister à l'ensevelissement. Dotée d'une forte capacité d'évapotranspiration (Zouaoui 2011), elle est également adaptée pour drainer les berges et talus soumis à des infiltrations d'eau.

Avec un port souple et dense et une grande amplitude écologique, son potentiel d'utilisation dans des aménagements en cours d'eau de montagne est important. Il pourra ainsi être implanté sur tous types de sols et dans diverses conditions d'ensoleillement, notamment sur des substrats bruts drainants et dans des vallées boisées encaissées, jusqu'à 1 500 m d'altitude. De par son port pouvant devenir arboré et sa faible tolérance à l'immersion, il est cependant déconseillé de l'utiliser en pied de berge. Il est toutefois possible de le traiter en cépée afin d'éviter la formation d'un tronc pouvant induire un effet bras de levier lors de crues.

Compte tenu de son très faible taux de reprise au bouturage (inférieur à 40 % en condition *in situ*), il faudra privilégier l'utilisation de plants forestiers dans les aménagements. Les branches du saule marsault peuvent cependant produire des pieux de bonne qualité.

Son association avec le bouleau pendule (*Betula pendula*), le noisetier (*Corylus avellana*), le frêne commun (*Fraxinus excelsior*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) ou encore le sureau à grappes (*Sambucus racemosa*) est particulièrement pertinente, notamment dans les lits de plants et les caissons en rondins végétalisés. Il est à noter que les populations de l'étage montagnard supérieur peuvent s'hybrider avec le saule appendiculé pour produire des individus à la morphologie intermédiaire (phénomène d'introgession). Pour les aménagements à l'étage subalpin, on privilégiera l'utilisation du saule appendiculé. Le saule marsault est disponible dans de nombreuses pépinières dont certaines garantissent une provenance locale des plants.



Fig. 8 - Situation typique au sein d'un groupement arbustif préforestier (*Salicetum capreae*).



Fig. 9 - Rejets de souche.

Salix daphnoides Vill.

Saule faux daphné

Salicacées

Description

- Le saule faux daphné est un arbuste ou un petit arbre caducifolié mesurant de 4 à 15 m de haut (fig. 1), formant généralement des troncs robustes.
- Les rameaux de l'année, vert jaunâtre à rouge foncé (fig. 2 et 3), sont généralement glabres et brillants mais peuvent être plus ou moins velus. Les rameaux de 2-3 ans, glabres, sont parfois recouverts d'une pruine bleuâtre. L'écorce, devenant gris noirâtre avec l'âge, est jaune au revers.
- Les bourgeons sont généralement glabres mais peuvent être plus ou moins velus. Les bourgeons foliaires, plus ou moins comprimés, sont appliqués sur le rameau et mesurent de 3 à 8 mm (fig. 2). Les bourgeons floraux, plus gros, ovoïdes et renflés à la base, sont aplatis à l'apex en « bec de canard » et dépassent régulièrement 1 cm de long (fig. 3).
- Les feuilles, lancéolées et acuminées, sont longues de 4 à 10 cm et larges de 2 à 4 cm. Elles sont munies sur les marges de petites dents glanduleuses. Elles sont vertes et luisantes au-dessus (fig. 4) et glauques à blanchâtres au revers (fig. 5). Les stipules, rapidement caduques, sont aiguës et dentées.
- Les fleurs sont protégées par une écaille brunâtre, jaune ou verte, très velue. Les fleurs mâles, composées de 2 étamines libres et glabres, sont rassemblées en courts chatons sessiles, denses et dressés (fig. 6). Les femelles, pourvues de capsules glabres, longues de 3 à 5 mm et surmontées d'un long style terminé par 2 stigmates entiers ou bilobés, sont rassemblées en chatons cylindriques denses, sessiles et dressés (fig. 7).
- La floraison a lieu de fin février à mai, avant la feuillaison.



Fig. 1 - Port dressé.



Fig. 2 - Bourgeon floral comprimé, appliqué sur le rameau.



Fig. 3 - Bourgeon floral en « bec de canard ».



Fig. 4 - Feuille lancéolée et acuminée, verte et luisante dessus.



Fig. 5 - Feuille glauque à blanchâtre au revers.

- Le saule faux daphné peut être confondu avec le saule à trois étamines (*S. triandra*), dont les rameaux de l'année sont cannelés à l'extrémité et les fleurs mâles composées de 3 étamines. Il peut également être confondu avec le saule laurier (*S. pentandra*), aux feuilles visqueuses odorantes à l'état jeune et aux bourgeons foliaires à apex non appliqué sur les rameaux.

Distribution et vulnérabilité

Le saule faux daphné est une espèce européenne présente des Pyrénées aux Carpates. Elle est rare dans les Pyrénées, le Jura et la vallée du Rhin, mais est plus fréquente dans les Alpes.

Elle est relativement commune dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule faux daphné est une espèce pionnière de pleine lumière colonisant les terrasses alluviales des rivières de montagne.
- Il croît sur des substrats grossiers (sables, graviers et galets), riches en bases (généralement calcaires ou schisteux) et pauvres en nutriments, basiques à légèrement acides.
- Il présente un optimum écologique dans les saulaies et aulnaies alluviales sur matériaux grossiers (*Salicion elaeagni* et *Alnion incanae* – fig. 8 et 9).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin (jusqu'à 2 300 m) avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Chaton mâle sessile et dressé.



Fig. 7 - Chaton femelle sessile et dressé.

Utilisation en génie végétal

Le saule faux daphné est une espèce précieuse pour la stabilisation des berges des rivières de montagne.

Dotée d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et d'une croissance juvénile rapide, cette espèce vigoureuse protège rapidement les couches supérieures du sol. De par ses rameaux souples et robustes, elle offre une très bonne résistance à la traction et est capable de supporter de nombreux chocs. Dotée également d'une forte capacité d'évapotranspiration (Zouaoui 2011), cette espèce est adaptée pour drainer les berges et talus instables soumis à des infiltrations d'eau.



Fig. 8 - Saulaie alluviale arborée à *Salix daphnoides*.

Tolérant relativement bien le froid et la sécheresse, elle peut être utilisée sur des substrats bruts très drainants (fig. 8 et 9), du pied jusqu'au sommet de la berge, jusqu'à 2 200 m d'altitude. Compte tenu de sa tendance à créer des troncs uniques pouvant atteindre 15 m de hauteur et de son système racinaire superficiel, il est toutefois déconseillé de l'implanter massivement en pied de berge.

Étant donné la taille de ses rameaux et de son excellent taux de reprise au bouturage (généralement supérieur à 90 % – Zouaoui 2011), cette espèce est particulièrement adaptée pour produire des boutures, des plançons, des ramilles ou des pieux (vivants ou morts). Elle peut ainsi facilement être intégrée dans

un grand nombre d'ouvrages de génie végétal (lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, tressages et fascines de saules, couches de branches à rejets, bouturage), notamment en association avec d'autres saules arbustifs à enracinement plus profond comme le saule drapé (*Salix elaeagnos*), le saule pourpre (*S. purpurea*) ou encore le saule noirissant (*S. myrsinifolia*), assurant ainsi une complémentarité à la couverture végétale et à l'enracinement.

Le saule faux daphné est disponible dans certaines pépinières. Étant localement abondant aux abords des rivières de montagne, il est toutefois préférable de se procurer le matériel végétal à proximité des chantiers (boutures), garantissant ainsi l'utilisation de souches locales particulièrement adaptées aux conditions stationnelles.

Le saule faux daphné bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale ou partielle).



Fig. 9 - Stade pionnier à *Salix daphnoides* et *Myricaria germanica* (*Salici-Myricarietum*).

Salix elaeagnos Scop.

Saule drapé

Salicacées

Description

- Le saule drapé est un arbuste haut de 1 à 5 m, produisant de nombreuses tiges dressées (fig. 1). Il peut parfois évoluer en un arbre atteignant 10 m au sein des aulnaies blanches.
- Les jeunes rameaux, jaunâtres à rougeâtres, sont plus ou moins tomenteux et cannelés à l'extrémité. Les rameaux de 2 ans sont glabres (fig. 2).
- Les bourgeons, longs de 4 à 9 mm, sont étroits et appliqués sur le rameau (fig. 3). Ils sont souvent concentrés à l'extrémité des rameaux avec plus de 5 bourgeons sur les 3 derniers centimètres.
- Les feuilles, alternes, sont oblongues, parfois presque linéaires, à bords enroulés. De longueur variable (2 à 12 cm), elles sont vert mat dessus (fig. 4), blanches et tomenteuses au revers (pilosité feutrée aranéuse – fig. 5).
- Les fleurs, protégées par une longue écaille verdâtre devenant brunâtre à l'extrémité, sont rassemblées en chatons effilés, grêles et généralement arqués. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines soudées et glabres (fig. 6). Les fleurs femelles sont pourvues d'un style court terminé par 2 stigmates entiers ou bilobés (fig. 7).
- La floraison a lieu de mars à mai, juste avant la feuillaison.
- Deux sous-espèces sont actuellement décrites :
 - subsp. **angustifolia** aux feuilles étroitement linéaires ne dépassant pas 1 cm de largeur ;
 - subsp. **elaeagnos** aux feuilles linéaires à lancéolées pouvant atteindre 2 cm de largeur.



Fig. 4 - Feuille linéaire à oblongue, mat dessus.



Fig. 5 - Feuille tomenteuse au revers, à bords enroulés.



Fig. 1 - Port dressé.



Fig. 2 - Rameau de 2 ans glabre.



Fig. 3 - Bourgeons appliqués sur rameau de l'année tomenteux.

- À l'état végétatif, le saule drapé peut être confondu avec le saule des vanniers (*S. viminalis*), présentant une pilosité soyeuse et argentée aux revers des feuilles, ainsi qu'avec le saule blanc (*S. alba*) présentant des feuilles et des rameaux à pilosité appliquée.

Distribution et vulnérabilité

Le saule drapé est une espèce montagnarde sud-européenne présente de façon disséminée dans les secteurs montagneux de France et de Suisse (Pyrénées, Cévennes, Alpes, Jura, Vosges).

La sous-espèce *elaeagnos*, seule indigène, est relativement fréquente dans les Alpes du Nord.

La sous-espèce *angustifolia*, de distribution méditerranéo-montagnarde, est présente dans le Sud des Alpes. Elle est parfois intégrée dans des plantations d'où elle peut essaimer.

Écologie

- Le saule drapé est une espèce pionnière de pleine lumière des bords de cours d'eau et terrasses alluviales où il forme parfois des communautés monospécifiques. Il se développe également au sein de fourrés ou de pinèdes sèches, ainsi que dans des carrières, gravières ou talus au sol temporairement inondé.
- Il croît sur des substrats alluviaux grossiers (sables, graviers, cailloux, blocs), plus ou moins pauvres en éléments nutritifs, basiques à légèrement acides, à humidité changeante (espèce supportant d'importantes fluctuations de la nappe phréatique).
- Il présente un optimum écologique au sein des saulaies alluviales sur matériaux grossiers (*Salicion elaeagni* – fig. 8).
- Il se développe aux étages collinéen et montagnard (jusqu'à 1 700 m).



Fig. 6 - Chaton mâle effilé, grêle et arqué.



Fig. 7 - Chaton femelle effilé, grêle et arqué.

Utilisation en génie végétal

Le saule drapé est une espèce particulièrement adaptée pour la stabilisation des berges des rivières de montagne, notamment sur substrat très grossier.

Dotée d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche), d'une croissance juvénile rapide et d'un système racinaire extrêmement développé (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,8), cette espèce vigoureuse couvre et protège rapidement le sol, notamment les terrains très inclinés. De par ses rameaux souples et robustes, elle offre une très bonne résistance à la traction et est capable de supporter de nombreux chocs (cicatrisation rapide des blessures et production de cépées – Karrenberg *et al.* 2003). Résistant à l'ensevelissement, elle tolère un recouvrement important de la base de son tronc par des matériaux gravelo-terreux (lors d'une crue ou d'un glissement de terrain par exemple). Suite à un recouvrement

prolongé, des racines adventives se développent rapidement et fixent les couches superficielles du sol, certains individus pouvant supporter un recouvrement de la base du tronc sur près de 35 % de leur hauteur (Schiechl 1973).

Tolérant aussi bien les sécheresses intenses que les inondations prolongées (son système racinaire s'adapte en fonction de l'hygrométrie et de la granulométrie du sol et de la hauteur de la nappe – Francis *et al.* 2005), il peut être utilisé sur des substrats bruts très drainants (graviers, galets, etc.), du pied de berge jusqu'au sommet de talus, jusqu'à 1 500 m. Compte tenu de sa tendance à créer des troncs uniques pouvant atteindre 10 m de hauteur, son implantation en pied de berge devra être effectuée avec parcimonie en évitant les secteurs à fortes contraintes hydrauliques ou en favorisant le recépage des plants.

Étant donné la taille de ses rameaux et son taux élevé de reprise au bouturage (entre 70 et 90 % avec de meilleurs résultats



Fig. 8 - Stade pionnier de la saulaie alluviale sur matériaux grossiers (*Salicion elaeagni*).

enregistrés en période hivernale sur des rameaux âgés), cette espèce peut être utilisée sous forme de boutures, de plançons, de branches ou de pieux. Le taux de reprise sera toutefois plus élevé si les boutures sont implantées sur substrat fin bien alimenté en eau (Francis *et al.* 2005). Elle peut ainsi être intégrée dans un grand nombre de techniques de génie végétal (lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, tressages et fascines de saules, couches de branches à rejets, bouturage), en association avec les saules faux daphné (*Salix daphnoides*), pourpre (*S. purpurea*) et noirissant (*S. myrsinifolia*), ou encore le bouleau pendant (*Betula pendula*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), l'aulne blanc (*Alnus incana*) ou l'argousier (*Hippophae rhamnoides*), assurant ainsi une complémentarité à la couverture végétale et à l'enracinement. Elle est également particulièrement adaptée pour des techniques mixtes, par exemple en combinaison avec un enrochement de pied de berge.

Le saule drapé est disponible dans le commerce. Souvent abondant aux abords des rivières de montagne, il est toutefois préférable de se procurer le matériel végétal à proximité des chantiers (boutures), garantissant ainsi l'utilisation de souches locales et évitant la dispersion de la sous-espèce *angustifolia* en dehors de son aire biogéographique naturelle.

Le saule drapé bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle).

Salix foetida

Schleich. ex DC.

Saule fétide

Salicacées

Description

- Le saule fétide est un arbrisseau caducifolié, densément ramifié, à port étalé ou ascendant atteignant 2 m de haut et formant des peuplements souvent denses et monospécifiques (fig. 1).
- Les rameaux de l'année sont glabres à nettement velus, mais le plus souvent à pilosité peu visible (poils courts épars). Ceux de 2 ans sont glabres, luisants (fig. 2) et striés sous l'écorce. L'écorce, d'abord brun noirâtre, rougeâtre, verdâtre ou orangée, devient gris foncé et s'exfolie avec l'âge.
- Les bourgeons, légèrement velus et de même couleur que les rameaux, sont ovoïdes, ellipsoïdes ou cylindriques à apex obtus (fig. 3). Ils mesurent de 2,5 à 4,5 mm et sont deux à trois fois aussi longs que larges.
- Les feuilles, longues de 1 à 4 cm, sont 2 à 3 fois plus longues que larges. Elles sont rigides, lancéolées, à bord régulièrement denticulé-glanduleux, vert foncé, glabres et luisantes dessus (fig. 4), glauques et plus ou moins soyeuses dessous (fig. 5).
- Les fleurs, protégées par une écaille barbue brune ou ferrugineuse, sont rassemblées en chatons courts et dressés ne dépassant pas 2 cm de long. Les fleurs mâles sont composées de deux étamines à filets glabres et anthères rougeâtres (fig. 6). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule velue atteignant 5 mm de long (fig. 7).
- La floraison a lieu de juin à juillet, en même temps que la feuillaison.



Fig. 4 - Feuille régulièrement denticulé-glanduleuse, luisante sur le dessus.



Fig. 5 - Feuille glauque plus ou moins soyeuse au revers.



Fig. 1 - Port étalé à ascendant.



Fig. 2 - Rameau de 2 ans glabre et luisant.



Fig. 3 - Bourgeons ovoïdes à apex obtus sur rameau de l'année velu.

- Le saule fétide peut être confondu avec des formes basses du saule alpestre (*S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*) présentant une pilosité plus allongée sur les feuilles (entre 0,5 et 1 mm) et des bourgeons mesurant pour la plupart plus de 4 mm.

Distribution et vulnérabilité

Le saule fétide est une espèce européenne montagnarde présente uniquement dans les Alpes, les Apennins et les Pyrénées.

Elle est relativement fréquente dans les Alpes du Nord, notamment dans les secteurs supraforestiers des Alpes internes (Vanoise, Écrins, Valais) où elle peut être localement abondante.

Écologie

- Le saule fétide est une espèce pionnière des brousses subalpines fraîches, se rencontrant aux abords des sources et torrents, dans les couloirs d'avalanche, les prairies humides et marécageuses ou sur les moraines et éboulis.
- Il croît sur des substrats à granulométrie variable, pauvres en bases et en nutriments, frais à humides, neutres à acides (espèce calcifuge se développant sur matériaux généralement siliceux).
- Il présente un optimum écologique au sein des saulaies buissonnantes riveraines subalpines (*Salicion waldsteinianae* – fig. 8).
- Il se développe aux étages subalpin et alpin inférieur (de 1 400 à 2 500 m) avec un optimum à l'étage subalpin supérieur.



Fig. 6 - Chaton mâle court et dressé.



Fig. 7 - Chaton femelle court et dressé.

Utilisation en génie végétal

Le saule fétide est une espèce particulièrement adaptée pour le génie végétal en rivière de montagne. En effet, cette espèce forme naturellement des colonies denses aux abords des torrents subalpins des vallées intra-alpines, que ce soit en association avec le saule bleuâtre (*Salix caesia*) sur matériaux fins ou avec le saule hasté (*S. hastata*) sur matériaux grossiers (fig. 8).

De par sa ramure souple ne dépassant pas 1,5 m de hauteur en situation de pleine lumière, il est particulièrement adapté pour stabiliser les berges des torrents ou les terrains très inclinés soumis à des perturbations régulières. Implanté en pied de berge, les buissons denses qu'il forme permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces.

Elle peut être utilisée sur des substrats grossiers drainants (fig. 8) pour peu que ceux-ci soient suffisamment pauvres en calcaire et bien alimentés en eau (proximité de la nappe ou de suintements). Elle devra être implantée de préférence dans des secteurs ouverts ou bien exposés entre 1 700 et 2 300 m (éviter les vallées trop encaissées et les formations trop fermées).



Fig. 8 - Saulaie buissonnante à *Salix foetida* et *S. hastata* sur matériaux grossiers.

Vu son taux de reprise au bouturage peu élevé (environ 50 %) et ses rameaux courts, fins et très ramifiés, l'utilisation de boutures ou de branches dans les aménagements s'avère difficile. Il est en effet peu envisageable de trouver en grand nombre des boutures suffisamment larges et rectilignes pour être battues mécaniquement ou des branches suffisamment longues pour être intégrées dans des fascines de saule ou des couches de branches à rejets. Il peut toutefois être intéressant de l'intégrer sous forme de ramilles vivantes plaquées sous une fascine ou dans des lits de plants et plançons. Le matériel végétal à disposition pouvant être localement abondant, cette technique peut s'avérer efficace si les densités de plantations sont suffisamment importantes (30 à 40 pièces par mètre) et si les

espèces associées sont faiblement concurrentielles. Il peut ainsi être pertinent de l'associer aux saules hasté (*S. hastata*) et bleuâtre (*S. caesia*) ou à l'aulne vert (*Alnus viridis*) en pied de berge, voire aux saules glauque (*S. glaucosericea*) ou de Suisse (*S. helvetica*) sur les secteurs frais du haut de berge.

Le saule fétide est disponible dans certaines pépinières spécialisées et pourra ainsi être utilisé sous forme de plants dans les lits de plants ou les caissons en rondins végétalisés, du pied jusqu'en milieu de berge.

Le saule fétide bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle).

Salix glaucosericea Flod.

Saule glauque

Salicacées

Description

- Le saule glauque est un arbrisseau caducifolié, tortueux, formant des petits buissons pouvant atteindre 2 m de haut (fig. 1).
- Les jeunes rameaux, gris-brun à rouge vif, sont luisants et couverts de longs poils blanchâtres étalés et enchevêtrés mesurant plus de 1 mm (fig. 2). Ils deviennent ensuite glabres et gris argenté avec l'âge (fig. 3).
- Les bourgeons, ovales à elliptiques, brun-rouge à orangés, sont couverts de longs poils étalés (fig. 2).
- Les feuilles, oblongues à lancéolées, sont velues et glauques sur les 2 faces (fig. 4). Elles mesurent de 3 à 7 cm et sont 2,5 à 4 fois plus longues que larges.
- Les fleurs, protégées par une écaille velue jaunâtre devenant brun rougeâtre à l'extrémité (jamais noirâtre), sont rassemblées en chatons dressés, oblongs à elliptiques portés par un long pédoncule feuillé. Les fleurs mâles sont pourvues de 2 étamines libres à filets velus à la base (fig. 5). Les fleurs femelles sont composées d'une capsule velue blanchâtre (poils longs et frisés) presque sessile, longue de 6 à 7 mm et surmontée d'un long style (fig. 6).
- La floraison a lieu de juin à juillet, en même temps que la feuillaison.
- Le saule glauque peut facilement être confondu avec le saule de Suisse (*S. helvetica*), présentant des feuilles glabrescentes sur la face supérieure, blanches tomenteuses au revers, des écailles noirâtres au sommet, des filets des étamines glabres et des capsules munies de poils courts.



Fig. 1 - Port.



Fig. 2 - Bourgeons et rameau de l'année très velus, à pilosité allongée.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans gris argenté devenant glabrescent.



Fig. 4 - Feuilles oblongues à lancéolées, velues sur les 2 faces.

Distribution et vulnérabilité

Le saule glauque est une espèce endémique est-alpine présente de la France à l'Autriche. Elle est peu commune sur l'ensemble du territoire franco-suisse.

Elle est globalement assez rare dans les Alpes du Nord, mais peut être localement abondante dans certains secteurs des Alpes internes.

Écologie

- Le saule glauque est une espèce pionnière constituante des landes à rhododendrons et brousses subalpines. Il se développe parfois au sein de forêts de conifères claires et fraîches (pessières, cembraies, mélézins), marais, éboulis, couloirs d'avalanche ou aux abords des sources et cours d'eau de montagne.
- Il croît sur des matériaux grossiers (graviers, galets, blocs), généralement siliceux, pauvres en éléments nutritifs, neutres à acides, modérément secs à humides.
- Il présente un optimum écologique au sein des saulaies buissonnantes acidophiles sur blocs (*Salicetum helveticae* – fig. 7).
- Il se développe aux étages subalpin et alpin inférieur (de 1 400 à 2 500 m).



Fig. 5 - Chaton mâle dressé.



Fig. 6. - Chaton femelle velu blanchâtre.

Utilisation en génie végétal

Le saule glauque est une espèce potentiellement adaptée pour le génie végétal en rivière de montagne.

Avec son port souple, dense et étalé ne dépassant pas 2 m de haut, il convient notamment pour stabiliser les berges des torrents ou les terrains très inclinés soumis à des perturbations régulières. Implantés en pied de berge, les buissons denses qu'il forme permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces.

De par sa tolérance à la variation du niveau hydrique du sol, il peut être utilisé sur des substrats grossiers très drainants, du pied jusqu'en sommet de berge, de préférence sur substrats siliceux, de 1 600 à 2 300 m d'altitude.

Au vu de sa relative rareté, de son très faible taux de reprise au bouturage (entre 20 et 30 %) et de ses rameaux courts et tortueux, l'utilisation de boutures ou de branches dans les aménagements peut s'avérer difficile. Il peut toutefois être intéressant de l'intégrer sous forme de ramilles vivantes plaquées sous une fascine ou dans des lits de plants et plançons en association avec les saules hasté (*Salix hastata*), fétide (*S. foetida*), de Suisse (*S. helvetica*), de Lagger (*S. laggeri*), alpestre (*S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*) ou encore l'aulne vert (*Alnus viridis*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.



Fig. 7 - Situation typique au sein d'une brousse subalpine (*Salicetum helveticae*).

Compte tenu de la relative vulnérabilité de ce taxon dans certains secteurs de l'Arc alpin, une attention particulière devra être portée à sa conservation lors de son utilisation en génie végétal : ne pas prélever de boutures dans le canton de Vaud ou en région Rhône-Alpes où il est protégé, réaliser des prélèvements sporadiques sur des stations suffisamment importantes (plusieurs dizaines de pieds), privilégier son implantation à proximité de noyaux de populations existants. En respectant ces principes, son intégration dans les ouvrages de génie végétal peut s'avérer pertinente pour la conservation de l'espèce.

Le saule glauque ne semble actuellement pas encore disponible dans le commerce. La culture en pépinière de plants indigènes de provenance locale est donc à développer pour une utilisation en génie végétal mais aussi à des fins conservatoires.

Salix hastata Vill.

Saule hasté

Salicacées

Description

- Le saule hasté est un arbrisseau caducifolié à port ascendant ou étalé atteignant 2 m de haut (fig. 1).
- Les rameaux de l'année, brun chocolat à rougeâtres, sont mats, glabres (fig. 2) ou lâchement velus (pilosité longue et enchevêtrée, souvent éparses – fig. 3). Ceux de 3 ans sont glabres, noueux (cicatrices foliaires saillantes) et souvent verdâtres.
- Les bourgeons, de même couleur que les jeunes rameaux, sont généralement de 2 types. Les bourgeons foliaires, plan-convexes, longs de 3,5 à 7 mm, présentent un apex aigu ou obtus, appliqué sur le rameau (fig. 2). Les bourgeons floraux, plus grands, longs de 8 à 10 mm, sont aigus ou plus ou moins aplatis au sommet à apex écarté du rameau (fig. 3).
- Les feuilles, longues de 2 à 8 cm, sont obovales à elliptiques, en coin à la base, régulièrement et finement denticulées et courtement pétiolées. Elles sont d'abord velues à l'état jeune (fig. 4) puis glabres, vert mat dessus et mates ou glauques dessous (fig. 5). Elles sont munies, à la base du pétiole, de grandes stipules à sommet droit.
- Les fleurs, protégées par une écaille barbue brunâtre au sommet, sont rassemblées en chatons allongés de 3 à 6 cm, dressés, portés par un pédoncule feuillé. Les fleurs mâles sont pourvues de 2 étamines à filets libres et glabres (fig. 6). Les fleurs femelles sont composées d'une capsule glabre, aplatie, presque sessile, et d'un long style terminé par des stigmates bifurqués (fig. 7).
- La floraison a lieu de juin à août, en même temps que la feuillaison.



Fig. 1 - Port ascendant à étalé.



Fig. 2 - Bourgeons foliaires sur rameau de l'année brun chocolat.



Fig. 3 - Bourgeons floraux sur rameau de l'année rougeâtre.



Fig. 4 - Jeune feuille velue au revers.



Fig. 5 - Feuilles matures glabres, glauques au revers.

- Le saule hasté peut être confondu avec des individus prostrés de saule appendiculé (*S. appendiculata*), aux rameaux de l'année brun jaunâtre à brun verdâtre, ou avec le saule fétide (*S. foetida*) aux feuilles régulièrement dentées glanduleuses et à pilosité courte peu visible (moins de 0,5 mm).

Distribution et vulnérabilité

Le saule hasté est une espèce euro-sibérienne d'affinité arctico-alpine. Au sein du territoire franco-suisse, elle est présente dans les Pyrénées, le Massif central, les Vosges et les Alpes.

Elle est relativement fréquente dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule hasté est une espèce pionnière de demi-ombre ou de pleine lumière, constituant des saulaies basses. Il se développe régulièrement au sein des aulnaies vertes et parfois dans les clairières des forêts fraîches de conifères (pinèdes, pessières, mélézins), les marais, éboulis ou couloirs d'avalanche.
- Il croît sur divers types de substrats, (alluvions, éboulis et moraines), frais à humides mais généralement bien aérés, plus ou moins riches en bases et en nutriments, basiques à légèrement acides.
- Il présente un optimum écologique dans les fourrés subalpins frais (*Betulo carpaticae-Alnetea viridis*) notamment au sein des saulaies riveraines (*Salicion waldesteinianae* – fig. 8).
- Il se développe aux étages subalpin et alpin inférieur (de 1 500 à 2 500 m).



Fig. 6 - Chaton mâle dressé et porté par un pédoncule feuillé.



Fig. 7 - Chaton femelle dressé et porté par un pédoncule feuillé.

Utilisation en génie végétal

Le saule hasté est une espèce particulièrement adaptée pour le génie végétal. En effet, à l'instar du saule bleuâtre et du saule fétide, cette espèce forme naturellement des colonies denses aux abords des torrents subalpins.

Avec sa ramure souple ne dépassant pas 2 m de hauteur, il est particulièrement adapté pour stabiliser les berges des torrents ou les terrains inclinés soumis à des perturbations régulières. Il offre ainsi une forte résistance à la traction grâce à la souplesse de ses tiges qui s'adaptent aux contraintes du terrain. Implantés en pied de berge, les buissons denses qu'il forme permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces.



Fig. 8 - Situation typique sur blocs en association avec *Salix foetida*.

Sa grande amplitude écologique permet de l'utiliser aussi bien sur des substrats grossiers drainants (fig. 8) que sur des matériaux fins gorgés d'eau, sur roches calcaires ou siliceuses. Il pourra être implanté aussi bien sur des pentes raides exposées que dans des vallées encaissées, entre 1 500 et 2 300 m d'altitude.

Compte tenu de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise élevé au bouturage (entre 60 et 70 %), cette espèce peut être utilisée sous forme de boutures, de branches, de plançons ou de ramilles. Il peut toutefois s'avérer difficile de trouver un nombre important de boutures au diamètre suffisamment large pour être battues mécaniquement, ou des branches suffisamment longues pour être intégrées dans des fascines de saule ou des couches de branches à rejets. Il peut être pertinent de l'intégrer sous forme de ramilles vivantes plaquées sous une fascine ou dans des lits de plants et plançons. Le matériel végétal à disposition pouvant être localement abondant aux abords des torrents subalpins, cette technique peut s'avérer opportune dans certaines situations. Attention toutefois à ne pas l'associer à des espèces arbustives à fort potentiel de croissance. Il pourra ainsi être associé à d'autres saules subalpins buissonnants comme les saules fétide (*Salix foetida*), bleuâtre (*S. caesia*), glauque (*S. glaucosericea*), de Suisse (*S. helvetica*), alpestre (*S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*) ou noirissant (*S. myrsinifolia*), ou encore l'aulne vert (*Alnus viridis*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

Le saule hasté est disponible dans certaines pépinières spécialisées. La présence de quelques cultivars sur le marché (« Bois jaune », « Wehrhanii », etc.) rend parfois difficile l'approvisionnement en plants indigènes.

Le saule hasté bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle).

Salix helvetica Vill.

Saule de Suisse

Salicacées

Description

- Le saule de Suisse est un arbrisseau caducifolié tortueux formant des petits buissons pouvant atteindre 2 m de haut (fig. 1).
- Les jeunes rameaux sont luisants, brun-orangé (fig. 2), verdâtres à beiges. Initialement velus ou glabrescents, pourvus d'une pilosité courte enchevêtrée et appliquée mesurant moins de 1 mm de long, ils deviennent gris argenté et glabres avec l'âge (fig. 3).
- Les bourgeons, beiges à orangés, de 4 à 8 mm, sont ovoïdes à elliptiques, obtus ou arrondis au sommet à apex écarté du rameau (fig. 2).
- Les feuilles, courtement pétiolées, obovales à elliptiques, sont vert foncé à grisâtres, luisantes et légèrement velues dessus (fig. 4), densément velues-cotonneuses et blanchâtres au revers (fig. 5). Elles mesurent de 4 à 8 cm et sont 2 à 3 fois plus longues que larges.
- Les fleurs, protégées par une écaille velue brune devenant noirâtre à l'extrémité, sont rassemblées en chatons dressés, oblongs à elliptiques, courtement pédonculés. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines libres à filets glabres (fig. 6). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule tomenteuse (poils courts) presque sessile, longue de 5 à 7 mm et surmontée d'un style court, rougeâtre à violacé (fig. 7).
- La floraison a lieu de mai à juillet, en même temps que la feuillaison.



Fig. 1 - Port buissonnant.



Fig. 2 - Bourgeons ovoïdes à elliptiques, glabrescents.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans gris argenté, glabre.



Fig. 4 - Feuille obovale, luisante sur la face supérieure.



Fig. 5 - Feuille velue blanchâtre au revers.

- Le saule de Suisse peut facilement être confondu avec le saule glauque (*S. glaucosericea*), aux feuilles glauques sur les deux faces, non tomenteuses blanchâtres au revers, aux bractées jamais noirâtres au sommet et à la pilosité des rameaux et des bourgeons hirsute et allongée (poils mesurant plus de 1 mm).

Distribution et vulnérabilité

Le saule de Suisse est une espèce ouest-européenne montagnarde présente des Alpes aux Carpates. En France, elle est uniquement recensée de la Haute-Savoie aux Hautes-Alpes. Elle est plus largement distribuée en Suisse.

Elle est globalement assez rare dans les Alpes du Nord mais peut être localement abondante dans les Alpes valaisannes.

Écologie

- Le saule de Suisse est une espèce pionnière des landes à rhododendrons et des brousses subalpines. Il se développe parfois au sein de forêts de conifères claires et fraîches (pessières, cembraies, mélézins), d'éboulis, de couloirs d'avalanche ou aux abords des sources et cours d'eau de montagne.
- Il croît sur des substrats grossiers (sables, graviers, blocs), le plus souvent morainiques ou alluviaux, siliceux, pauvres en éléments nutritifs, neutres à acides, frais à humides.
- Il présente un optimum écologique au sein des saulaies buissonnantes acidophiles sur blocs (*Salicetum helveticae* – fig. 8).
- Il se développe aux étages subalpin et alpin inférieur (de 1 700 à 2 500 m).



Fig. 6 - Chaton mâle court et dressé.



Fig. 7 - Chaton femelle composé de capsules tomenteuses surmontées de styles courts.

Utilisation en génie végétal

À l'instar du saule glauque (*Salix glaucosericea*), le saule de Suisse est une espèce potentiellement adaptée pour le génie végétal.

Avec sa ramure souple ne dépassant pas 2 m de haut, le saule de Suisse est particulièrement adapté pour stabiliser les berges des torrents ou les terrains très inclinés soumis à des perturbations régulières. Il bénéficie d'une résistance élevée à la traction et résiste bien à l'ensevelissement (ses rameaux souples et robustes se couchent sur le sol lors de glissements de terrain ou d'éboulements). Implantés en pied de berge, les buissons denses qu'il forme permettent de dissiper l'énergie du courant lors des crues et de piéger les sédiments fins, facilitant ainsi l'installation d'autres espèces.

Il peut être utilisé sur des substrats grossiers silicatés drainants, de préférence sur des secteurs frais, ouverts ou bien exposés entre 1 700 et 2 300 m (éviter les vallées trop encaissées et les ripisylves trop denses).

Au vu de sa relative rareté dans certaines régions, de son taux de reprise au bouturage inconstant (entre 40 et 80 %) et de ses rameaux courts et tortueux, l'utilisation de boutures ou de branches dans les aménagements peut s'avérer difficile. Il n'est en effet guère possible de trouver un nombre important de branches suffisamment larges et rectilignes pour être battues mécaniquement. De la même manière, il est difficile de se procurer des branches suffisamment longues

pour être intégrées dans des fascines de saule ou des couches de branches à rejets. Toutefois, il peut être pertinent de l'intégrer sous forme de ramilles vivantes plaquées sous une fascine ou dans des lits de plants et plançons.

Le saule de Suisse étant disponible dans certaines pépinières, l'utilisation de plants en motte ou en racines nues devra être privilégiée. Il pourra être intégré sous cette forme dans des lits de plants ou des caissons en rondins végétalisés du pied jusqu'en sommet de berge, en association avec les saules appendiculé (*Salix appendiculata*), de Lager (*S. laggeri*), fétide (*S. foetida*), alpestre (*S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*), glauque (*S. glaucosericea*) ou avec l'aulne vert (*Alnus viridis*) qu'il cotoie fréquemment en milieu naturel.

Le saule de Suisse bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle) ainsi que sur l'ensemble du territoire français.

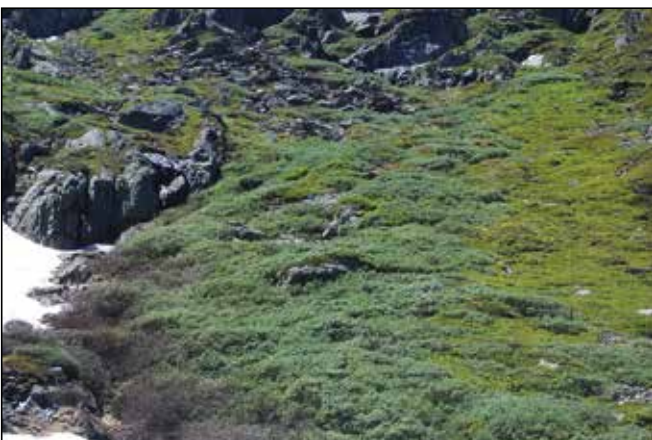


Fig. 8 - Situation typique (*Salicetum helveticae*) en mosaïque avec la lande à rhododendron ferrugineux.

Salix laggeri Wimm.

Saule de Lagger

Salicacées

Description

- Le saule de Lagger est un arbuste à port dressé formant des cépées denses pouvant atteindre 4 m de hauteur (fig. 1).
- Les jeunes rameaux, beiges, jaunâtres à jaune verdâtre, robustes et nettement velus (pilosité hirsute et étalée – fig. 2), deviennent gris foncé avec l'âge (fig. 3). Ils ne sont jamais striés sous l'écorce.
- Les bourgeons, ovoïdes à triangulaires, sont nettement velus (pilosité allongée, dense et hirsute dépassant 1 mm) à apex aplati (fig. 2), appliqué sur le rameau ou légèrement recourbé vers l'extérieur (en « bec de canard »). Ils mesurent de 4,5 à 9,5 mm et sont ordinairement de 2 à 2,5 fois plus longs que larges.
- Les feuilles, lancéolées à obovales-elliptiques, d'abord blanches-cotonneuses, deviennent glabrescentes et vert foncé dessus (fig. 4) et sont velues blanchâtres au revers (fig. 5). Elles mesurent de 3 à 7 cm de long et sont crénelées-dentées à presque entières. Les stipules, longues de 0,5 cm, sont rapidement caduques.
- Les fleurs sont protégées par une écaille velue verdâtre teintée de brun au sommet. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines libres et sont regroupées en chatons courts et denses (fig. 6). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule velue longuement pédicellée (pédicelle plus long que l'écaille) surmontée d'un style court et sont rassemblées en chatons oblongs dressés à étalés (fig. 7).
- La floraison a lieu de mai à juillet, en même temps que la feuillaison.



Fig. 1 - Port en cépées denses.



Fig. 2 - Bourgeons et rameau de l'année nettement velus.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans gris foncé, velu.



Fig. 4 - Feuille obovale à elliptique, glabrescente sur la face supérieure.



Fig. 5 - Feuille velue blanchâtre au revers.

- À l'état végétatif, le saule de Lagger peut être confondu avec le saule appendiculé (*S. appendiculata*) dont le bois de 2 ans est ordinairement glabre et les bourgeons non aplatis à l'extrémité. Il peut également être confondu avec le saule noircissant (*S. myrsinifolia*) dont les rameaux sont striés sous l'écorce et dont l'apex des bourgeons est obtus. Enfin, certains individus prostrés peuvent être confondus avec le saule glauque (*S. glaucosericea*) aux jeunes rameaux luisants.

Distribution et vulnérabilité

Le saule de Lagger est une espèce endémique alpine présente de l'Est de la France à l'Ouest de l'Autriche.

Elle est rare et localisée dans les Alpes du Nord (surtout présente dans les Alpes internes).

Écologie

- Le saule de Lagger est une espèce pionnière des brousses et saulaies buissonnantes subalpines, mais également des forêts de conifères claires (pessières, mélézins, etc.) se développant sur des éboulis, au sein de couloirs d'avalanche et aux abords des ruisseaux d'altitude (fig. 8).
- Il croît préférentiellement sur alluvions et éboulis siliceux grossiers (sables, graviers, galets, blocs), plus ou moins pauvres en éléments nutritifs, neutres à acides, frais à humides.
- Il présente un optimum écologique au sein des fourrés cryophiles montagnards à subalpins (*Betulo-Alnetea*).
- Il se développe de l'étage montagnard supérieur à l'étage subalpin (de 1 400 à 2 100 m).



Fig. 6 - Chaton mâle court et dense.



Fig. 7 - Chaton femelle dressé à étalé.

Utilisation en génie végétal

Le saule de Lagger est une espèce potentiellement adaptée pour les aménagements aux étages montagnard et subalpin, aussi bien pour la protection de berges de torrents que pour la stabilisation de pentes soumises au risque de glissement ou d'érosion.

Dotée d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et d'une croissance juvénile rapide, cette espèce vigoureuse protège rapidement les couches superficielles du sol. Elle est capable de supporter de nombreux chocs et résiste bien à l'ensevelissement (flexibilité des troncs et production de racines adventives), ce qui lui permet de se développer sur des terrains instables soumis à des perturbations régulières. Avec un port assez souple et dense dépassant rarement 4 m de haut, son potentiel d'utilisation est très varié. Implantée en pied de berge, elle favorise ainsi la dissipation de l'énergie du courant et le piégeage des sédiments fins.



Fig. 8 - Situation typique aux abords d'un torrent.

Elle peut être utilisée sur des substrats grossiers, pour peu que ceux-ci soient suffisamment pauvres en calcaire et bien alimentés en eau (proximité de la nappe phréatique, d'une source ou d'un suintement), du pied jusqu'en sommet de berge, de 1 400 à 2 100 m d'altitude.

Les branches du saule de Lagger peuvent produire des ramilles, des plançons ou des boutures. Son taux de reprise au bouturage est toutefois faible en conditions naturelles (environ 30 %), ce qui limite sensiblement son utilisation. Il est cependant envisageable de l'intégrer sous forme de boutures ou de plançons, à condition de l'implanter avec de fortes densités (30 à 40 pièces par mètre) et de l'utiliser en combinaison avec des espèces à fort taux de reprise comme le saule noirissant (*Salix myrsinifolia*) ou le saule pourpre (*S. purpurea*).

Son association avec l'aulne vert (*Alnus viridis*), le bouleau pendant (*Betula pendula*), les saules appendiculé (*S. appendiculata*) ou noirissant (*S. myrsinifolia*) est particulièrement pertinente, notamment dans les lits de plants et plançons et les caissons en rondins végétalisés.

Le saule de Lagger est disponible dans certaines pépinières spécialisées, mais son approvisionnement peut toutefois s'avérer difficile.

Le saule de Lagger bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle) ainsi que dans certaines régions françaises.

Salix myrsinifolia Salisb.

Saule noircissant

Salicacées

Description

- Le saule noircissant est un arbuste caducifolié, à port dressé, haut de 1,5 à 4 m et formant des cépées denses (fig. 1).
- Les rameaux de l'année, brun foncé, violacés à rougeâtres, sont pubescents (fig. 2). Les rameaux de 2 ans, glabres ou velus et luisants ou mats selon les sous-espèces (fig. 3), sont striés sous l'écorce.
- Les bourgeons, ovoïdes à plan-convexes, bruns à noirâtres, sont généralement densément velus (pilosité appliquée à hirsute) et appliqués sur le rameau (fig. 2). Ils sont environ 2 fois plus longs que larges et mesurent de 2,5 à 6,5 mm (la plupart mesurant plus de 4 mm).
- Les feuilles, lancéolées à elliptiques, sont longues de 2 à 6 cm et larges de 1 à 3 cm. Elles sont vertes et glabres dessus, glauques à pruveuses à nervures velues (fig. 4) et pointe verte au revers, comme essuyées (fig. 5). Elles sont ondulées, irrégulièrement dentées et glanduleuses sur les bords. Elles noircissent rapidement à la dessiccation (tâches sombres visibles autour des impacts).
- Les fleurs, protégées par une écaille barbue brunâtre au sommet, sont rassemblées en chatons courts, presque sessiles et feuillés à la base. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines libres à filets glabres à légèrement velus à la base (fig. 6). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule glabre ou velue surmontée d'un long style à stigmates bifurqués (fig. 7).
- La floraison a lieu d'avril à juin, en même temps que la feuillaison.
- Deux sous-espèces sont actuellement décrites. La sous-espèce *alpicola* diffère du type (subsp. *myrsinifolia*) par ses rameaux de 2 ans brillants, glabres à glabrescents (fig. 3).



Fig. 4 - Feuille glauque à nervures velues au revers.



Fig. 5 - Pointe de la feuille verte dessous, paraissant essuyée.



Fig. 1 - Port en cépées denses.



Fig. 2 - Bourgeons et rameaux de l'année velus : (a) subsp. *alpicola* ; (b) subsp. *myrsinifolia*.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans : (a) glabre et brillant chez la subsp. *alpicola* ; (b) mat et velu chez la subsp. *myrsinifolia*.

Distribution et vulnérabilité

Le saule noircissant est une espèce euro-sibérienne présente sur l'ensemble du territoire suisse. En France, elle est uniquement recensée dans l'Est (Alpes, Jura, Vosges et plaine du Rhin) et les Pyrénées. Elle est fréquente dans les Alpes du Nord.

La distribution de la sous-espèce *alpicola* reste à préciser.

Écologie

- Le saule noirissant est une espèce pionnière des fourrés et forêts ripicoles (aulnaies, saulaies, frênaies, etc.) et des saulaies d'altitude.
- Il croît préférentiellement sur des substrats alluvionnaires grossiers (sables, graviers, galets), généralement calcaires, frais à humides et présentant des variations d'humidité au cours de l'année, basiques à légèrement acides.
- La sous-espèce *alpicola* se développe préférentiellement dans le manteau de l'aulnaie blanche (*Salicetum alpicolae* - fig. 8) et les fourrés cryophiles d'altitude (*Betulo-Alnetea*) avec un optimum à l'étage subalpin (parfois jusqu'à 2 300 m).
- La sous-espèce *mysinifolia* se développe préférentiellement au sein des aulnaies blanches (*Alnion incanae*) et formations arbustives annexes ou marécageuses (*Salicion pentandrae*) de l'étage collinéen à l'étage subalpin avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Chaton mâle court.



Fig. 7 - Chaton femelle présentant de longs styles à stigmates bifurqués.

Utilisation en génie végétal

Le saule noirissant est une espèce particulièrement adaptée pour la stabilisation des berges des rivières de montagne. Dotée d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche), d'une croissance juvénile rapide et d'un système racinaire développé (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,8), cette espèce vigoureuse couvre et protège rapidement le sol. Son port buissonnant ne dépassant pas 4 m de hauteur (3 m pour la sous-espèce *alpicola*) et ses rameaux souples et robustes, lui offre une très bonne résistance à la traction. Implanté en pied de berge, il favorise ainsi la dissipation de l'énergie du courant et le piégeage des sédiments fins.

Tolérant aussi bien les sécheresses intenses que les inondations prolongées (son système racinaire s'adapte en fonction de l'hygrométrie du sol et de la hauteur de la nappe - Hughes *et al.* 2010), il peut être utilisé sur des substrats bruts très drainants, du pied jusqu'au sommet de berge (fig. 9), jusqu'à 2 200 m d'altitude (notamment la sous-espèce *alpicola*).



Fig. 8 - Situation typique (subsp. *alpicola*) en lisière forestière (*Salicetum alpicolae*).



Fig. 9 - Situation typique en pied de berge sur blocs décimétriques (subsp. *mysinifolia*).

Compte tenu de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise élevé au bouturage (entre 70 et 90 % avec de meilleurs résultats enregistrés sur des rameaux âgés plantés en période hivernale), cette espèce peut être utilisée sous forme de boutures, de branches, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi être facilement intégrée dans un grand nombre d'ouvrages (lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, couches de branches à rejets, fascines de saule, bouturage, etc.), notamment en association avec l'aulne blanc (*Alnus incana*), le frêne commun (*Fraxinus excelsior*), le saule drapé (*Salix elaeagnos*), le saule faux daphné (*S. daphnoides*) ou le saule pourpre (*S. purpurea*).

Le saule noirissant est aussi disponible dans certaines pépinières mais la sous-espèce *alpicola* ne semble pas encore commercialisée. Souvent abondant aux abords des rivières de montagne, il est toutefois préférable de se procurer le matériel végétal à proximité des chantiers, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales. Pour les aménagements à l'étage subalpin, il est conseillé, dans la mesure du possible, de privilégier la sous-espèce *alpicola*.

Le saule noirissant bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle).

Salix pentandra L.

Saule laurier

Salicacées

Description

- Le saule laurier est un arbuste caducifolié, formant des cépées pouvant atteindre 12 m de haut (fig. 1).
- Les rameaux de l'année, arrondis et robustes, sont glabres et luisants (fig. 2). L'écorce, d'abord beige, devient grise avec l'âge (fig. 3).
- Les bourgeons, jaune orangé à brun rougeâtre, sont ovoïdes à elliptiques et luisants, à apex généralement écarté du rameau (fig. 3).
- Les feuilles, lancéolées à ovales-elliptiques, mesurent de 4 à 12 cm et sont 2 à 4 fois plus longues que larges. Elles sont totalement glabres et denticulées-glanduleuses, luisantes et vert foncé dessus (fig. 4), plus claires et mates dessous (fig. 5). À l'état jeune, elles sont visqueuses et odorantes. Les stipules, petites, sont rapidement caduques.
- Les fleurs, protégées par une écaille vert jaunâtre velue, sont rassemblées en chatons allongés portés par de longs pédoncules feuillés. Les fleurs mâles sont pourvues de 5 étamines libres (fig. 6). Les femelles sont munies d'un style court et d'une capsule glabre et luisante portée par un court pédicelle (fig. 7). Les chatons femelles desséchés persistent sur les rameaux durant tout l'hiver.
- La floraison a lieu de mai à juillet, en même temps ou légèrement après la feuillaison.



Fig. 1 - Port.



Fig. 2 - Bourgeons et rameau de l'année glabres et luisants.



Fig. 3 - Rameau de 2 ans et gris.



Fig. 4 - Feuille vert foncé, luisante sur la face supérieure.



Fig. 5 - Feuille plus claire et mate au revers.

- Le saule laurier peut être confondu avec le saule à trois étamines (*S. triandra*) dont les rameaux de l'année sont cannelés à leur extrémité et les fleurs mâles ne sont composées que de 3 étamines. Il peut également être confondu avec le saule faux daphné (*S. daphnoides*), aux feuilles non visqueuses odorantes à l'état jeune et aux bourgeons foliaires à apex nettement appliqué sur les rameaux.

Distribution et vulnérabilité

Le saule laurier est une espèce eurasiatique montagnarde présente de façon disséminée sur l'ensemble du territoire franco-suisse.

Globalement assez rare sur l'ensemble de son aire, elle est toutefois assez fréquente dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le saule laurier est une espèce pionnière à large amplitude colonisant les prairies humides, les broussailles fraîches d'altitude (saulaies buissonnantes), ainsi que les fourrés et boisements ripicoles ou marécageux (aulnaies blanches, saulaies marécageuses montagnardes).
- Il croît sur des substrats tourbeux ou alluvionnaires à granulométrie variable (argiles, limons, sables, graviers), souvent gorgés d'eau. Il est indifférent au pH, à la richesse en éléments nutritifs du sol et au type de roche mère.
- Cette espèce bimodale présente un optimum écologique au sein d'aulnaies-saulaies alluviales subalpines sur matériaux grossiers (*Alno-Salicetum pentandrae* – fig. 8) ou de saulaies marécageuses montagnardes sur tourbe (*Salicetum pentandro-cinereae*).
- Il se développe aux étages montagnard et subalpin (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 6 - Chaton mâle allongé, porté par un long pédoncule feuillé.



Fig. 7 - Chaton femelle glabre, plus ou moins luisant.

Utilisation en génie végétal

Le saule laurier est une espèce particulièrement adaptée pour la stabilisation des berges des cours d'eau et des talus de montagne. Son système racinaire profond, son fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et sa croissance juvénile rapide lui permettent de protéger rapidement les couches supérieures du sol. De par ses rameaux souples et robustes, il offre une très bonne résistance à la traction et est capable de supporter de nombreux chocs. Dotée d'une forte capacité d'évapotranspiration (Zouaoui 2011), cette espèce convient également pour drainer les berges et talus instables soumis à des infiltrations d'eau.



Fig. 8 - Situation typique au sein d'une aulnaie-saulaie alluviale subalpine sur matériaux grossiers (*Alno-Salicetum pentandrae*).

Son feuillage luisant et sa floraison tardive, comparativement aux autres espèces de saule, permettent également d'apporter une plus-value ornementale aux aménagements. Sa forte amplitude écologique permet de l'implanter sur tous types de substrats pour peu qu'ils soient régulièrement alimentés en eau, et dans diverses conditions d'ensoleillement, en pied comme en sommet de berge, jusqu'à 2 000 m d'altitude. Avec son port arboré pouvant atteindre 12 m de haut, il convient toutefois d'être prudent lors de son implantation en pied de berge, notamment sur des cours d'eau à fortes contraintes hydrauliques.

Compte tenu de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise élevé au bouturage (entre 70 et 90 % quelles que soient les conditions), cette espèce est particulièrement adaptée pour produire des boutures, des plançons, des branches ou des pieux (vivants ou morts). Pouvant être localement abondante aux abords des rivières de montagne, 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 un grand nombre d'ouvrages de génie végétal (lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, tressages et fascines de saules, couches de branches à rejets, bouturage), notamment en association avec les saules appendiculé (*Salix appendiculata*), drapé (*S. elaeagnos*), faux daphné (*S. daphnoides*), noirissant (*S. myrsinifolia*) ou encore avec l'aulne blanc (*Alnus incana*), le cytise des Alpes (*Laburnum alpinum*) et le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), assurant ainsi une complémentarité à la couverture végétale et à l'enracinement.

Le saule laurier est disponible dans certaines pépinières. Cette espèce bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale ou partielle) ainsi que dans certaines régions françaises.

Salix purpurea L.

Saule pourpre

Salicacées

Description

- Le saule pourpre est un arbrisseau caducifolié formant des cépées denses pouvant atteindre 6 m de hauteur (fig. 1 et 8).
- Les rameaux de l'année, grêles, souples et généralement pourpre ou beiges (plus rarement verts ou gris), sont glabres et brillants (fig. 2). Les rameaux plus âgés deviennent ensuite beiges à grisâtres (fig. 3).
- Les bourgeons, souvent opposés à subopposés, généralement rougeâtres à noirâtres, parfois panachés de jaune, sont au moins 2 fois plus longs que larges et peuvent atteindre 10 mm de long. Ils sont glabres et plus ou moins luisants (fig. 2 et 3).
- Les feuilles, souvent opposées, sont obovales à lancéolées et courtement pétiolées. Elles mesurent 4 à 12 cm et sont de 3 à 10 fois plus longues que larges, élargies et denticulées dans la partie supérieure. Elles sont glabres sur les 2 faces, vert foncé dessus et glauques dessous (fig. 4 et 5).
- Les fleurs, protégées par une écaille velue rouge ou noire, sont rassemblées en chatons cylindriques denses et sessiles mesurant de 12 à 40 mm. Les fleurs mâles sont composées de 2 étamines à filets glabres, entièrement soudés, et d'anthères rouges en début de floraison devenant jaunâtres (fig. 6). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule sessile et pubescente (fig. 7).
- La floraison a lieu de mars à mai, avant la feuillaison.



Fig. 4 - Feuille vert foncé sur la face supérieure, denticulée sur la moitié supérieure (subsp. *purpurea*).



Fig. 5 - Feuilles vert clair, faiblement dentées (subsp. *angustior*).



Fig. 1 - Port ascendant en cépées denses (subsp. *purpurea*).



Fig. 2 - Bourgeons opposés sur rameau de l'année (subsp. *angustior*).



Fig. 3 - Bourgeons subopposés sur rameau de 2 ans (subsp. *purpurea*).

- Trois sous-espèces sont décrites à ce jour :
 - subsp. **angustior** aux feuilles vert clair, petites et faiblement dentées (fig. 5) et chatons ne dépassant pas 15 mm de long (fig. 6 et 7) ;
 - subsp. **lambertiana** aux feuilles arrondies à la base et denticulées sur toute leur longueur ;
 - subsp. **purpurea** aux feuilles en coin à la base et denticulées seulement sur la moitié supérieure (fig. 4).
- Le saule pourpre peut éventuellement être confondu avec le saule bleuâtre (*S. caesia*), qui s'en distingue par ses bourgeons globuleux moins de deux fois plus longs que larges et par ses feuilles jamais dentées.

Distribution et vulnérabilité

Le saule pourpre est une espèce eurasiatique commune dans la majeure partie du territoire franco-suisse, à l'exception de l'extrême Ouest de la France.

La sous-espèce *purpurea* est très commune dans les Alpes du Nord. La sous-espèce *angustior*, d'Europe centrale, remplace la précédente en altitude. La sous-espèce *lambertiana*, ouest-européenne, n'est pas présente dans les Alpes du Nord (région située au-delà de la limite orientale de son aire).

Écologie

- Le saule pourpre est une espèce pionnière à large amplitude se développant aux abords des cours d'eau (saulaies buissonnantes, aulnaies blanches, frênaies, saulaies blanches) et, en situation secondaire, au sein des fourrés mésophiles à mésoxérophiles (carrières, gravières, accrus forestiers – fig. 8).
- Il croît sur divers types de substrats (alluvions généralement grossières, sols argileux à graveleux plus ou moins riches en matière organique), basiques à légèrement acides, secs à humides. Il supporte aussi bien des sécheresses intenses que des inondations prolongées.
- Il présente un optimum écologique au sein des saulaies alluviales (*Salicetea purpureae* – fig. 1).
- La sous-espèce *angustior* se développe aux étages montagnard et subalpin (jusqu'à 2 400 m) et la sous-espèce *purpurea* aux étages collinéen et montagnard.



Fig. 6 - Chaton mâle cylindrique, dense et sessile (subsp. *angustior*).



Fig. 7 - Chaton femelle cylindrique, dense et sessile (subsp. *angustior*).

Utilisation en génie végétal

Le saule pourpre est une espèce déjà largement utilisée en génie végétal. Dotée d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche), d'une croissance juvénile rapide et d'un système racinaire extrêmement développé (rapp. vol. syst. sout./aérien = 1,5), cette espèce vigoureuse couvre et protège rapidement le sol. Avec son port buissonnant ne dépassant généralement pas 6 m de hauteur et ses rameaux souples et robustes, elle offre une très bonne résistance à la traction et est particulièrement adaptée pour protéger les berges de cours d'eau et les talus très inclinés, sans risques de surcharge ou d'effet « bras de levier » (Beismann *et al.* 2000). Implantée en pied de berge, elle favorise ainsi la dissipation de l'énergie du courant et le piégeage des sédiments fins. Sa capacité à créer des racines adventives lui permet également de résister à l'ensevelissement.

Sa forte amplitude écologique permet de l'implanter sur tous types de substrats (même sur des matériaux grossiers et très drainants – fig. 8), dans diverses conditions d'ensoleillement, aussi bien en pied de berge qu'en sommet de talus et jusqu'à 2 300 m (notamment la sous-espèce *angustior*, plus adaptée en altitude).



Fig. 8 - Situation secondaire en contexte xérophile (subsp. *angustior*).

Compte tenu de la taille de ses rameaux et de son taux de reprise au bouturage supérieur à 90 % quelles que soient les conditions et les périodes de plantation, cette espèce peut être utilisée sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi facilement être intégrée dans un grand nombre d'ouvrages de génie végétal : lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, tressages et fascines de saules, couches de branches à rejets, bouturage. Elle pourra notamment être associée aux saules noircissant (*Salix myrsinifolia*) et faux daphné (*S. daphnoides*), à la myricaire (*Myricaria germanica*), voire à l'argousier (*Hippophae rhamnoides*) ou encore aux saules drapé (*S. elaeagnos*) et à trois étamines (*S. triandra*) pour les aménagements situés en-dessous de 1 500 m d'altitude.

Le saule pourpre est disponible dans le commerce, y compris la sous-espèce *angustior* cultivée dans certaines pépinières.

Compte tenu de la présence de nombreux cultivars ornementaux sur le marché (« *Nana* », « *Howki* », « *Pendula* », etc.), une attention particulière devra être portée à la provenance des plants. La sous-espèce *lambertiana*, plus régulièrement cultivée pour l'ornement, ne devrait pas être employée dans les Alpes du Nord, ce taxon n'étant pas indigène sur ce secteur. Il est ainsi préférable de se procurer le matériel végétal à proximité des chantiers (boutures), garantissant alors l'utilisation de souches locales.

Le saule pourpre bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection partielle).

Salix triandra L.

Saule à trois étamines

Salicacées

Description

- Le saule à trois étamines est un arbuste caducifolié dépassant rarement 5 m de haut et formant des cépées denses (fig. 1).
- Les rameaux de l'année, généralement brun chocolat à brun rougeâtre, sont glabres, cannelés au sommet (fig. 2) et souvent pourvus de plaques décolorées blanchâtres (fig. 3). L'écorce âgée, généralement gris verdâtre, s'exfolie par plaques laissant alors visible un tronc couleur cannelle.
- Les bourgeons, plan-convexes, sont appliqués sur les rameaux (fig. 2 et 3). Ils sont 2 à 4 fois plus longs que larges et mesurent de 3 à 6 mm.
- Les feuilles, lancéolées, denticulées-glanduleuses, mesurent de 5 à 10 cm. Elles sont 3 à 5 fois plus longues que larges, glabres, vert foncé et luisantes dessus (fig. 4), plus claires ou un peu glauques au revers (fig. 5). Les stipules, longtemps persistantes, sont arrondies.
- Les fleurs, protégées par une écaille jaunâtre non barbue, sont rassemblées en chatons grêles et allongés, dressés à étalés et portés par un pédoncule feuillé. Les fleurs mâles sont composées de 3 étamines libres (fig. 6). Les fleurs femelles sont constituées d'une capsule glabre longue de 4 à 6 mm surmontée d'un style court (fig. 7).
- La floraison a lieu de mars à juin, avant ou pendant la feuillaison.



Fig. 1 - Port en cépées denses.



Fig. 2 - Rameau de l'année brun chocolat, cannelé au sommet.



Fig. 3 - Bourgeons appliqués et rameau présentant des plaques décolorées blanchâtres.



Fig. 4 - Feuille vert foncé et luisante dessus.



Fig. 5 - Feuille vert clair à glauque au revers.

- Deux sous-espèces sont décrites à ce jour :
 - subsp. **discolor** aux feuilles blanchâtres ou glauques dessous ;
 - subsp. **triandra** aux feuilles vert pâle dessous.
- Le saule à trois étamines peut être confondu avec le saule faux daphné (*S. daphnoides*), aux rameaux de l'année non cannelés à leur extrémité et aux fleurs mâles composées de seulement 2 étamines. Il peut également être confondu avec le saule laurier (*S. pentandra*), aux feuilles visqueuses odorantes à l'état jeune et aux bourgeons foliaires à apex non appliqué sur les rameaux.

Distribution et vulnérabilité

Le saule à trois étamines est une espèce eurasiatique assez largement répandue sur le territoire franco-suisse. Il est commun dans les Alpes du Nord, notamment aux abords des vallées préalpines.

La distribution des deux sous-espèces (non distinguées en Suisse) n'est pas encore totalement connue.

Écologie

- Le saule à trois étamines est une espèce pionnière formant des saulaies arbustives aux abords des cours d'eau. Régulièrement associé au saule blanc (*S. alba*) à basse altitude, il s'efface petit à petit au profit de ce dernier dans les formations forestières.
- Il croît sur des matériaux alluvionnaires plutôt fins (argiles, limons, sables), généralement calcaires, neutres à basiques, plus ou moins riches en nutriments et régulièrement inondés (sols frais à humides suivant les fluctuations de la nappe).
- Il présente un optimum écologique au sein des saulaies alluviales sur matériaux fins (*Salicetum triandrae* - fig. 8).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 1 700 m).



Fig. 6 - Chaton mâle grêle et allongé.



Fig. 7 - Chaton femelle lâche, porté par un pédoncule feuillé.

Utilisation en génie végétal

Le saule à trois étamines est une espèce régulièrement utilisée en génie végétal, notamment pour la stabilisation des berges des cours d'eau de basse altitude. Il offre également de nombreuses potentialités pour une utilisation en rivière de montagne.

Dotée d'un fort pouvoir de régénération (rejets de souche) et d'une croissance juvénile rapide, cette espèce vigoureuse couvre et protège rapidement le sol. Avec son port buissonnant dépassant rarement 5 m de haut et sa tolérance à la submersion, elle est particulièrement adaptée pour être implantée en pied de berge. Dans ces conditions, la fragilité de ses rameaux favorise un recépage permanent sans diminuer la vitalité des plants, induisant ainsi la formation de buissons denses permettant de dissiper l'énergie du courant et de piéger les sédiments fins. Dotée d'une forte capacité d'évapotranspiration (Zouaoui 2011), elle est également adaptée pour drainer les berges et talus soumis à des infiltrations d'eau.

Compte tenu de son écologie, il est déconseillé de l'implanter sur des substrats grossiers drainants, dans des conditions d'ombrage trop important (vallées encaissées, pentes fortement boisées, végétation arborée dense) ou à des altitudes supérieures à 1 500 m. Elle tolère toutefois relativement bien l'acidité du sol et peut être utilisée sur des substrats siliceux, pour peu que ceux-ci soient suffisamment riches en matériaux fins (Hytonen et Saarsalmi 2009).



Fig. 8 - Situation typique en contexte alluvial sur matériaux fins (*Salicetum triandrae*).

Étant donné la taille de ses rameaux et son taux de reprise élevé au bouturage (supérieur à 70 % quelles que soient les conditions), cette espèce peut être utilisée sous forme de boutures, de plançons ou de ramilles. Elle peut ainsi facilement être intégrée dans un grand nombre d'ouvrages de génie végétal (lits de plants et plançons, caissons en rondins végétalisés, fascines de saules, couches de branches à rejets, bouturage). Ses branches cassantes limitent toutefois son utilisation pour certaines techniques, notamment le tressage. Développant un système racinaire plutôt superficiel (rapp. vol. syst. sout./aérien = 0,4), elle devra être associée à d'autres saules buissonnants ou arbustifs à système racinaire plus profond comme les saules pourpre (*Salix purpurea*) ou noirissant (*S. myrsinifolia*). Il est aussi intéressant de noter que cette espèce

tolère bien les tailles d'entretien (recépage, création de saules têtards) et l'abrutissement, notamment par le castor.

Le saule à trois étamines est disponible dans le commerce. Compte tenu de la présence de nombreux cultivars ornementaux (« *Black Hollandens* », « *Light Franck* », « *Noire de Villaine* », etc.), une attention particulière devra être portée à la provenance des plants. Étant donné sa relative abondance aux abords de certains cours d'eau, il est préférable de se procurer le matériel végétal à proximité des chantiers (boutures), garantissant alors l'utilisation de souches locales.

Le saule à trois étamines bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale ou partielle).

Sambucus racemosa L.

Sureau à grappes

Caprifoliacées

Description

- Le sureau à grappes est un arbrisseau caducifolié mesurant de 1 à 4 m de haut et produisant des cépées assez denses (fig. 1).
- Les branches sont dressées et arquées. L'écorce, grise, est pourvue de nombreuses lenticelles verruqueuses (fig. 2). Les jeunes rameaux présentent une moelle orangée à brunâtre (fig. 3).
- Les bourgeons, ovales ou cylindriques, opposés, sont munis de plus de 4 écailles jaunâtres à violacées à apex brunâtre à noirâtre (fig. 4).
- Les feuilles, opposées, imparipennées, sont composées de 5 à 9 folioles ovales à lancéolées, dentées et sessiles (fig. 5).
- Les fleurs, jaunâtres, sont disposées en panicules denses et dressées, longues de 3 à 8 cm (fig. 6).
- Les fruits sont des baies globuleuses rouge vif et luisantes, de 4 à 5 mm de diamètre (fig. 7).
- La floraison a lieu d'avril à mai, en même temps que la feuillaison.



Fig. 1 - Port en cépées denses.



Fig. 4 - Bourgeons ovales et opposés.



Fig. 2 - Écorce grise pourvue de nombreuses lenticelles verruqueuses.



Fig. 3 - Moelle orangée.



Fig. 5 - Feuille imparipennée.

- Les sous-espèces **pubens** et **sieboldiana**, absentes des Alpes, ne sont pas présentées dans cet ouvrage.
- Le sureau noir (*Sambucus nigra*) se distingue du sureau à grappes par sa taille, pouvant atteindre 7 m, la couleur blanche de sa moelle, la forme et la couleur de son inflorescence (une panicule corymbiforme de fleurs blanches) et la couleur noire de ses fruits.

Distribution et vulnérabilité

Le sureau à grappes est une espèce européenne présente dans toute la Suisse et dans une large moitié est de la France.

Elle est commune dans les forêts de montagne et les recrus forestiers du Nord des Alpes.

Écologie

- Le sureau à grappes est une espèce de demi-ombre ou de pleine lumière des boisements clairs, haies, fourrés, clairières, accrus et recrus forestiers.
- Il croît généralement sur des sols assez profonds, riches en matériaux fins (argiles et limons purs ou caillouteux, parfois aussi sur blocs – fig. 8) et en éléments nutritifs, modérément secs à frais et à pH très variable.
- Il présente un optimum écologique dans les groupements arbustifs mésophiles préforestiers (*Sambuco-Salicion*), notamment sur sols argileux frais à l'étage montagnard (*Sambucetum racemosae*).
- Il se développe aux étages montagnard et subalpin avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Inflorescence en panicule dense, dressée.



Fig. 7 - Baies rouges, globuleuses.

Utilisation en génie végétal

Contrairement au sureau noir, le sureau à grappes est encore assez peu utilisé dans le domaine de l'aménagement. Il présente toutefois de nombreuses potentialités en génie végétal.

Doté d'une large amplitude écologique, il peut être utilisé sur différents types de substrats, pour peu qu'ils soient suffisamment riches en particules fines, et dans diverses conditions d'ensoleillement, de 800 à 2 000 m. Cette espèce supporte toutefois mal les inondations prolongées et les sols trop grossiers. Elle ne devra donc pas être implantée en pied de berge et devra être privilégiée pour la stabilisation de substrats argilo-limoneux.

Les tiges ne dépassant pas 4 m de hauteur, leur densité et leur souplesse lui permettent de se développer sur des pentes raides et instables soumises à des glissements de terrain ou à des chutes de pierres. Il offre aussi une forte tolérance à l'ensevelissement et produit, dans ce cas, des racines adventives utiles pour fixer les couches superficielles du sol.



Fig. 8 - Situation sur blocs calcaires.

L'intégration de cette espèce mellifère ayant une floraison et une fructification particulièrement abondante permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique d'un aménagement (plante-hôte d'un nombre important d'insectes et « garde-manger » pour beaucoup d'autres animaux).

Le sureau à grappes présente un très faible taux de reprise en bouturage de branches. Il est cependant possible de procéder au bouturage des racines qui présente de bons résultats. Il peut également être implanté sous forme de graines, cette méthode offrant une meilleure capacité de développement que les transplants (très forte croissance les premières années). Cette technique offre l'avantage de garantir l'utilisation de souches locales favorisant la rapidité d'établissement. Elle reste toutefois peu applicable en génie végétal (à expérimenter éventuellement en combinaison avec un ensemencement). Disponible dans de nombreuses pépinières, les plants à racines nues devront ainsi être privilégiés. Étant donné l'existence de nombreux cultivars ornementaux dans le commerce (« *Plumosa Aurea* », « *Sutherland Gold* », etc.), une attention particulière devra être portée à l'utilisation de plants indigènes.

Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés, du milieu jusqu'au sommet de la berge. Il pourra notamment être associé au saule marsault (*Salix caprea*), au bouleau pendan (*Betula pendula*), au noisetier (*Corylus avellana*), au peuplier tremble (*Populus tremula*) ou encore au sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

Sorbus aucuparia L.

Sorbier des oiseleurs

Rosacées

Description

- Le sorbier des oiseleurs est un arbuste ou un arbre caducifolié au tronc généralement assez court atteignant 20 m de haut (fig. 1).
- L'écorce, d'abord gris clair puis gris noirâtre (fig. 2), se fissure longitudinalement avec l'âge. Les jeunes rameaux, brun rougeâtre à violacés, lisses et luisants, sont couverts de lenticelles blanches.
- Les bourgeons, fusiformes, sont munis d'écailles brun noirâtre nettement velues (longs poils blancs appliqués – fig. 3) à glabrescentes. Ils mesurent de 3 à 10 mm.
- Les feuilles, alternes, imparipennées, sont composées de 9 à 19 folioles oblongues à elliptiques, denticulées, vert foncé au-dessus, plus claires au revers et longues de 2,5 à 6,5 cm. D'abord pubescentes, elles deviennent glabrescentes et parfois luisantes (fig. 4).
- Les fleurs, blanches et petites, aux pétales longs de 4 à 5 mm, sont rassemblées en panicule corymbiforme (fig. 5).
- Les fruits (appelés sorbes) sont petits (de 5 à 10 mm de diamètre), globuleux, rouge vif à orangés (fig. 6). Ils persistent généralement durant l'hiver.
- La floraison a lieu de mai à juin.
- Deux sous-espèces sont actuellement connues dans les Alpes :
 - subsp. *aucuparia* (décrite ci-dessus).



Fig. 4 - Feuille imparipennée.



Fig. 5 - Inflorescence en panicule corymbiforme.



Fig. 1 - Port dressé.



Fig. 2 - Écorce gris clair devenant gris noirâtre.



Fig. 3 - Bourgeon fusiforme nettement velu.

- subsp. *glabrata* se distinguant du type par sa taille ne dépassant pas 3 m de haut et par ses pédoncules floraux glabres.
- Les sous-espèces *fenekiana*, *praemorsa* et *sibirica*, absentes des Alpes, ne sont pas présentées ici.
- Le sorbier domestique (*S. domestica*) se distingue du sorbier des oiseleurs par ses bourgeons glabrescents et visqueux et ses folioles essentiellement denticulées dans la partie supérieure.

Distribution et vulnérabilité

Le sorbier des oiseleurs est une espèce eurasiatique présente dans une large partie du territoire franco-suisse. Elle est très commune dans les montagnes des Alpes du Nord, plus disséminée et souvent plantée en plaine.

La sous-espèce *glabrata*, d'affinité boréale, semble présente principalement dans le Nord de l'Europe, les Alpes et le Jura (sa distribution est à préciser).

Écologie

- Le sorbier des oiseleurs est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre à très large amplitude, exigeant toutefois une forte humidité atmosphérique. Il se rencontre dans divers types de boisements, fourrés et accrus forestiers montagnards.
- En montagne, il se développe indifféremment sur divers types de substrats : fins ou grossiers, acides ou basiques, secs à humides. En plaine, il croît préférentiellement sur des substrats acides généralement sablo-limoneux.
- Il présente un optimum écologique dans les groupements arbustifs mésophiles préforestiers (*Sambuco-Salicion*), notamment sur roche mère silicatée au sol acide et pauvre en nutriments à l'étage montagnard supérieur (*Piceo-Sorbetum aucupariae* – fig. 7).
- Il est présent de l'étage montagnard à l'étage subalpin inférieur (jusqu'à 2 000 m).



Fig. 6 - Fruits (sorbes) globuleux, rouge vif à orangés.

Utilisation en génie végétal

Le sorbier des oiseleurs est une espèce encore assez peu utilisée dans le domaine de l'aménagement, mise à part en plantations ornementales.

Dotée d'une très large amplitude écologique et de fortes résistances au froid et à la sécheresse, cette espèce rustique peut être utilisée sur différents types de substrats et dans diverses conditions d'ensoleillement, aux étages montagnard et subalpin (Vogt 2001). Elle offre aussi une forte tolérance à l'ensevelissement et produit, dans ce cas, des racines adventives permettant de fixer les couches superficielles du sol. Les blessures engendrées par des chocs sur son tronc favorisent également la production de rejets de souche et la constitution de cépées denses.



Fig. 7 - Situation typique au sein d'un groupement préforestier acidophile (*Piceo-Sorbetum aucupariae*).

Elle est ainsi particulièrement adaptée pour la stabilisation des berges inclinées soumises à des mouvements de terrain réguliers. Son système racinaire assez superficiel et son port arboré atteignant 15 à 20 m empêchent toutefois une utilisation sur pentes trop fortes (effet « bras de levier »). Enfin, la rigidité de son tronc peut provoquer des remous importants en cas de crue ce qui ne la prédispose pas à une utilisation en pied de berge. L'intégration de cette plante mellifère ayant une floraison et une fructification particulièrement abondantes permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique d'un aménagement (baies constituant un « garde-manger » pour de nombreux oiseaux durant une bonne partie de l'hiver). Il est important de noter qu'il constitue un hôte intermédiaire du feu bactérien, maladie des arbres fruitiers à pépins (rosacées principalement). Il est donc déconseillé de l'implanter à proximité de vergers.

Le sorbier des oiseleurs présente un très faible taux de reprise au bouturage. L'utilisation de plants à racines nues devra ainsi être privilégiée dans les aménagements (espèce facilement disponible dans de nombreuses pépinières). Etant donné l'existence de nombreux cultivars ornementaux dans le commerce (« *Cardinal Royal* », « *Skybound* », « *Sheerwater seedling* », « *Edulis* », etc.), une attention particulière devra être portée à l'utilisation de plants indigènes. Il peut aussi être implanté sous forme de graines, cette méthode offrant d'ailleurs une meilleure capacité de développement que les transplants avec une très forte croissance les premières années. Cette technique permet de garantir l'utilisation de souches locales adaptées aux conditions du milieu, même lorsque les populations locales sont peu importantes. Elle reste toutefois peu applicable en génie végétal (à expérimenter éventuellement en combinaison avec un ensemencement). Sa capacité à produire des racines adventives permet de l'intégrer dans les lits de plants et plançons ou les caissons en rondins végétalisés (Florineth *et al.* 2002), du milieu jusqu'en sommet de berge, en association notamment avec le saule marsault (*Salix caprea*), le bouleau pendant (*Betula pendula*), le noisetier (*Corylus avellana*), le peuplier tremble (*Populus tremula*), le sorbier de Mougeot (*Sorbus mougeotii*) ou le sureau à grappes (*Sambucus racemosa*) avec lesquels il se retrouve fréquemment en milieu naturel.

La production et la commercialisation de plants de sorbier des oiseleurs à des fins forestières sont soumises à une réglementation spécifique en Suisse (chap. III.3.2.4).

Sorbus mougeotii Soy.-Will. et Godr. Alisier de Mougeot

Rosacées

Description

- L'alisier de Mougeot est un arbuste ou arbre caducifolié pouvant atteindre 20 m de haut (fig. 1).
- Les jeunes rameaux, d'abord brun rougeâtre, deviennent brun foncé puis gris-noir (fig. 2). Ils sont plus ou moins velus et couverts de lenticelles blanches allongées (fig. 3).
- Les bourgeons, ovoïdes, sont pourvus d'écaillés vertes à rougeâtres montrant une marge brunâtre velue aranéuse (fig. 2 et 3).
- Les feuilles, longues de 6 à 10 cm et larges de 2,5 à 6 cm, sont ovales à elliptiques, incisées-lobées, les plus grands lobes étant situés dans la partie médiane de la feuille (fig. 4). Elles sont vertes dessus, blanc grisâtre et tomenteuses au revers (fig. 5).
- Les fleurs, blanches, à pétales étalés longs de 5 à 7 mm, sont disposées en panicules corymbiformes contractées (fig. 6).
- Les fruits, longs de 6 à 12 mm, sont ovoïdes à subglobuleux, rouges à orangés, un peu verruqueux (fig. 7).
- La floraison a lieu de mai à juin.
- L'alisier de Mougeot semble être un hybride fixé entre *S. torminalis* et *S. aria*. Il peut s'hybrider à son tour avec d'autres espèces du genre *Sorbus*.



Fig. 1 - Port arbustif.



Fig. 2 - Jeune rameau brun rougeâtre devenant gris-noir.



Fig. 3 - Bourgeon ovoïde pourvu d'écaillés velues aranéuses.



Fig. 4 - Feuille blanc grisâtre et tomenteuse au revers.



Fig. 5 - Feuille ovale à elliptique, incisée-lobée.

- L'alisier blanc (*S. aria*) se distingue de l'alisier de Mougeot par ses jeunes rameaux aranéux à tomenteux et ses feuilles tout au plus doublement denticulées, les plus grandes dents étant situées dans le tiers supérieur de la feuille.

Distribution et vulnérabilité

L'alisier de Mougeot est une espèce montagnarde sud-ouest-européenne, présente des Pyrénées aux Alpes centrales (Ouest de l'Autriche).

Elle est dispersée sur l'ensemble du territoire franco-suisse, et assez commune dans les Pyrénées, les Vosges, le Jura et les Alpes occidentales. Elle est plus rare dans les Alpes centrales et méridionales (Tessin, Grisons, Alpes-de-Haute-Provence et Alpes-Maritimes).

Écologie

- L'alisier de Mougeot est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre des brousses, forêts claires et fourrés montagnards (hêtraies, pessières, pinèdes).
- Il croît sur des sols généralement assez secs et peu profonds, argileux à rocheux (pierriers, éboulis, corniches rocheuses), plus ou moins pauvres en éléments nutritifs, basiques à acides.
- Il présente un optimum écologique au sein des groupements arbustifs acidophiles préforestiers à l'étage montagnard supérieur (*Piceo-Sorbetum* – fig. 8).
- Il croît de l'étage collinéen supérieur à l'étage subalpin inférieur (de 400 à 1 900 m) avec un optimum à l'étage montagnard supérieur.



Fig. 6 - Inflorescence en panicule corymbiforme.



Fig. 7 - Baies ovoïdes, rouges à orangées.

Utilisation en génie végétal

L'alisier de Mougeot est une espèce encore assez peu utilisée dans le domaine de l'aménagement, mise à part ponctuellement en plantations ornementales.

Dotée d'une large amplitude écologique et d'une forte résistance à la sécheresse, cette espèce rustique peut être utilisée sur différents types de matériaux, y compris des substrats bruts très drainants, et dans diverses conditions d'ensoleillement, aux étages montagnard et subalpin. Les lésions engendrées par des chocs sur son tronc favorisent la production de rejets de souche et la constitution de cépées denses. Elle est ainsi particulièrement adaptée pour la stabilisation des berges inclinées soumises à des mouvements de terrain réguliers. Son port arboré, pouvant atteindre 20 m de hauteur, et son système racinaire assez superficiel empêchent toutefois une utilisation en pied de berge pour des raisons de stabilité.

L'intégration de cette espèce mellifère ayant une floraison et une fructification particulièrement abondante, ainsi qu'un feuillage argenté, permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique d'un aménagement (baies constituant un « garde-manger » pour de nombreux oiseaux). Toutefois, tout comme le sorbier des oiseleurs, il constitue un hôte intermédiaire du feu bactérien, maladie des arbres fruitiers à pépins (rosacées principalement). Il est donc déconseillé de l'implanter à proximité de vergers.



Fig. 8 - Situation typique en groupement préforestier montagnard.

Comme la majorité des espèces du genre *Sorbus*, l'alisier de Mougeot présente un très faible taux de reprise au bouturage. L'utilisation de plants à racines nues devra ainsi être privilégiée dans les aménagements. Il peut aussi être implanté sous forme de graines, cette technique offrant d'ailleurs une meilleure capacité de développement que les transplants (très forte croissance les premières années). Elle permet de garantir l'utilisation de souches locales adaptées aux conditions du milieu, même lorsque les populations locales sont peu importantes. Elle reste toutefois peu applicable en génie végétal.

Contrairement au sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*) et à l'instar de l'alisier blanc (*Sorbus aria*), sa faible capacité à produire des racines adventives le rend moins adapté pour une intégration

dans des lits de plants et plançons ou des caissons en rondins végétalisés. Il pourra toutefois être implanté en faible densité dans ce type d'ouvrages, en association avec des espèces plus adaptées pour ces techniques comme l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), l'aulne blanc (*Alnus incana*), le bouleau pendant (*Betula pendula*), le frêne commun (*Fraxinus excelsior*), le noisetier (*Corylus avellana*), le saule appendiculé (*Salix appendiculata*), le sorbier des oiseleurs ou encore la viorne lantane (*Viburnum lantana*), du milieu jusqu'en sommet de berge. Il est disponible dans certaines pépinières (attention à privilégier l'utilisation de souches locales indigènes).

Trifolium badium Schreb.

Trèfle brun

Fabacées

Description

- Le trèfle brun est une espèce vivace mesurant de 10 à 25 cm de haut (fig. 1).
- La souche donne naissance à des rosettes de feuilles et à des tiges florifères dressées ou ascendantes, non ou peu rameuses (parfois une inflorescence axillaire sommitale – fig. 2), couvertes de poils appliqués au sommet (fig. 3).
- Les feuilles supérieures sont opposées et munies de stipules ovales à triangulaires (fig. 3). Elles sont composées de 3 folioles sessiles finement dentées, elliptiques à obovales (fig. 4), tronquées ou échancrées au sommet, atteignant 2 cm de long (fig. 5).
- Les fleurs, d'abord jaune doré et dressées, sont réfractées et brunâtres après floraison (fig. 6). Elles sont longues de 5 à 10 mm et rassemblées en une inflorescence globuleuse compacte. Celle-ci est portée par un long pédoncule égalant ou dépassant les feuilles correspondantes. Le calice est pourvu de dents inégales ciliées.
- La floraison a lieu de juillet à août.



Fig. 4 - Feuille composée de 3 folioles sessiles.



Fig. 5 - Foliole finement dentée, tronquée ou échancrée au sommet.



Fig. 1 - Port présentant des tiges ascendantes.



Fig. 2 - Tige florifère dressée, peu rameuse.



Fig. 3 - Feuilles supérieures opposées, munies de stipules triangulaires.

- Le trèfle brun peut être confondu avec le trèfle doré (*T. aureum*) aux tiges ramifiées, présentant souvent de nombreuses inflorescences axillaires, plus ou moins flexueuses à l'extrémité et aux folioles terminales pétiolulées. Le trèfle marron (*T. spadiceum*) s'en distingue par ses tiges dressées, souvent solitaires, et son inflorescence cylindracée devenant noirâtre après floraison.

Distribution et vulnérabilité

Le trèfle brun est une espèce sud-européenne montagnarde présente des Pyrénées aux Carpates. Au sein du territoire franco-suisse, elle est relativement commune dans les Alpes et les Pyrénées, mais reste rare dans le Jura et le Massif central.

Elle est fréquente dans les secteurs supraforestiers des Alpes du Nord.

Écologie

- Le trèfle brun est une espèce de pleine lumière propre aux prairies, pâturages et pelouses fraîches d'altitude ainsi qu'aux abords des sources et torrents de montagne.
- Il croît préférentiellement sur des substrats riches en matériaux fins (argiles ou limons souvent accompagnés de graviers ou cailloux – fig. 7) généralement calcaires, basiques à légèrement acides, modérément secs à frais et assez riches en éléments nutritifs.
- Il présente un optimum écologique dans les pâturages gras subalpins et alpins (*Poion alpinae*) et les pelouses fraîches subalpines et alpines neutrocalci-cales (*Caricion ferrugineae*).
- Il se développe aux étages subalpin et alpin (de 1 400 à 2 800 m) avec un optimum à l'étage subalpin.



Fig. 6 - Fleurs d'abord jaune doré et dressées devenant brunâtres et réfractées après floraison.

Utilisation en génie végétal

Le trèfle brun est encore très peu utilisé en génie végétal, excepté ponctuellement pour la végétalisation de pistes de ski. Il présente toutefois un fort potentiel pour la stabilisation des pentes soumises aux glissements de terrain.

De par son développement rapide, son enracinement profond (système racinaire pivotant allongé) et la forte densité de ses tiges aériennes, cette espèce offre une bonne résistance à la traction et assure une protection rapide des couches superficielles du sol. Comme toutes les fabacées, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique permet d'enrichir rapidement le substrat, favorisant ainsi la croissance des autres plantes.



Fig. 7 - Situation pionnière en terrasse alluviale sur matériaux grossiers.

Il convient ainsi parfaitement en association avec des graminées au système racinaire fasciculé, telles que le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), la fléole des Alpes rhétiques (*Phleum alpinum* subsp. *rhaeticum*), la fétuque noirâtre (*Festuca nigrescens*) ou encore la calamagrostide bigarrée (*Calamagrostis varia*), avec lesquelles il assure une complémentarité à l'enracinement et à la couverture végétale.

Sa large amplitude altitudinale, sa tolérance au froid et à la sécheresse sont des arguments de choix pour une utilisation en rivière de montagne, notamment sur des substrats pauvres en matière organique (calcaires ou siliceux), jusqu'à 2 800 m d'altitude. Ses fleurs jaunes très attractives pour les insectes permettent aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements.

Cette espèce n'est pas encore facilement disponible dans le commerce (elle est présente dans certains catalogues grainiers avec des provenances diverses et souvent incertaines). Certaines études ont montré que, malgré le mécanisme de dormance induit par leur tégument, les graines présentaient un fort taux de germination après traitement (75 % après scarification – Dinger 1997). La culture de cette espèce à des fins de production de semences semble toutefois difficile en raison des faibles rendements et des problèmes de compétitivité (Krautzer *et al.* 2005). Il convient donc de poursuivre ces expérimentations afin de mettre à disposition des semences sur le marché.

Trifolium montanum L.

Trèfle des montagnes

Fabacées

Description

- Le trèfle des montagnes est une espèce vivace mesurant de 15 à 50 cm de haut (fig. 1).
- La souche, épaisse et pivotante (fig. 2), donne naissance à des tiges ascendantes à dressées, couvertes de poils blanchâtres (fig. 3).
- Les feuilles, alternes et longuement pétiolées, sont composées de 3 folioles ovales, oblongues ou elliptiques, à bords denticulés (fig. 4). Elles sont glabres sur la face supérieure et couvertes de poils appliqués au revers. Les stipules, lancéolées à triangulaires, sont soudées à la base (fig. 3).
- Les fleurs, blanches (fig. 5), sont munies d'un pédicelle beaucoup plus court que le tube du calice, réfléchi après floraison (fig. 6). Elles sont rassemblées en inflorescences terminales ou axillaires denses, globuleuses à cylindracées, longues de 1 à 1,5 cm.
- La floraison a lieu de mai à septembre.



Fig. 4 - Feuille composée de 3 folioles denticulées.



Fig. 5 - Fleurs blanches rassemblées en inflorescence dense.



Fig. 1 - Port dressé.



Fig. 2 - Souche épaisse et pivotante.



Fig. 3 - Tige dressée couverte de poils blanchâtres et stipules triangulaires soudées à la base.

- Trois sous-espèces sont actuellement décrites (subsp. **gayanum**, subsp. **montanum** et subsp. **rupestre**), mais seul le type est présent dans les Alpes du Nord.
- Le trèfle des montagnes se distingue du trèfle hybride (*T. hybridum*) et du trèfle pâlisant (*T. pallescens*) par ses tiges couvertes de poils appliqués, ses feuilles pubescentes inférieurement et ses fleurs brièvement pédicellées. Le trèfle beige (*T. ochroleucon*) présente, quant à lui, des fleurs jaunâtres.

Distribution et vulnérabilité

Le trèfle des montagnes est une espèce eurasiatique (Europe et Asie occidentale). Elle est présente dans une large moitié est de la France, y compris dans les Pyrénées, et dans presque toute la Suisse.

Elle est commune dans les Alpes du Nord.

Écologie

- Le trèfle des montagnes est une espèce de pleine lumière ou de demi-ombre des prairies maigres (fig. 7) et boisements clairs plutôt secs (chênaies pubescentes, pinèdes, etc.).
- Il croît sur des substrats plutôt fins (argiles, limons), plus ou moins pauvres en éléments nutritifs, basiques à légèrement acides, à forts contrastes hydriques (alternance de phases d'engorgement et de dessiccation).
- Il présente un optimum écologique au sein des prairies maigres mésophiles (*Brometalia erecti*) et des pelouses montagnardes neutrocalcicoles (*Agrostio-Seslerion*), voir acidophiles (*Festucion variae*).
- Il se développe de l'étage collinéen à l'étage subalpin avec un optimum à l'étage montagnard.



Fig. 6 - Fleurs réfléchies après floraison.

Utilisation en génie végétal

Le trèfle des montagnes est encore très peu utilisé en aménagement, excepté ponctuellement pour la restauration de pelouses. Il présente toutefois un fort potentiel pour la stabilisation des pentes soumises aux risques d'érosion et de glissement de terrain.

Sa large amplitude altitudinale, sa tolérance au froid et à la sécheresse en font une espèce particulièrement adaptée pour la stabilisation des talus et berges des rivières de montagne, notamment sur des substrats calcaires ou siliceux pauvres en matière organique, jusqu'à 2 200 m d'altitude.

De par son développement rapide et son enracinement profond, cette espèce offre une bonne résistance à la traction et assure une protection rapide des couches superficielles du sol. Comme toutes les fabacées, sa capacité à fixer l'azote atmosphérique permet d'enrichir rapidement le substrat.



Fig. 7 - Situation typique en prairie maigre, en compagnie notamment de *Bromus erectus* et *Brachypodium rupestre*.

De par ses fleurs mellifères attractives pour les insectes, son intégration dans les ouvrages permet aussi d'améliorer la qualité paysagère et écologique des aménagements.

Il convient ainsi parfaitement en association avec des graminées au système racinaire fasciculé telles que le brome érigé (*Bromus erectus*), la séslerie bleuâtre (*Sesleria caerulea*) ou le brachypode des rochers (*Brachypodium rupestre* – fig. 7) dont il favorise la croissance et assure une complémentarité à l'enracinement et à la couverture végétale. Son port dressé et son système racinaire pivotant (fig. 2) assurent aussi une bonne complémentarité avec d'autres fabacées comme le sainfoin (*Onobrychis vicifolia*), le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) ou l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*) avec lesquels il s'observe régulièrement en milieu naturel.

Cette espèce est difficilement disponible dans le commerce (elle est présente dans certains catalogues grainiers avec des provenances diverses et souvent incertaines).

Le trèfle des montagnes bénéficie d'un statut de protection dans certains cantons suisses (protection totale dans le canton d'Argovie).

Trisetum flavescens

(L.) P. Beauv.

Avoine dorée

Poacées

Description

- L'avoine dorée est une espèce vivace mesurant de 30 à 100 cm de haut et formant des touffes lâches (fig. 1).
- Les feuilles, larges de 3 à 10 mm, vert clair, sont velues, planes et finement sillonnées. Les gaines, pubescentes, sont munies de poils dirigés vers le bas (fig. 2) et sont terminées par une ligule denticulée longue d'environ 1 mm (fig. 3).
- L'inflorescence est une panicule lâche et étalée, longue de 5 à 20 cm, composée généralement de plus de 100 fleurs (fig. 4).
- Les épillets, longs de 5 à 8 mm, sont vert jaunâtre à rougeâtres et luisants (fig. 5). La glume inférieure est nettement plus courte que la supérieure. Les glumelles extérieures, carénées, sont munies d'une longue arête dorsale genouillée à maturité (fig. 6).
- La floraison a lieu de mai à août.
- Quatre sous-espèces sont actuellement décrites dont deux sont présentes dans les Alpes du Nord :
 - subsp. **flavescens** aux feuilles larges de moins de 5 mm et aux épillets jaunâtres ;
 - subsp. **purpurascens** aux feuilles mesurant généralement plus de 5 mm de large et aux épillets pourprés.
- Les sous-espèces **burnouffii** et **splendens** sont présentes uniquement en région méditerranéenne.
- L'avoine dorée se distingue des autres espèces du genre *Trisetum* par ses feuilles mesurant plus de 3 mm de large (1 à 3 mm chez *T. alpestre*, *T. distichophyllum* et *T. argenteum*).



Fig. 1 - Port en touffes lâches.



Fig. 2 - Feuille et gaine pubescente.



Fig. 3 - Feuille sillonnée et ligule denticulée.



Fig. 4 - Inflorescence en panicule lâche et étalée.



Fig. 5 - Épillets vert jaunâtre et luisants.

- Elle peut également être confondue avec le fromental (*Arrhenatherum elatius*) aux gaines glabres et aux épillets comprenant seulement 2 fleurs, dont une seule est munie d'une arête.
- Elle peut enfin être confondue avec d'autres avoines (*Avenula spp.* et *Helictotrichon spp.*) dont les épillets mesurent plus de 10 mm.

Distribution et vulnérabilité

L'avoine dorée est largement répandue en France et en Suisse et est très commune dans toutes les Alpes du Nord.

La sous-espèce *flavescens* est présente dans presque toute l'Europe (naturalisée ou subsponnée dans le Nord) et dans le Sud-Ouest de l'Asie. La sous-espèce *purpurascens* est présente des Alpes aux Carpates.

Écologie

- L'avoine dorée est une espèce de pleine lumière à large amplitude se rencontrant dans les prairies mésophiles maigres à grasses.
- La sous-espèce *flavescens* croît préférentiellement sur des sols profonds plus ou moins riches en éléments nutritifs, frais à modérément secs, basiques à acides. La sous-espèce *purpurascens* se développe quant à elle sur des sols généralement calcaires et plus secs.
- La sous-espèce *flavescens* présente un optimum écologique dans les prairies mésophiles de fauche de l'étage collinéen à subalpin (*Arrhenatherion*, *Polygono-Trisetion* – fig. 7).
- La sous-espèce *purpurascens* trouve son optimum au sein des pelouses subalpines calcaires sèches (*Elyno-Seslerietea*).



Fig. 6 - Glumelle extérieure munie d'une longue arête dorsale genouillée à maturité.

Utilisation en génie végétal

L'avoine dorée est déjà largement utilisée en aménagement, notamment pour l'ensemencement des talus routiers, berges de cours d'eau et prairies ornementales.

De par sa bonne capacité de dissémination et sa rapidité de croissance, c'est une graminée essentielle pour l'ensemencement des berges et des talus en montagne. Sa large amplitude écologique autorise une utilisation sur divers types de sols, calcaires ou siliceux, pour peu qu'ils soient composés d'un minimum de terre végétale, de l'étage collinéen à subalpin.



Fig. 7 - Situation typique dans une prairie de fauche montagnarde (*Polygono-Trisetion*).

Son port en touffe lâche et son système racinaire fasciculé lui permettent de stabiliser efficacement les couches supérieures du sol et assurent une bonne complémentarité avec les légumineuses à racines pivotantes comme l'anthyllide vulnérable (*Anthyllis vulneraria*) ou le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*). Elle peut également être associée à d'autres graminées formant des touffes plus denses telles que le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), la féтуque noirâtre (*Festuca nigrescens*) ou la fléole des Alpes rhétiques (*Phleum alpinum* subsp. *rhaeticum*).

Graminée structurante par excellence, dotée d'une forte capacité d'installation, elle peut être incorporée dans de nombreux mélanges grainiers et remplace le fromental pour les ensemencements d'altitude. De par sa forte compétitivité, elle a toutefois tendance à devenir monopolisatrice (fig. 7) et son intégration dans les mélanges ne devra pas dépasser 10 % du poids total de graines afin de garantir l'installation et la pérennité des autres espèces.

Elle est facilement disponible dans le commerce sous forme de graines ou de plants en pots. La sous-espèce *purpurascens* ne semble par contre pas encore cultivée.

La production en vue de la commercialisation de semences d'avoine dorée est soumise à une réglementation spécifique en Europe et en France (chap. I.1.2.1 et III.3.3.4).

4.4. Synthèse : potentiel d'utilisation de différentes espèces ligneuses

4.4.1. Potentiels d'utilisation des saules de montagne

Au regard des caractéristiques biotechniques des différentes espèces présentées, le genre *Salix*, bien connu des ingénieurs biologistes, se distingue des autres ligneux du fait de ses nombreuses potentialités d'utilisation. Le tableau ci-dessous (tab. 1) synthétise les potentiels d'utilisation dans différentes techniques de génie végétal en distinguant les conditions d'utilisation :

- X : espèce adaptée en toutes conditions.
- : espèce non adaptée.
- 1 : espèce bénéficiant d'un taux de reprise relativement faible, à utiliser en mélange avec d'autres espèces en garantissant des conditions optimums de reprise (période, substrat, arrosage, etc.).
- 2 : espèce particulièrement adaptée pour une utilisation sous forme de pieux morts, sous réserve de trouver des segments suffisamment longs et réguliers (≥ 200 cm).
- 3 : espèce adaptée, sous réserve de trouver des segments suffisamment larges, longs et réguliers en quantité suffisante.
- 4 : espèce adaptée, sous réserve de disponibilité en pépinière.
- 5 : espèce aux rameaux fragiles peu favorables au tressage, à utiliser en mélange avec d'autres espèces.

Tab. 1 - Potentiel d'utilisation des saules présentés.

Nom Latin	Nom français	Taux de reprise au bouturage (%) *	Pied de berge		Milieu et haut de berge				Plantation	
			Tressage + fascine		Couches de branches à rejets		Lits de plants et plançons + caisson végétalisé			
			Branches	Pieux ≥ 200 cm	Branches	Pieux ≥ 100 cm	Branches	Plants	Boutures	Plants
<i>Salix appendiculata</i> Vill.	Saule appendiculé	30 - 70	1	2	1	X	1	X	1	X
<i>S. aurita</i> L.	S. à oreillettes	40 - 70	-	-	-	-	1	X	1	X
<i>S. caesia</i> Vill.	S. bleuâtre	~ 50	-	-	-	-	X	4	X	4
<i>S. caprea</i> L.	S. marsault	10 - 40	-	2	-	2	-	X	-	X
<i>S. daphnoides</i> Vill.	S. faux daphné	> 90	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>S. elaeagnos</i> Scop.	S. drapé	70 - 90	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>S. foetida</i> Schleich. ex DC.	S. fétide	~ 50	-	-	3	-	X	4	3	4
<i>S. glaucosericea</i> Flod.	S. glauque	20 - 30	-	-	-	-	1	4	1 ; 3	4
<i>S. hastata</i> L.	S. hasté	60 - 70	-	-	3	-	X	4	3	4
<i>S. helvetica</i> Vill.	S. de Suisse	40 - 80	-	-	3	-	X	4	3	4
<i>S. laggeri</i> Wimm.	S. de Lagger	~ 30	-	-	1	1	1	4	1	4
<i>S. myrsinifolia</i> Salisb.	S. noircissant	70 - 90	X	-	X	3	X	X	X	X
<i>S. pentandra</i> L.	S. laurier	70 - 90	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>S. purpurea</i> L.	S. pourpre	> 90	X	-	X	3	X	X	X	X
<i>S. triandra</i> L.	S. à trois étamines	70 - 90	5	-	X	3	X	X	X	X

* Dans la mesure du possible, le taux de reprise mentionné correspond à des résultats de tests effectués *in situ* (les expérimentations sous abris et/ou avec hormones de croissance n'ont pas été prises en compte). Les écarts importants entre certaines valeurs reflètent les différences enregistrées entre différentes expérimentations. Ils traduisent un taux de reprise inconstant, généralement intimement lié aux conditions de plantation (disponibilité en eau, période de prélèvement et de plantation, type de substrat).

Sources : Schiechl (1973, 1992) et diverses expérimentations effectuées sur le site de Lullier d'après Sartoretti (2009) et Zouaoui (2011).

4.4.2. Potentiel d'utilisation des autres espèces ligneuses présentées

Bien que les saules constituent indéniablement le matériel végétal idéal pour les aménagements, d'autres espèces ligneuses peuvent également être utilisées du fait de leurs caractéristiques biotechniques. Le tableau ci-dessous (tab. 2) synthétise ces différentes caractéristiques :

- X : espèce adaptée en toutes conditions.
- : espèce non adaptée/caractère absent.
- 1 : espèce pouvant former des troncs rigides risquant de créer des turbulences et de produire un effet de bras de levier.
- 2 : enracinement variable selon texture du sol.
- +++ : caractère très marqué.
- ++ : caractère marqué.
- + : caractère peu marqué.
- PB : pied de berge.
- MB : milieu de berge.
- SB : sommet de berge.
- P : plants (en racines nues ou en mottes).
- B : boutures.

Tab. 2 - Potentiel d'utilisation des autres espèces ligneuses.

Nom latin	Nom français	Plantation			Reprise au bouturage	Formation de racines adventives	Capacité à drageonner	Rejets de souche	Racines			Forme courante employée	Etage de végétation
		PB	MB	SB					superficielles	profondes	fixation d'azote atmosphérique		
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	Erable sycomore	1	X	X	-	+	-	+++	++	+	-	P	coll. - subalp. inf.
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	Aulne blanc	1	X	X	-	+++	+++	++	++	2	+	P	coll. - subalp. inf.
<i>Alnus viridis</i> (Chaix) DC.	Aulne vert	X	X	X	-	-	++	+++	++	+	+	P	mont. - subalp.
<i>Berberis vulgaris</i> L.	Epine-vinette	-	-	X	+	++	+++	++	-	+++	-	P, B	coll. - subalp. inf.
<i>Betula pendula</i> Roth	Bouleau pendant	1	X	X	-	++	-	++	++	2	-	P	coll. - subalp. inf.
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Frêne commun	1	X	X	-	+++	++	+++	+++	2	-	P	coll. - mont.
<i>Hippophaë rhamnoides</i> L.	Argousier	X	X	X	+	++	+++	+	++	-	+	P	coll. - subalp. inf.
<i>Laburnum alpinum</i> (Mill.) Bercht. et J. Presl	Cytise des Alpes	-	X	X	++	+++	-	++	++	+++	+	P, B	coll. - subalp. inf.
<i>Myricaria germanica</i> (L.) Desv.	Myricaire	X	-	-	+++	+++	-	++	++	++	-	B	coll. - subalp.
<i>Prunus padus</i> L.	Merisier à grappes	X	X	X	-	+++	+++	+++	++	+	-	P	mont. - subalp. inf.
<i>Ribes alpinum</i> L.	Groseillier des Alpes	-	X	X	-	-	-	++	++	-	-	P	coll. - subalp.
<i>Rosa pendulina</i> L.	Rosier des Alpes	X	X	X	-	+++	++	++	++	-	-	P	mont. - subalp.
<i>Sambucus racemosa</i> L.	Sureau à grappes	X	X	X	-	+++	++	+++	++	+	-	P	mont. - subalp.
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	Sorbier des oiseleurs	1	X	X	-	+++	-	++	++	+	-	P	mont. - subalp. inf.
<i>Sorbus mougeotii</i> Soyier-Will. et Godron	Alisier de Mougeot	-	X	X	-	-	-	+++	++	-	-	P	coll. sup. - subalp. inf.

Sources : Florineth (2004), Kutschera et Lichtenegger (2002), Schiechl (1973, 1992).

5. Autres espèces utilisables

Outre les cinquante espèces décrites dans cet ouvrage, de nombreuses autres présentent des potentialités biotechniques pour le génie végétal. Si les espèces ligneuses sont généralement bien connues des pépiniéristes et des aménageurs, les espèces herbacées le sont beaucoup moins. Historiquement, la majorité des espèces herbacées utilisées dans les aménagements correspondent à des essences pastorales reconnues par les agronomes pour leurs propriétés fourragères ou pour l'importance de leur biomasse au sein des écosystèmes prairiaux. Pourtant, prairies et pelouses ne sont pas les seuls écosystèmes riches d'espèces à fort potentiel.

5.1. Des espèces herbacées à fort potentiel

Structurantes de mégaphorbiaies, de communautés alluviales (chap. III.2.) ou morainiques, de nombreuses espèces alpines sont potentiellement adaptées pour le génie végétal, bien qu'actuellement sous-exploitées dans ce domaine. De par leurs caractéristiques biologiques, écologiques et leurs aptitudes biotechniques, ces espèces répondent aux critères de choix présentés au chapitre III.3. Elles présentent en outre de nombreuses possibilités d'implantation et sont souvent faciles d'approvisionnement.

5.1.1. Des caractéristiques biologiques et une stratégie écologique adaptées

La plupart des espèces montagnardes et subalpines potentiellement utilisables en génie végétal présentent une stratégie écologique pionnière, rudérale ou rudérale-compétitrice, marquée par une forte aptitude à la multiplication végétative (notamment de leurs rhizomes – fig. 1a) et la production de nombreuses diaspores trichométéochores par voie sexuée (akènes ou graines – fig. 1b).

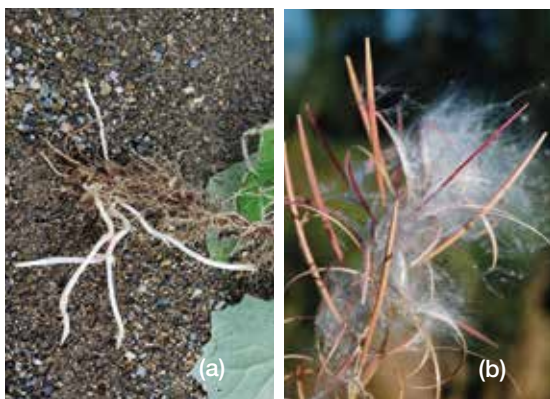


Fig. 1 - Une stratégie écologique rudérale caractérisée par une forte capacité de colonisation : (a) production de rhizomes chez le tussilage (*Tussilago farfara*) ; (b) production de nombreuses graines trichométéochores chez l'épilobe à feuilles étroites (*Epilobium angustifolium*).

Ces deux attributs leur procurent une forte aptitude à la dispersion et à la colonisation de nouveaux sites. Cette dispersion peut être assurée par deux vecteurs différents : l'eau, transportant de manière unidirectionnelle des fragments de rhizomes, éventuellement des graines ou des akènes, et le vent, assurant le transport non orienté des diaspores aériennes à des distances dépassant régulièrement 10 m et pouvant atteindre 100 m en secteur ouvert (Vittoz et Engler 2007).

L'anémochorie est la dispersion aérienne de diaspores (fruits ou graines).

La dispersion trichométéochore est un cas particulier d'anémochorie pour les fruits secs ou les graines munis d'une aigrette de soies (ou pappus) augmentant leur surface portante (fig. 1b). C'est par exemple le cas chez le tussilage dont un pied peut produire de 1 000 à 10 000 graines.

La barochorie est la dispersion de diaspores par la gravité.

5.1.2. Des aptitudes biotechniques particulières

Les espèces rudérales sont, en règle générale, caractérisées par une croissance rapide et, pour les espèces vivaces, la présence de rhizomes. Ces derniers, se multipliant de manière horizontale (développement plagiotrope), produisent ensuite des racines secondaires plus ou moins nombreuses selon les espèces, favorisant ainsi la stabilisation des horizons superficiels du sol en assurant la cohésion des matériaux. En surface, la couverture foliaire parfois très importante (atteignant deux à trois fois la surface de sol correspondante, soit 2 à 3 m² pour 1 m² de surface de sol) limite l'érosion des particules fines lors d'épisodes orageux ou de crues. De par sa densité, elle dissipe également l'énergie du courant et induit un effet de peigne favorisant le dépôt de particules fines ou de débris végétaux, facilitant indirectement l'implantation d'espèces végétales mésophiles à hygrophiles.

5.1.3. De nombreuses possibilités d'implantation

Si ces végétaux pionniers peuvent s'installer spontanément sur des terrains fraîchement remaniés (consécutivement à une crue, un glissement de terrain ou un aménagement), il peut être opportun, lors de la réalisation d'un ouvrage de génie végétal, de ne pas s'en remettre uniquement à l'aléa de la colonisation spontanée et de garantir une couverture végétale du sol immédiatement après travaux.

Au vu de la morphologie et de la stratégie écologique de ces espèces, la mise en place de fragments de rhizomes ou de mottes semble être particulièrement adaptée. Néanmoins, pour quelques espèces présentant des taux de germination élevés, l'utilisation de semences peut s'avérer opportune. Il est ainsi envisageable de disposer des inflorescences matures à la surface du sol et de les recouvrir d'une fine couche de paille, de terre, de sable ou d'un géotextile biodégradable (type treillis de coco). Le semis apparaît aussi incontournable pour certaines ombellifères et certains trèfles de petite taille. Dans la mesure où la plupart de ces espèces ne sont encore pas ou peu utilisées, les techniques d'implantation demeurent dans plusieurs cas à expérimenter.

5.1.4. Des facilités d'approvisionnement

Généralement répandus dans les Alpes et constituant souvent des populations importantes, ces taxons ne devraient pas poser de problèmes en terme d'approvisionnement. Celui-ci pourrait s'effectuer soit directement à partir de populations naturelles (collecte d'inflorescences, de fragments de rhizomes, division de touffes, etc.), soit à partir de pépinières spécialisées qui pourraient assurer leur multiplication (plants en mottes, semis, etc.).

5.2. Pétasites, tussilage et adénostyles : des composées à larges feuilles

5.2.1. Les pétasites (*Petasites spp.*)

Les pétasites sont des espèces montagnardes à subalpines à floraison précoce précédant l'apparition de leurs feuilles (fig. 2). Les panicules contractées de capitules blancs à rosés sont parfois visibles dès fin février jusqu'en mai. Ils sont pourvus de longs rhizomes traçants et de feuilles ovales à cordiformes de grande taille (souvent plus de 20 cm, voire jusqu'à 100 cm de diamètre pour *P. hybridus*). Dans les situations optimales de développement, elles recouvrent ainsi totalement le sol (fig. 3).



Fig. 2 - Trois espèces de pétasites indigènes adaptées pour le génie végétal en rivière de montagne : (a) pétasite blanc (*Petasites albus*) ; (b) pétasite hybride (*P. hybridus*) ; (c) pétasite paradoxal (*P. paradoxus*).



Fig. 3 - Situation de deux espèces de pétasites en bordure de cours d'eau de montagne sur substrat frais : (a) *P. albus* ; (b) *P. paradoxus*.

Les pétasites colonisent les substrats régulièrement perturbés, que ce soit en situation forestière de demi-ombre sur des sols frais à texture variable (cas de *P. albus* typique de l'*Arunco-Petasition* – fig. 3a), en situation de pleine lumière sur matériaux carbonatés filtrants de faible diamètre (cas de *P. paradoxus* typique du *Petasition paradoxo* – fig. 3b) ou en situation riveraine, le plus souvent de demi-ombre, sur sols régulièrement alimentés par la nappe (cas de *P. hybridus* typique du *Petasition officinalis* – fig. 4).

Leur caractère pionnier, associé à une forte aptitude à la multiplication végétative, offre un potentiel important en termes d'utilisation en pied de berge de torrents, notamment au sein de fascines d'hélophytes (même si leur appareil aérien disparaît en période hivernale). La complémentarité des trois espèces induit un large éventail de possibilités quant à leur utilisation dans les situations montagnardes et subalpines. Leurs exigences hydriques imposent toutefois de les utiliser sur des substrats frais (*P. albus* et *P. paradoxus* – fig. 3), voire bien alimentés en eau (*P. hybridus* – fig. 4). Cette condition peut être un atout, car elle permet une utilisation dans les vallées encaissées et les situations confinées.



Fig. 4 - Situation typique de *Petasites hybridus* en pied de berge (*Petasition officinalis*).

En ce qui concerne les performances de croissance du système souterrain, c'est le pétasite paradoxal qui semble avoir le meilleur rendement avec un volume souterrain pouvant atteindre 160 cm³ par pied pour 40 cm de profondeur (vol. syst. sout./aérien = 1,4). Pour comparaison, le système souterrain d'un pied de pétasite blanc peut atteindre 100 cm³ (vol. syst. sout./aérien = 1).

Le taux de germination des pétasites semble inconstant en milieu naturel, bien qu'il puisse atteindre 80 % en pépinière pour le pétasite paradoxal (Schiechtel 1973). Le bouturage de rhizomes (fragments d'environ 10 cm implantés à la surface du sol) offre des résultats plus constants avec des taux de reprise compris entre 65 et 100 % selon les périodes de plantation (de meilleurs résultats sont obtenus avant la reprise de la végétation).

Les pétasites blanc et hybride sont difficilement disponibles dans le commerce sous forme de graines ou de plants en pots. Pouvant former localement de vastes populations aux abords des rivières de montagne, l'implantation de fragments de rhizomes issus de populations

naturelles devrait être privilégiée afin de garantir l'utilisation de souches locales.

Enfin, si le pétasite paradoxal atteint des altitudes très basses dans l'est des Alpes (par exemple 200 m dans le Frioul et en Slovénie), ce n'est pas le cas dans la partie occidentale du massif. À basse altitude, les pétasites peuvent être remplacés par le tussilage qui se substitue à ces espèces en situation naturelle et présente la même stratégie écologique et les mêmes aptitudes biotechniques.

5.2.2. Le tussilage (*Tussilago farfara*)

Comme pour les pétasites, la floraison du tussilage a lieu tôt au printemps (de février à avril), avant l'apparition des feuilles (fig. 5a). Le tussilage présente une morphologie foliaire proche de celle des pétasites, mais s'en différencie par des dents de second ordre plus courtes (fig. 5b – elles sont plus aiguës et allongées chez les pétasites).

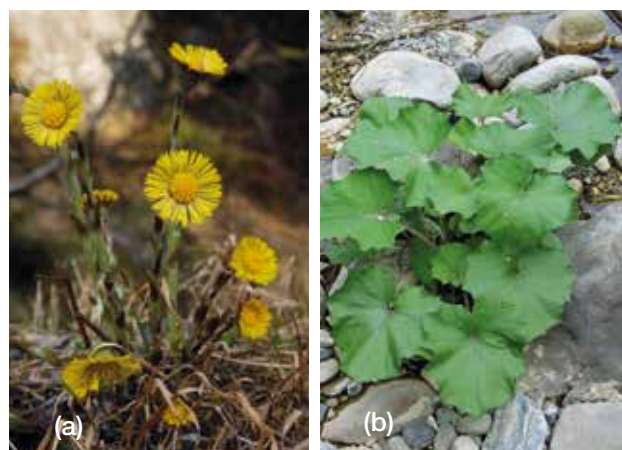


Fig. 5 - Tussilage (*Tussilago farfara*) : (a) floraison printanière avant feuillaison ; (b) appareil végétatif.

D'un point de vue écologique, le tussilage présente une amplitude plus importante que les pétasites puisqu'il croît au sein des éboulis, alluvions ou glissements de terrain de 200 à 2 000 m (fig. 6), ainsi que dans des situations secondaires sur matériaux fins susceptibles de s'assécher (*Poo-Tussilaginetum*), notamment sur des remblais ou des terrains décapés.



Fig. 6 - Situation typique du tussilage sur loupe de glissement (*Poo-Tussilaginetum*).

Sa forte aptitude à la multiplication végétative (taux de reprise proche de 100 % au bouturage de rhizomes), sa forte capacité d'établissement (couverture rapide du sol grâce à ses rhizomes traçants) et sa résistance à l'ensevelissement lui confèrent des potentialités identiques à celles des pétasites. Le tussilage montre toutefois des performances en termes de production de biomasse souterraine inférieures à celles des pétasites (volume souterrain pouvant atteindre 30 cm³ par pied ; vol. syst. sout./aérien = 0,8). Complémentaire à ces derniers, il pourra être utilisé dans des situations de plus basses altitudes. Le tussilage est disponible dans certaines pépinières spécialisées sous forme de graines ou de plants en motte.

5.2.3. Les adénostyles (*Adenostyles* spp.)

Les adénostyles sont reconnaissables à leurs grandes feuilles cordiformes irrégulièrement et simplement dentées, à la différence de celles des pétasites. Ils présentent des touffes peu imposantes, mais solidement ancrées par un pivot allongé muni de nombreuses racines secondaires (système souterrain pouvant atteindre 20 cm³ par pied ; vol. syst. sout./aérien = 0,9 chez *A. alpina*). À la différence des pétasites, ils développent des panicules corymbiformes de capitules roses à floraison estivale.

Trois espèces aux écologies complémentaires sont recensées dans les Alpes. L'adénostyle à feuilles d'alliaire (*A. alliariae*) est l'espèce la plus connue (fig. 7a). Elle présente un optimum de développement au sein de mégaphorbiaies subalpines (*Adenostyliion alliariae*), ainsi que dans les forêts de conifères ou de feuillus fraîches aux étages montagnard supérieur et subalpin (fig. 7b).



Fig. 7 - Adénostyle à feuilles d'alliaire (*Adenostyles alliariae*) : (a) port et taille pouvant atteindre 2 m ; (b) situation typique au sein d'une mégaphorbiaie subalpine (*Cicerbitetum alpinae*).

L'adénostyle glabre (*A. alpina*) est une espèce pionnière des éboulis calcaires grossiers frais (*Arabidion alpinae* – fig. 8), qui tolère l'ombre et persiste durablement sous couvert forestier de hêtraies sur éboulis (*Adenostylo-Fagetum*) ou d'érablaies fraîches de ravins (*Lunario-Acerion*). L'adénostyle à feuilles blanches (*A. leucophylla*) est une espèce pionnière des éboulis silicatés alpins (*Androsacion alpinae*).

La complémentarité écologique de ces trois espèces offre, à l'instar de celle des pétasites, un large éventail de possibilités quant à leur utilisation dans les situations

subalpines, voire alpines pour *A. leucophylla*. Le caractère rudéral et saxicole des adénostyles glabre et à feuilles blanches permettent une utilisation en milieu ou sommet de berge sur des matériaux bruts drainants carbonatés (*A. glabra*) ou silicatés (*A. leucophylla*). Inversement, la stratégie écologique compétitrice de *A. alliariae*, marquée par des exigences hydriques et trophiques plus élevées, requiert une utilisation sur des substrats fins, frais, si possible pourvus d'une fraction de matière organique. La tolérance à l'ombre de *A. alliariae* et de *A. alpina* rend possible une utilisation dans des situations confinées.



Fig. 8 - Situation typique de l'adénostyle glabre (*Adenostyles alpina*) au sein d'un éboulis calcaire frais (*Arabidion alpinae*).

Bien qu'il soit envisageable de réaliser des boutures de racines (taux de reprise assez élevé en pépinière), la faible taille et le caractère très ancré du pivot (développement oblique à vertical) limitent fortement les possibilités de prélèvements *in situ*, mis à part pour *A. alliariae* dont les populations peuvent être importantes (plusieurs centaines de tiges fleuries). L'utilisation de plants en motte (dans une fascine d'hélophytes, par exemple) ou de graines devra donc être privilégiée, ces trois espèces étant disponibles dans certaines pépinières spécialisées (attention toutefois à l'origine des plants compte tenu de la présence de nombreux cultivars ornementaux).

5.3. La calamagrostide faux roseau : une graminée typiquement alluviale

La calamagrostide faux roseau est un sosie de la calamagrostide commune (*Calamagrostis epigeios* – chap. III.4). Elle s'en différencie par ses feuilles plus glauques, son inflorescence rougeâtre à la floraison et ses épillets pourvus d'une arête dorsale insérée à l'extrémité de la lemme. Elle est pourvue de longs rhizomes traçants pouvant atteindre un mètre de profondeur mais dont le volume est néanmoins relativement faible par rapport à la biomasse aérienne (environ 1/10).

La calamagrostide faux roseau est une espèce héliophile alluviale qui, par sa présence, dénote un haut degré de naturalité. Elle est principalement répandue au-dessous de 1 500 m le long des grands cours d'eau de fond de vallée (comme l'Arc, l'Arve, le Giffre et l'Isère dans les Alpes savoyardes, et le long du Rhône dans les Alpes valaisannes). Le long de ces rivières, elle structure les communautés herbacées riveraines (*Calamagrostietum pseudophragmitis*) situées à l'aval des îlots. Elle montre

un optimum de développement sur des dépôts sableux et limoneux neutres à alcalins, à humidité constante (fig. 9). Le caractère pionnier de cette espèce, associé à une forte aptitude à la multiplication végétative, offre un potentiel important en termes d'utilisation.



Fig. 9 - Calamagrostide faux roseau (*Calamagrostis pseudophragmites*) en pied de berge sur matériaux fins (*Calamagrostietum pseudophragmitis*).

Son importante biomasse aérienne (en moyenne 1,1 à 1,2 m de haut) joue un rôle de peigne particulièrement efficace pour le piégeage des matériaux fins.

De par ses exigences écologiques spécifiques, la calamagrostide faux roseau présente un spectre d'utilisation relativement restreint. Toutefois, ses aptitudes biotechniques et son caractère spécifiquement alluvial en font une espèce de prédilection pour une utilisation en pied de berge sur des substrats non grossiers le long des grandes rivières alpines aux étages collinéens et montagnards. Elle pourra ainsi être intégrée, sous forme de plants en motte ou de fragments de rhizomes, dans une fascine d'hélophytes par exemple.

5.4. Les épilobes : des onagracées essentiellement rhizomateuses

Le genre *Epilobium* est constitué de nombreuses espèces pionnières croissant à l'état naturel dans les milieux rocheux régulièrement perturbés ou aux abords des cours d'eau (plusieurs autres espèces sont également présentes dans les champs et les secteurs rudéraux).

Parmi les espèces les plus répandues sur les alluvions et moraines du nord-ouest des Alpes, on compte l'épilobe à feuilles étroites (*Epilobium angustifolium* – fig. 10a), l'épilobe à feuilles de romarin (*E. dodonaei* – fig. 10b), l'épilobe de Fleischer (*E. fleischeri* – fig. 10c) et l'épilobe hirsute (*E. hirsutum* – fig. 10d).

Si trois de ces espèces sont pourvues de longs rhizomes traçants (*E. angustifolium*, *E. fleischeri*, *E. hirsutum*), l'épilobe à feuilles de romarin forme des touffes denses. À titre d'exemple, le système souterrain de l'épilobe à feuilles étroites, composé d'un long rhizome profondément ancré dans le sol et associé à de nombreuses racines secondaires, peut atteindre 300 cm³ par pied (vol. syst. sout./aérien = 1,1). Les tiges, ascendantes à dressées, sont pourvues de nombreuses feuilles linéaires à lancéolées recouvrant totalement le sol dans leur situation optimale de développement. Elles présentent des floraisons tardives, généralement en juillet-août. Leur fructification produit de très nombreuses graines anémochores.

Hormis pour l'épilobe de Fleischer, l'importante biomasse et la densité des tiges aériennes de ces espèces assurent un rôle de peigne efficace ; l'entrelacs de leurs rhizomes consolidant par ailleurs les couches superficielles du sol et en limitant l'érosion. De par leur morphologie et leur complémentarité écologique, ces quatre espèces présentent un large éventail de possibilités d'utilisation en génie végétal, depuis les situations thermophiles et xérophiles de l'étage collinéen jusqu'aux confins de l'étage alpin, à l'instar des pétasites avec lesquels elles pourraient être utilisées conjointement en milieu ou sommet de berge.



Fig. 10 - Quatre espèces d'épilobes particulièrement adaptées pour le génie végétal en rivière de montagne : (a) épilobe à feuilles étroites (*Epilobium angustifolium*) ; (b) épilobe à feuilles de romarin (*E. dodonaei*) ; (c) épilobe de Fleischer (*E. fleischeri*) ; (d) épilobe hirsute (*E. hirsutum*).



Fig. 11 - Mégaphorbiaie à épilobe à feuilles étroites sur éboulis grossiers (*Epilobion angustifolii*).

Aux étages montagnard et subalpin, l'épilobe à feuilles étroites offre un important potentiel sur tous types de matériaux. Bien connue des groupements herbacés acidophiles de coupes forestières (*Epilobion angustifolii*), cette espèce présente également un optimum de développement au sein des éboulis ou de cônes de déjections frais constitués de matériaux centimétriques à décimétriques (fig. 11).

Typiques des communautés riveraines collinéennes xérophiiles sur matériaux grossiers (*Epilobio-Scrophularietum* – fig. 12), des gravières et carrières abandonnées, ou encore des talus de bord de route, les grosses touffes solidement ancrées de l'épilobe à feuilles de romarin peuvent parfaitement convenir pour une implantation sur des substrats drainants (galets, graviers) à basse altitude (inférieure à 1 000 m). Des essais d'implantation par division de touffes mériteraient d'être entrepris.



Fig. 12 - Communauté riveraine collinéenne xérophiile à épilobe à feuilles de romarin (*Epilobio-Scrophularietum*).

L'épilobe de Fleischer présente un intérêt pour une utilisation à l'étage subalpin, voire alpin, sur des substrats comportant une fraction importante de matériaux fins, donc relativement bien pourvus en eau. Bien qu'il présente une faible biomasse aérienne en regard des deux espèces précédentes (effet de peigne réduit), sa stratégie écologique rudérale-compétitrice lui permet de constituer des tapis fournis stabilisant les horizons superficiels et limitant l'érosion de surface (fig. 13).



Fig. 13 - Communauté riveraine orophile à épilobe de Fleischer (*Epilobietum fleischeri*).

À la différence des espèces précédentes, l'épilobe hirsute n'est pas une espèce saxicole. Toutefois, son comportement d'hélophyte en fait une espèce adaptée pour une utilisation en pied de berge sur des matériaux fins, bien pourvus en eau : par exemple, en situation d'intrados sur des secteurs à pente modérée du profil en long (inférieure à 2 %). Les mégaphorbiaies sur zones semi-perturbées eutrophes formées avec la reine des prés (*Epilobio-Filipenduletum*) témoignent de son dynamisme à faible altitude (moins de 1 000 m). Il est à ce titre déjà utilisé en situation planitiaire et collinéenne dans les fascines d'hélophytes.

La technique d'implantation la plus fiable semble être la plantation directe de rhizomes ou de mottes. Mis à part l'épilobe de Fleischer, plus rare en pépinière, les autres espèces mentionnées ci-dessus sont disponibles dans le commerce sous forme de graines ou de plants en motte. Pour les espèces rhizomateuses, il est également possible de prélever des boutures à partir de populations naturelles, garantissant ainsi l'utilisation de souches locales.

Pour l'ensemble de ces espèces, la pose d'inflorescences sur le sol, recouvertes d'une fine couche de paille, de terre, de sables ou d'un treillis de coco, semble être une technique adéquate. Elle mériterait d'être expérimentée pour les espèces les plus faciles d'approvisionnement comme l'épilobe à feuilles étroites ou l'épilobe hirsute qui constituent des populations parfois importantes de plusieurs milliers de tiges.

5.5. Les valérianes (*Valeriana* spp.)

Trois espèces de valérianes sont potentiellement adaptées pour une utilisation en génie végétal : la valériane des montagnes (*V. montana*), à laquelle on peut adjoindre son homologue la valériane triséquée (*V. tripteris*), et la valériane officinale (*V. officinalis*).

La valériane des montagnes (fig. 14a) est une espèce de taille relativement restreinte (inférieure à 40 cm), aux feuilles ovales à lancéolées, naissant de rhizomes blanchâtres et tapissant pour la plupart le sol. Typique des éboulis, alluvions et moraines calcaires des étages montagnard et subalpin, cette espèce pionnière héliophile tolère bien l'ombre et persiste durablement sous couvert



Fig. 14 - Trois espèces de valérianes adaptées pour le génie végétal en rivière de montagne : **(a)** valériane des montagnes (*Valeriana montana*), typique des éboulis calcaires subalpins ; **(b)** valériane triséquée (*V. tripteris*), se développant en sous-bois d'une forêt de conifères à l'étage subalpin ; **(c)** valériane officinale (*V. officinalis*), typique des lisières fraîches montagnardes.

forestier de hêtraies sur éboulis (*Adenostylo-Fagetum*) ou d'éraablaies fraîches de ravins (*Lunario-Acerion*).

La tolérance aux perturbations et à l'ombre ainsi que son comportement en couvre-sol font de la valériane des montagnes une espèce adaptée pour une utilisation en milieu et sommet de berge. Comme l'épilobe de Fleischer, cette espèce aura pour vocation principale de stabiliser les horizons superficiels du sol. Elle devra être complétée par l'emploi d'espèces au système racinaire pivotant plus profond.

La valériane triséquée présente globalement la même morphologie que l'espèce précédente, mais s'en différencie par ses feuilles caulinaires triséquées et ses feuilles radicales cordiformes et dentées (fig. 14b). Il s'agit d'une espèce caractéristique des milieux rocheux calcaires ombragés (*Cystopteridion*) pouvant également se maintenir dans les forêts fraîches de conifères de l'étage montagnard à subalpin (*Abieti-Piceion*), y compris sur substrats acides (sols décalcifiés). Le système souterrain de la valériane triséquée, relativement superficiel, peut atteindre 95 cm³ par pied (vol. syst. sout./aérien = 1,9). Tout comme

l'espèce précédente, elle est particulièrement adaptée pour protéger les couches supérieures du sol, notamment dans les secteurs confinés ou boisés.

La valériane officinale est une espèce de grande taille atteignant parfois 2 m et présentant une importante biomasse aérienne (fig. 14c). Elle se reconnaît à ses feuilles opposées pennatiséquées. Il s'agit d'une espèce étroitement liée à la présence d'eau dans le sol à basse altitude (étage collinéen) et à une relative fraîcheur à l'étage montagnard, où elle est typique des lisières et des mégaphorbiaies mésophiles à mésohygrophiles. Comme l'épilobe hirsute, la valériane officinale est particulièrement adaptée en tant qu'hélophyte pour une utilisation en pied de berge sur des matériaux fins bien pourvus en eau, avec des contraintes hydrauliques modérées. Sa tolérance à l'ombre permet une utilisation dans des situations confinées.

Parmi ces trois espèces, seule la valériane officinale est présente dans le commerce sous forme de graines ou de plants en motte et est déjà utilisée dans des situations planitiaires et collinéennes.



Fig. 15 - Trois espèces d'ombellifères particulièrement adaptées pour le génie végétal en montagne : **(a)** cerfeuil hirsute (*Chaerophyllum hirsutum*) ; **(b)** impéatoire (*Peucedanum ostruthium*) ; **(c)** laser à larges feuilles (*Laserpitium latifolium*).

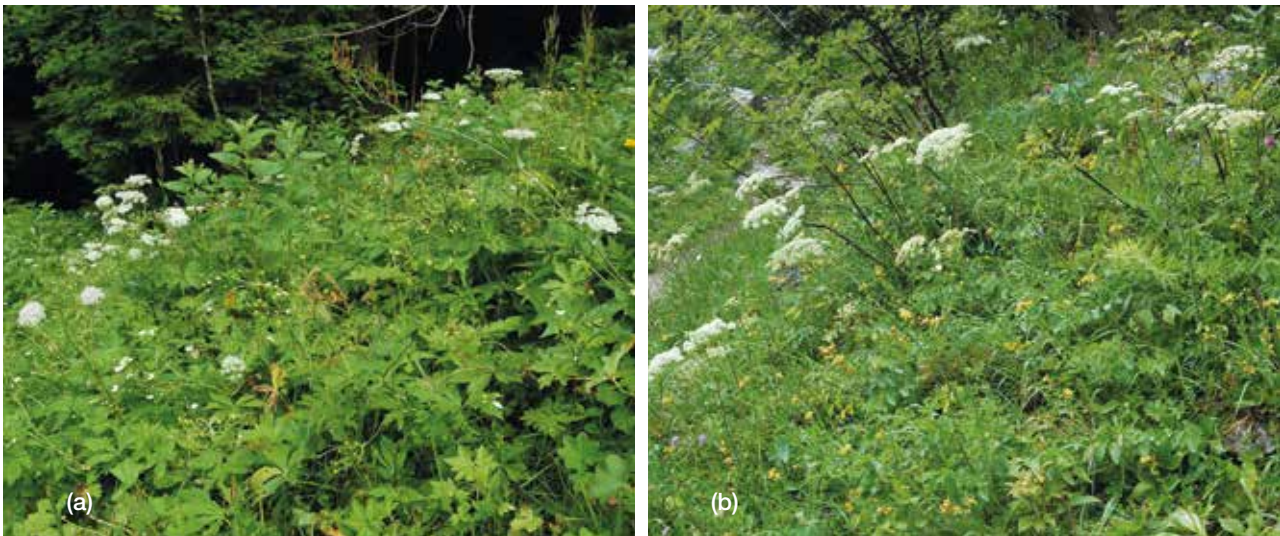


Fig. 16 - Habitat de deux espèces d'ombellifères : (a) cerfeuil hirsute au sein d'une mégaphorbiaie hygrophile montagnarde (*Chaerophyllo-Ranunculetum*) ; (b) laser à larges feuilles au sein d'une pelouse fraîche montagnarde (*Laserpitio-Camagrostietum*).

5.6. Les grandes ombellifères

Plusieurs espèces d'ombellifères présentent des caractéristiques biotechniques appropriées pour une utilisation en génie végétal en secteur montagnard. Parmi celles-ci, le cerfeuil hirsute (*Chaerophyllum hirsutum*), le laser à larges feuilles (*Laserpitium latifolium*) et l'impératoire (*Peucedanum ostruthium*) sont parmi les plus adaptées. Ces espèces se reconnaissent à la forme de leurs feuilles doublement divisées en trois (fig. 15).

Très compétitives, ces espèces forment dans leur optimum de développement des populations denses structurantes des mégaphorbiaies hygrophiles riveraines, pour le cerfeuil hirsute (*Chaerophyllo-Petasitetum* et *Chaerophyllo-Ranunculetum*), ou des communautés subalpines fraîches à mésophiles dans le cas de l'impératoire (*Adenostylin alliariae*) ou du laser à larges feuilles (*Calamagrostion variae* – fig. 16).

Leurs exigences thermiques différentes permettent une utilisation complémentaire en pied de berge et sur matériaux fins, au-dessous de 1 500 m pour le cerfeuil hirsute et au-dessus de 1 500 m pour l'impératoire. Le laser à larges

feuilles peut être utilisé de 800 à 2 200 m. Leur appareil souterrain est constitué d'une souche épaisse et ramifiée solidement ancrée dans le sol, protégeant efficacement les horizons superficiels. Celui du laser à larges feuilles peut ainsi atteindre plus de 60 cm de profondeur pour un volume de 120 cm³ par pied (vol. syst. sout./aérien = 3,4). La densité de leur appareil aérien permet également de dissiper l'énergie du courant et de créer un effet de peigne très efficace. Leur tolérance à l'ombre et leurs exigences hydriques élevées requièrent une implantation dans des stations au microclimat frais et au sol bien pourvu en eau.

De par leur fruit sec barochore, elles présentent une faible capacité de dispersion mais montrent un taux de germination élevé (notamment les graines fraîches semées en automne). Elles peuvent également être multipliées par bouturage de racines ou division de touffes.

D'autres ombellifères formant des mégaphorbiaies denses, comme l'angélique sauvage (*Angelica sylvestris*), la berce des prés (*Heracleum sphondylium*), le cerfeuil de Villars (*Chaerophyllum villarsii*) ou encore le cerfeuil doré (*Chaerophyllum aureum*), pourraient également être utili-

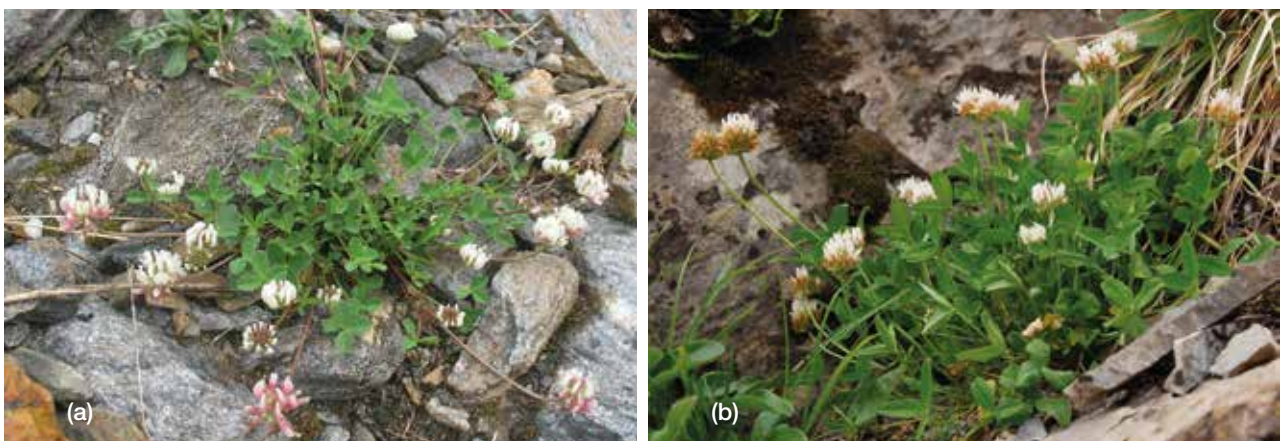


Fig. 17 - Deux trèfles pionniers particulièrement adaptés pour le génie végétal en montagne : (a) trèfle pâle (*Trifolium pallescens*) ; (b) trèfle de Thal (*Trifolium thalii*).

sées, toujours sur matériaux fins bien pourvus en eau, aux étages montagnard et subalpin.

L'angélique sauvage, la berce des prés, le cerfeuil hirsute, le laser à larges feuilles et l'impératoire sont disponibles dans certaines pépinières sous forme de graines ou de plants en motte (attention toutefois à la présence de nombreuses variétés ornementales).

5.7. Deux trèfles pionniers

De par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, leur rôle structurant dans les écosystèmes et leur valeur fourragère, plusieurs espèces de légumineuses sont déjà couramment utilisées en agronomie et en aménagement. Deux trèfles pionniers fréquents sont encore apparemment peu utilisés en génie végétal. Ils présentent un intérêt pour des réalisations aux étages subalpin, voire alpin : le trèfle pâle (*Trifolium pallescens*) et le trèfle de Thal (*Trifolium thalii*). Occasionnellement entraînés par les eaux, ils s'observent parfois à plus basse altitude.

Morphologiquement, ces trèfles à fleurs blanches à rosées se reconnaissent par leur taille modeste (moins de 20 cm) et leur port couché à ascendant (fig. 17). Le trèfle de Thal se différencie du trèfle pâle par ses fleurs non réfractées après la floraison et ses stipules uninervées.

Le trèfle pâle présente un optimum de développement sur les moraines et alluvions (*Epilobion fleischeri*). Il s'agit d'une espèce typiquement rudérale. Le trèfle de Thal est une espèce des pelouses longuement enneigées, sur sol calcaire ou au moins calcique, au tapis végétal bien constitué (*Caricion ferrugineae*). Il tolère néanmoins relativement bien les perturbations et le piétinement. Ces deux espèces héliophiles se développent préférentiellement sur des matériaux fins bien pourvus en eau, mais non inondés.

Au vu de leur comportement rudéral ou semi-rudéral, de leur enracinement pivotant et de la densité des populations qu'elles peuvent former, ces espèces offrent une bonne résistance à la traction et assurent une protection rapide des couches superficielles du sol. Elles sont complémentaires aux graminées ayant un système racinaire fasciculé tels le pâturin des Alpes (*Poa alpina*), la fléole des Alpes (*Phleum alpinum*) ou encore la fétuque noirâtre (*Festuca nigrescens*). Leur tolérance au froid et à la pauvreté du sol est un atout supplémentaire pour une utilisation en rivières de montagne, notamment sur des berges récemment constituées et pourvues de matériaux fins. Leur implantation est à réaliser par ensemencement.

5.8. Quelques assemblages possibles

Le choix des espèces herbacées à planter devra impérativement prendre en compte la complémentarité en termes de structure et de croissance, tant des parties aériennes que souterraines, qui représente un des garants de la stabilisation du sol et de l'atténuation des effets de l'érosion. Elle permet à la couverture herbacée d'assurer pleinement sa fonction de protection de surface.

Une attention particulière devra également être portée à l'effet de concurrence potentielle avec les jeunes boutures des espèces ligneuses, parfois moins compétitives.

Enfin, la technique d'implantation devra être adaptée à la nature du matériel végétal, et parfois même améliorée ou testée, dans la mesure où la plupart de ces espèces n'ont été que peu ou pas utilisées jusqu'alors.

En s'inspirant des modèles naturels, plusieurs assemblages peuvent ainsi être proposés en fonction des conditions stationnelles du site et des objectifs de l'aménagement.

Assemblage « hautes herbes » (fig. 18) :

Adenostyles alliariae (+ 1 000 m), *Calamagrostis pseudophragmites* (- 1 500 m), *Chaerophyllum hirsutum* (- 1 500 m), *Epilobium hirsutum* (- 1 000 m), *Petasites albus*, *Petasites hybridus* (- 1 500 m), *Peucedanum ostruthium* (+ 1 500 m), *Valeriana officinalis*.

Assemblage « rocaillies calcaires » :

Achnatherum calamagrostis (- 1 500 m), *Adenostyles alpina*, *Epilobium angustifolium*, *Epilobium fleischeri*, *Leontodon hispidus* (subsp. *pseudocrispus* et *hyosoides*), *Onobrychis montana* (+ 1 500 m), *Petasites paradoxus*, *Valeriana montana*, *Tussilago farfara*.

Assemblage « rocaillies siliceuses » :

Adenostyles leucophylla (+ 1 500 m), *Agrostis schradariana* (+ 1 500 m), *Epilobium angustifolium*, *Trifolium pallescens* (+ 1 500 m).

Assemblage « pelouses fraîches subalpines » :

Anthyllis vulneraria subsp. *alpestris* (+ 1 500 m), *Calamagrostis varia*, *Lasepitium latifolium*, *Phleum alpinum* (+ 1 500 m), *Poa alpina*, *Trifolium badium* (+ 1 500 m), *Trifolium thalii* (+ 1 500 m), *Trisetum flavescens*.



Fig. 18 - Mégaphorbiaie composée de *Petasites albus*, *P. hybridus*, *Adenostyles alliariae* et *Valeriana officinalis* couvrant efficacement le sol et se développant naturellement sur la berge d'un cours d'eau de montagne au-dessus d'une assise de blocs décimétriques.

6. Clé d'identification des saules en période de repos végétatif

6.1. Introduction

6.1.1. Territoire et espèces concernées

Les espèces concernées par la clé d'identification hivernale du genre *Salix* sont celles présentes naturellement dans les Alpes du Nord occidentales (chap. III.1). Vingt-sept espèces sont ainsi actuellement recensées au sein de ce territoire :

<i>S. alba</i> L.	<i>S. hastata</i> L.
<i>S. appendiculata</i> Vill.	<i>S. helvetica</i> Vill.
<i>S. atrocinerea</i> Brot.	<i>S. herbacea</i> L.
<i>S. aurita</i> L.	<i>S. laggeri</i> Wimm.
<i>S. bicolor</i> Willd.	<i>S. myrsinifolia</i> Salisb.
<i>S. breviserrata</i> Flod.	<i>S. pentandra</i> L.
<i>S. caesia</i> Vill.	<i>S. purpurea</i> L.
<i>S. caprea</i> L.	<i>S. repens</i> L.
<i>S. cinerea</i> L.	<i>S. reticulata</i> L.
<i>S. daphnoides</i> Vill.	<i>S. retusa</i> L.
<i>S. elaeagnos</i> Scop.	<i>S. serpyllifolia</i> Scop.
<i>S. foetida</i> Schleich. ex DC.	<i>S. triandra</i> L.
<i>S. fragilis</i> L.	<i>S. viminalis</i> L.
<i>S. glaucosericea</i> Flod.	

6.1.2. Critères et démarche d'identification

En l'absence de feuilles et de fleurs, les caractères les plus essentiels à la détermination des saules sont le port de la plante, la flexibilité, la couleur et la pilosité des rameaux, la forme, la couleur et la taille des bourgeons. Dans certains cas particuliers, la disposition des bourgeons, la présence de stries sous l'écorce ou la forme de la section des rameaux sont également nécessaires à l'identification.

En période hivernale, les saules se distinguent des autres espèces ligneuses par leur bourgeon en capuchon composé d'une seule écaille (fig. 1).

6.1.2.1. Préambule

Les différents caractères sont à observer de manière préférentielle sur les faces exposées au soleil dans la partie terminale (5-10 cm) des rameaux « dominants ». Les organes présentent en effet une tendance au verdissement lorsqu'ils se développent en situation ombragée, une taille réduite ou sont avortés lorsqu'ils se développent sur des rameaux « dominés ».

La démarche d'identification est à conduire de manière privilégiée sur des individus non taillés ou « perturbés ». Elle est délicate à mener sur des rejets de souche qui présentent des rameaux et des bourgeons aux tailles et aux proportions atypiques, ou sur des rameaux régulièrement abrutis ou submergés par les crues.

Dans de nombreux cas, la détermination d'un individu ne peut être achevée sur le terrain. Étant donné la plasticité morphologique de certaines espèces (notamment de *S. caprea*, *S. daphnoides* ou *S. myrsinifolia*) et l'aspect parfois atypique lié à des coupes récentes ou à des perturbations diverses, certaines précautions de récolte doivent être respectées avant d'utiliser la clé *ex situ* sur les échantillons fraîchement collectés :

- prélever, dans la mesure du possible, plusieurs échantillons sur différents individus sains et correctement développés, en évitant les rameaux récemment taillés ou broutés, les rejets de souche, les rameaux dominés ;
- prélever des échantillons comprenant du bois de l'année et de deux ans ;
- noter sur le terrain la hauteur approximative et le port de l'individu.

Enfin, compte tenu des phénomènes d'hybridations et d'introgessions existant au sein du genre, certains individus peuvent présenter des caractères intermédiaires. Pour des raisons évidentes de simplification, ces types morphologiques ne sont pas identifiables par cette clé. Parmi les croisements les plus réguliers au sein de la dition, on peut citer à titre indicatif : *S. aurita* x *S. cinerea* (*S. x multinervis*), *S. daphnoides* x *S. purpurea* (*S. x caliantha*), *S. caprea* x *S. elaeagnos* (*S. x seringeana* – fig. 1).



Fig. 1 - Deux hybrides régulièrement rencontrés en milieu naturel : (a) *S. aurita* x *S. cinerea* (*S. x multinervis*) ; (b) *S. caprea* x *S. elaeagnos* (*S. x seringeana*).

6.1.2.2. Le port

Le port des saules, comme pour l'ensemble des espèces ligneuses, est conditionné par la vitesse relative de croissance des tiges ligneuses, et donc par l'effet de dominance des bourgeons apicaux. On distingue ainsi deux grands types « d'architecture végétale » :

- le port arborescent caractérisé par une croissance plus rapide des bourgeons apicaux (acrotonie), favorisant l'élongation de l'individu et l'individualisation du tronc ;
- le port buissonnant caractérisé par une croissance des bourgeons axillaires dès les premiers stades de développement (basitonie), favorisant le développement des tiges à partir de la souche, donc la ramification de la plante.

Le port de la plante est aussi largement influencé par divers facteurs environnementaux comme les crues, le vent, la neige, les mouvements de terrain, l'action du bétail (piétinement, abrutissement, etc.), les relations interspécifiques de compétition entre espèces, (notamment pour l'accès à la lumière) ou l'action de l'homme (recépage, traitement en têtard ou en émonde).

Arbres et arbustes

S. alba et *S. fragilis* forment généralement un tronc individualisé et peuvent dépasser 15 m de haut (jusqu'à 30 m pour *S. alba* – fig. 2). *S. daphnoides* et *S. caprea* présentent régulièrement un port arborescent ne dépassant pas 15 m de hauteur.

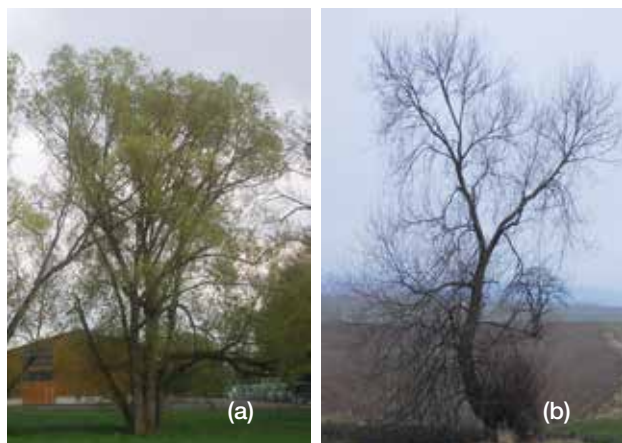


Fig. 2 - Deux espèces au port arborescent dépassant généralement 15 m de hauteur : (a) *S. alba* ; (b) *S. fragilis*.

Même s'ils peuvent présenter un port arborescent, *S. elaeagnos*, *S. pentandra* et *S. viminalis* forment bien souvent des cépées ne dépassant pas 10 m de hauteur (fig. 3).

Certaines espèces formant habituellement des troncs uniques peuvent, sous l'effet de différents facteurs environnementaux (crues, abrutissement, broyage, etc.), former des cépées plus ou moins basses suivant la fréquence des perturbations. Ces espèces peuvent également présenter un faciès buissonnant durant les premiers stades de leur croissance, créant ainsi des confusions possibles avec les espèces exclusivement buissonnantes (cas notamment de *S. alba*). Inversement, certaines espèces formant habituellement des cépées peuvent, en l'absence de perturbations régulières et sous l'effet de la compétition interspécifique, former des troncs uniques élancés (cas de *S. elaeagnos*).

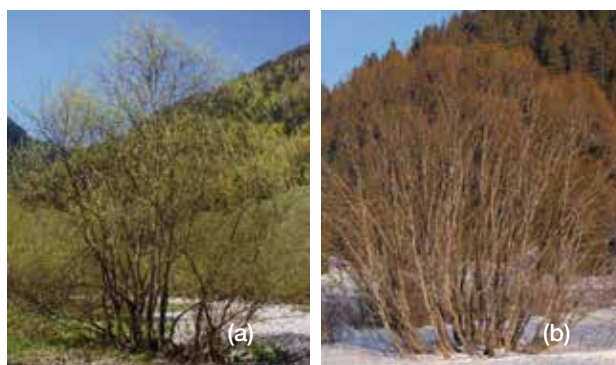


Fig. 3 - Deux espèces arborescentes formant généralement des cépées : (a) *S. elaeagnos* ; (b) *S. pentandra*.

Arbrisseaux

Quatorze des espèces décrites présentent un port buissonnant ne dépassant pas 8 m de hauteur. Parmi celles-ci, certaines présentent des tiges ascendantes à dressées dépassant généralement 2 m de haut : *S. appendiculata*, *S. atrocinerea*, *S. cinerea*, *S. laggeri*, *S. myrsinifolia*, *S. purpurea* et *S. triandra* (fig. 4).

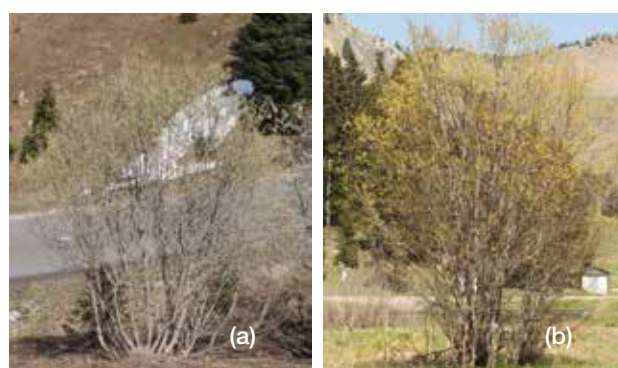


Fig. 4 - Deux espèces buissonnantes aux tiges ascendantes à dressées : (a) *S. appendiculata* ; (b) *S. myrsinifolia*.

D'autres sont des arbrisseaux aux tiges ascendantes à dressées de 0,3 à 2 m de haut : *S. aurita*, *S. bicolor*, *S. caesia*, *S. foetida*, *S. glaucosericea*, *S. hastata*, *S. helvetica* (fig. 5). *S. repens*, quant à lui, est un sous-arbrisseau à port étalé-ascendant ne dépassant pas 1 m de haut. Ses rameaux inférieurs sont appliqués sur le sol et donnent naissance à des tiges souples dressées dépassant généralement 30 cm de haut.



Fig. 5 - Deux arbrisseaux aux tiges ascendantes mesurant moins de 2 m de hauteur : (a) *S. foetida* ; (b) *S. helvetica*.

Sous-arbrisseaux nains

Les autres espèces sont des sous-arbrisseaux présentant un port prostré ne dépassant pas 30 cm de hauteur. Ils développent des tiges étalées, généralement radicales : *S. breviserrata*, *S. herbacea*, *S. reticulata*, *S. retusa*, *S. serpyllifolia* (fig. 6). À l'exception de *S. breviserrata*, présentant des rameaux terminaux étalés, ascendants ou dressés pouvant atteindre 30 cm, ces espèces sont munies de rameaux terminaux généralement appliqués sur le sol (parfois même enfouis chez *S. reticulata*) ne dépassant pas 5 cm de haut.



Fig. 6 - Deux sous-arbrisseaux au port étalé ne dépassant généralement pas 5 cm de hauteur : (a) *S. herbacea* ; (b) *S. reticulata*.

Même s'ils présentent généralement des ports dressés dépassant 2 m de haut, certains taxons comme *S. appendiculata*, *S. myrsinifolia* subsp. *alpicola* et *S. purpurea* subsp. *angustior* peuvent former des arbrisseaux au port prostré et aux rameaux étalés-ascendants sous l'effet de l'enneigement ou des crues.

6.1.2.3. Les rameaux

Concernant l'observation des rameaux, une attention particulière devra être portée sur la pilosité, la couleur et la forme de la section des rameaux de l'année, ainsi que sur la pilosité des rameaux de deux ans. Autant que possible, le recours à l'observation des cannelures à la surface du bois de plus de 2 ans a été évité, dans la mesure où ce caractère est difficile à observer durant la phase de repos végétatif ; l'écorce restant collée au bois lors de cette période. Ce caractère est toutefois mentionné pour certaines espèces (*S. cinerea* notamment) en tant que critère secondaire d'aide à la détermination.

Les rameaux de l'année correspondent aux pousses apparues lors de la dernière saison de végétation. Dans le cas d'individus récemment taillés ou broutés, ils peuvent être difficiles à distinguer des rameaux de deux ans ; ces individus réalisant souvent une repousse dans la même saison.

La pilosité s'observe de manière privilégiée sur la partie terminale des rameaux (trois derniers centimètres), où elle est le mieux exprimée, mais aussi de part et d'autre des cicatrices foliaires et sur le bois de 2 ans (cas de *S. cinerea*, *S. laggeri*, *S. myrsinifolia* – fig. 7).



Fig. 7 - Variabilité de la pilosité et de la couleur des rameaux de 2 ans entre : (a) *S. myrsinifolia* s. str. ; (b) *S. myrsinifolia* subsp. *alpicola*.



Fig. 8 - Variabilité de la pilosité et de la couleur des rameaux de l'année chez *S. daphnoides* : (a) hirsute et mat ; (b) glabre et luisant.

Ce caractère montre cependant une forte variabilité chez certaines espèces (*S. daphnoides* – fig. 8, *S. elaeagnos*, *S. hastata*, *S. myrsinifolia*), où l'on observe des individus aux rameaux densément velus et d'autres aux rameaux glabres ou glabrescents. Cette variabilité s'observe également sur un même individu.

Compte tenu des nombreuses variations concernant la couleur des rameaux (variations souvent perceptibles sur un même individu en fonction notamment de l'exposition – fig. 8), ce caractère doit être utilisé avec prudence. Il est toutefois utile à la discrimination dans plusieurs cas.

Afin de bien observer la couleur et la brillance des rameaux, il peut être nécessaire de frotter ceux-ci avec le pouce afin d'ôter les éventuels dépôts de poussière ou la couche de pruine pouvant masquer ces caractères.

Enfin, la forme de la section des rameaux de l'année, arrondie ou anguleuse (cas de *S. atrocinerea*, *S. triandra*, *S. elaeagnos*), s'observe également sur l'extrémité des rameaux (trois derniers centimètres), *in situ* ou sur des rameaux récemment collectés ; les rameaux séchés devenant tous plus ou moins anguleux.

6.1.2.4. Les bourgeons

Les bourgeons sont à observer dans leur disposition, leur forme, leur couleur et leur pilosité. Si certaines espèces présentent des caractères constants comme *S. triandra* ou *S. pentandra*, il existe une variabilité morphologique chez de nombreux taxons, parfois déroutante pour la détermination.

Un premier cas de variabilité est celui de la disposition des bourgeons sur les rameaux, comme chez *S. purpurea*. Aisément reconnaissable à ses bourgeons opposés, cette espèce présente néanmoins régulièrement des rameaux à disposition alterne (fig. 9). Certaines autres espèces peuvent parfois présenter des bourgeons opposés (*S. caesia* et *S. helvetica*), notamment à la base des rameaux de l'année.



Fig. 9 - Variabilité de la disposition des bourgeons chez *S. purpurea* : (a) opposée et décussée sur rameau de l'année ; (b) alternes et hélicoïdales sur le bois de 2 ans.

Concernant la forme des bourgeons, l'observation doit être principalement portée sur le rapport longueur/largeur et sur la forme de l'apex (conique/aplati, obtus/aigu – fig. 10).

Le caractère appliqué ou divergeant du bourgeon sur le rameau est principalement lié à sa forme sur la face ventrale (face intérieure attenante au rameau). Si celle-ci est plane ou concave, le bourgeon sera appliqué sur le rameau (fig. 9). À l'inverse, si la face intérieure du bourgeon est convexe, celui-ci présentera un apex écarté du rameau (fig. 10).

Les variabilités de taille et de forme des bourgeons peuvent être liées à leur position sur le rameau ou à leur nature (floral ou foliaire). Sous l'effet de la dominance apicale, les bourgeons terminaux des rameaux principaux (dits « rameaux dominants ») sont plus développés. Ce sont eux qui sont à observer de préférence et sur lesquels on effectuera les mesures. Les bourgeons situés à la base des rameaux ou sur les rameaux de 2 ans sont en règle générale plus petits, voire atrophiés, et présentent une tendance à l'arrondissement.

Chez certaines espèces, les bourgeons floraux et foliaires présentent des aspects différents en taille et en forme (*S. caprea*, *S. daphnoides*, *S. hastata* par ex. – fig. 10). Cette dissemblance peut être très utile à l'identification. Elle est toutefois plus ou moins facile à observer. En effet, les bourgeons floraux se développant principalement sur les rameaux dominants, les individus juvéniles ou les rameaux « dominés » des individus âgés en sont souvent dépourvus, ce qui ne facilite pas l'identification.



Fig. 10 - Bourgeons foliaires et floraux chez : (a) *S. daphnoides* (bourgeons floraux ovoïdes à apex écarté du rameau, bourgeons foliaires plus petits, appliqués et comprimés dorso-ventralement) ; (b) *S. hastata* (bourgeons floraux à apex aplati écarté du rameau, bourgeons foliaires fusiformes, plus petits et appliqués sur le rameau).

6.2. Clé des saules en période de repos végétatif

1. Arbrisseau, arbuste ou arbre dépassant 2 m de hauteur à maturité ou ne dépassant pas 2 m mais se développant à moins de 1 500 m d'altitude (cas des stades juvéniles) 2
 - Arbrisseaux ou sous-arbrisseaux, parfois rampants, ne dépassant pas 2 m de hauteur et se développant à une altitude supérieure à 1 500 m (excepté *S. repens* présent à plus basse altitude) 29

2. Rameaux de l'année glabres ou glabrescents, présentant parfois une pilosité éparses de part et d'autre des cicatrices foliaires (visible seulement à la loupe - fig. 11 et 14) 3
 - Rameaux de l'année velus (au moins dans leur partie supérieure - fig. 12, 13 et 15) 11

3. Rameaux de l'année cannelés ou anguleux à l'extrémité (observer les 3 derniers cm), brun foncé à brun rougeâtre, présentant souvent des plaques décolorées blanchâtres *Salix triandra* (fig. 89 à 91)
 - Rameaux non cannelés ou anguleux à l'extrémité 4

4. Bourgeons, au moins une partie d'entre eux, opposés ou subopposés notamment à la base des rameaux de l'année (observer plusieurs rameaux) *Salix purpurea* (fig. 74 à 76)
 - Bourgeons jamais opposés ou subopposés 5

5. Rameaux de l'année très brillants, vernissés. Chatons desséchés retombants, ordinairement présents en période hivernale sur les individus âgés. Bourgeons ovoïdes à elliptiques, jamais comprimés dorso-ventralement, jaune orangé à brunâtres *Salix pentandra* (fig. 71 à 73)
 - Rameaux mats ou luisants, mais non vernissés. Chatons desséchés ordinairement absents en période hivernale. Bourgeons, au moins une partie d'entre eux, plan-convexes 6

6. Bourgeons, au moins la majorité d'entre eux, moins de 2 fois aussi longs que larges 7
 - Bourgeons, au moins la majorité d'entre eux, plus de 2 fois aussi longs que larges 9

7. Bourgeons ordinairement de 2 types : les foliaires ovoïdes et carénés ne dépassant pas 5 mm ; les floraux à apex déjeté vers l'extérieur pouvant atteindre 8 mm *Salix caprea* (fig. 32 à 34)
 - Bourgeons tous de même type, dépassant rarement 6 mm 8

8. Rameaux terminaux ordinairement de couleurs sombres (rouge foncé, marron foncé à noirs). Arbre ou arbuste mesurant plus de 6 m de hauteur *Salix caprea* (fig. 32 à 34)
 - Rameaux terminaux verts, jaunâtres ou beiges, souvent tachetés de noir. Arbuste ne dépassant pas 6 m de hauteur *Salix appendiculata / caprea* (fig. 14 à 16 et 32 à 34)

9. Rameaux de l'année ordinairement rougeâtres à violacés, souvent nuancés de jaune ou de vert, voire verdâtres. Bourgeons ordinairement de 2 types : les foliaires effilés à apex appliqué sur le rameau, les floraux en « bec de canard » (à apex aplati et déjeté vers l'extérieur). Rameaux de 1 à 4 ans parfois prumineux *Salix daphnoides* (fig. 38 à 40)
 - Rameaux de l'année orangés à brun jaunâtre, jamais nuancés de jaune ou de vert. Bourgeons tous de même type. Rameaux jamais prumineux 10

10. Bourgeons brun foncé à noirâtres, parfois verdâtres ou orangés, souvent bicolores, fusiformes, les plus grands dépassant ordinairement 8 mm. Rameaux axillaires terminaux se rompant facilement à leur base *Salix fragilis* (fig. 47 à 49)
- Bourgeons brun clair, parfois rougeâtres à jaunâtres, jamais noirâtres, comprimés dorso-ventralement, les plus grands dépassant rarement 8 mm. Rameaux axillaires terminaux s'arrachant plus difficilement *Salix alba* (fig. 11 à 13)
11. Rameaux de 2 ans glabres (parfois glabrescents à leur extrémité) 12
- Rameaux de 2 ans nettement velus (pilosité ordinairement visible à l'œil nu) 25
12. Arbrisseau à tiges couchées à ascendantes, présentant des bourgeons globuleux à ovoïdes, mesurant moins de 4 mm *Salix aurita* (fig. 20 à 22)
- Arbuste ou arbrisseau à tiges dressées, présentant des bourgeons mesurant pour la plupart plus de 4 mm 13
13. Rameaux de l'année ordinairement cannelés ou anguleux à l'extrémité 14
- Rameaux de l'année cylindriques, jamais cannelés ou anguleux (à l'état frais) 15
14. Bourgeons ovoïdes, ordinairement carénés, moins de 2 fois aussi longs que larges. Présence de moins de 5 bourgeons sur les 3 derniers cm des rameaux de l'année *Salix atrocinerea* (fig. 17 à 19)
- Bourgeons effilés, non carénés, plus de 2 fois aussi longs que larges. Présence de plus de 5 bourgeons sur les 3 derniers cm des rameaux de l'année *Salix elaeagnos* (fig. 41 à 43)
15. Bourgeons plan-convexes, à apex plus ou moins appliqué sur le rameau 16
- Bourgeons convexes sur les 2 faces, à apex ordinairement écarté du rameau 20
16. Rameaux terminaux brun foncé, noirâtres ou violacés (observer la face exposée à la lumière) *Salix myrsinifolia* subsp. *alpicola* (fig. 65 à 67)
- Rameaux terminaux d'une autre couleur 17
17. Rameaux à pilosité appliquée *Salix alba* (fig. 11 à 13)
- Rameaux présentant une pilosité d'un autre type, souvent hérissée ou aranéuse 18
18. Rameaux présentant une pilosité hérissée, très courte (poils longs de moins de 0,5 mm) *Salix viminalis* (fig. 92 à 94)
- Rameaux présentant une pilosité hérissée plus allongée ou de type aranéuse-enchevêtrée 19
19. Rameaux de l'année mats, à pilosité aranéuse (parfois lâche). Présence de plus de 5 bourgeons sur les 3 derniers cm des rameaux de l'année. Bourgeons tous de même type ne dépassant pas 7 mm. Rameaux jamais pruineux *Salix elaeagnos* (fig. 41 à 43)
- Rameaux de l'année luisants, ordinairement glabrescents à leur base et à pilosité irrégulière (souvent hérissée). Présence de moins de 5 bourgeons sur les 3 derniers cm des rameaux de l'année. Bourgeons souvent de 2 types : les foliaires effilés à apex appliqué sur le rameau ; les floraux en « bec de canard » (à apex aplati et déjeté vers l'extérieur) dépassant 8 mm. Rameaux de 1 à 4 ans parfois pruineux *Salix daphnoides* (fig. 38 à 40)

Guide des espèces - 6. Clé d'identification des saules

20. Bourgeons tous de même type, dépassant rarement 6 mm 21
- Bourgeons ordinairement de 2 types : les foliaires ne dépassant pas 6 mm ; les floraux, à apex écarté du rameau, pouvant atteindre 8 à 12 mm 23
21. Rameaux de 2 ans luisants à brillants. Présence régulière de feuilles marcescentes à l'extrémité des rameaux
..... *Salix myrsinifolia* subsp. *alpicola* (fig. 65 à 67)
Rameaux de 2 ans mats. Feuilles ordinairement non marcescentes 22
22. Rameaux terminaux ordinairement de couleurs sombres (rouge foncé, marron foncé à noirs). Arbre ou arbuste mesurant plus de 6 m de hauteur *Salix caprea* (fig. 32 à 34)
- Rameaux terminaux verts, jaunâtres ou beiges, souvent tachetés de noir. Arbuste ne dépassant pas 6 m de hauteur
..... *Salix appendiculata* / *caprea* (fig. 14 à 16 et 32 à 34)
23. Rameaux de l'année luisants, parfois prumineux. Bourgeons floraux dépassant 8 mm
..... *Salix daphnoides* (fig. 38 à 40)
- Rameaux de l'année mats, jamais prumineux. Bourgeons floraux mesurant moins de 8 mm 24
24. Bourgeons floraux à apex plus ou moins déjeté vers l'extérieur. Bourgeons foliaires nettement carénés
..... *Salix caprea* (fig. 32 à 34)
Bourgeons floraux à apex conique (en forme de larme). Bourgeons foliaires pas ou peu carénés
..... *Salix bicolor* (fig. 23 à 25)
25. Arbrisseau à port en boule, à tiges ascendantes. Rameaux de 2 ans à cannelures saillantes sous l'écorce (cicatrices longues de plus de 1 cm) *Salix cinerea* (fig. 35 à 37)
- Arbuste à port dressé. Rameaux de 2 ans lisse sous l'écorce (ou présentant parfois des cicatrices peu visibles longues de moins de 5 mm) 26
26. Pilosité aranéreuse, enchevêtrée. Rameaux de l'année ordinairement cannelés ou anguleux à l'extrémité (observer les 3 derniers cm) *Salix elaeagnos* (fig. 41 à 43)
- Pilosité régulière, appliquée à hirsute. Rameaux de l'année arrondis 27
27. Rameaux de l'année brun foncé à brun rougeâtre, gris foncé ou noirâtres. Présence régulière de feuilles marcescentes à l'extrémité des rameaux *Salix myrsinifolia* (fig. 68 à 70)
- Rameaux de l'année brun clair, beiges, jaunâtres ou jaune verdâtre (parfois tachetés de noir). Feuilles non marcescentes 28
28. Bourgeons à apex ordinairement aplati, appliqué sur le rameau ou déjeté vers l'extérieur, densément velus (poils longs de plus de 1 mm). *Salix laggeri* (fig. 62 à 64)
- Bourgeons à apex arrondi à conique, jamais aplati, plus ou moins glabrescents (poils ne dépassant pas 0,5 mm)
..... *Salix appendiculata* (fig. 14 à 16)
29. Arbrisseau ou sous-arbrisseau ne dépassant pas 30 cm de hauteur. Tiges étalées à ascendantes, ordinairement radicantes 30
- Arbrisseau dépassant ordinairement 30 cm de hauteur. Tiges ascendantes à dressées, ordinairement non radicantes 34

30. Arbrisseau ou sous-arbrisseau à rameaux terminaux étalés, ascendants ou dressés, non appliqués sur le sol, dépassant 5 cm de hauteur **Salix breviserrata** (fig. 26 à 28)
- Arbrisseau ou sous-arbrisseau rampant, prostré, à rameaux terminaux plus ou moins appliqués sur le sol, parfois ascendants mais alors ne dépassant pas 5 cm de hauteur 31
31. Bourgeons apicaux et subapicaux nettement plus grands que les bourgeons axillaires (de 1,5 à 3 fois), ces derniers peu nombreux, ordinairement pas plus de 3 (observer ce caractère sur les rameaux dominants) 32
- Bourgeons apicaux et subapicaux plus petits ou de taille sensiblement identique aux bourgeons axillaires, ces derniers plus nombreux, ordinairement plus de 4 33
32. Bourgeons apicaux mesurant plus de 3,5 mm. Rameaux terminaux mesurant plus de 1,5 mm de diamètre (observer ce caractère à 2 cm sous le bourgeon apical) **Salix reticulata** (fig. 80 à 82)
- Bourgeons apicaux mesurant moins de 3,5 mm. Rameaux terminaux filiformes mesurant moins de 1,5 mm de diamètre **Salix herbacea** (fig. 59 à 61)
33. Bourgeons les plus grands mesurant plus de 2,3 mm. Rameaux terminaux mesurant plus de 1,5 mm de diamètre (observer ce caractère à 2 cm sous le bourgeon apical) **Salix retusa** (fig. 83 à 85)
- Bourgeons les plus grands atteignant 2,2 mm tout au plus. Rameaux terminaux filiformes mesurant moins de 1,5 mm de diamètre **Salix serpyllifolia** (fig. 86 à 88)
34. Sous-arbrisseau des tourbières et prairies humides à port étalé : les rameaux inférieurs sont rampants, les terminaux dressés, très souples (de type osier). Pilosité appliquée, dense et régulière **Salix repens** (fig. 77 à 79)
- Arbrisseau à port ascendant ou dressé. Bourgeons et rameaux glabres ou à pilosité différente 35
35. Bourgeons pour la plupart opposés ou subopposés, ordinairement plus de 2,5 fois aussi longs que larges (observer plusieurs rameaux) **Salix purpurea** (fig. 74 à 76)
- Bourgeons alternes ou pour la plupart alternes (parfois opposés ou subopposés sur certains rameaux de *S. caesia* et *S. helvetica*, mais alors moins de 2,5 fois aussi longs que larges) 36
36. Rameaux de l'année luisants (ce caractère est visible sur les zones présentant une pilosité éparsée) 37
- Rameaux de l'année mats 42
37. Bourgeons majoritairement globuleux, aplatis ou légèrement échancrés à l'extrémité, moins de 2 fois aussi longs que larges (ordinairement 1,5 fois), rouges à noirâtres **Salix caesia** (fig. 29 à 31)
- Rameaux ne réunissant pas l'ensemble de ces caractères. 38
38. Rameaux de l'année glabres, très brillants, vernissés. Chatons desséchés retombants ordinairement présents en période hivernale sur les individus âgés **Salix pentandra** (fig. 71 à 73)
- Rameaux de l'année ordinairement velus, non vernissés. Chatons desséchés généralement absents en période hivernale 39
39. Rameaux terminaux brun foncé, brun rougeâtre, noirâtres ou violacés (observer la face exposée à la lumière) 40
- Rameaux terminaux d'une autre couleur : brun jaunâtre, gris, orange ou rouges 41

40. Bourgeons à apex plus ou moins comprimé, appliqué contre le rameau. Bourgeons, au moins une partie d'entre eux, mesurant plus de 4 mm. Rameaux terminaux plus épais mesurant la plupart plus de 1,5 mm de diamètre à leur extrémité (observer ce caractère à 2 cm sous le bourgeon apical). Pilosité, lorsqu'elle est visible, présentant des poils allongés ($l > 0,5$ mm) *Salix myrsinifolia* subsp. *alpicola* (fig. 65 à 67)
- Bourgeons à apex plus ou moins arrondi, non appliqué contre le rameau. Bourgeons mesurant ordinairement moins de 4 mm. Rameaux terminaux filiformes mesurant ordinairement moins de 1,5 mm de diamètre à leur extrémité. Pilosité composée de poils courts ($l < 0,5$ mm) *Salix foetida* (fig. 44 à 46)
41. Rameaux et bourgeons terminaux glabres, glabrescents ou à pilosité enchevêtrée appliquée. Bourgeons elliptiques, glabres, glabrescents ou velus, mais alors à pilosité moyennement allongée (la majorité des poils n'atteignant pas 1 mm) *Salix helvetica* (fig. 56 à 58)
- Rameaux et bourgeons terminaux à pilosité ordinairement étalée. Bourgeons coniques, les terminaux très velus, à pilosité allongée (la majorité des poils dépassant 1 mm) masquant souvent la surface du bourgeon sous-jacent *Salix glaucosericea* (fig. 50 à 52)
42. Bourgeons de 2 types, de forme et de taille différentes : les floraux étant plus allongés et plus larges que les foliaires (fig. 23, 53 et 62) 43
- Bourgeons tous de même forme et sensiblement de même taille 46
43. Bourgeons floraux ovoïdes ou en forme de « larmes », à apex conique et base arrondie 44
- Bourgeons floraux à apex aplati, ordinairement 2 à 3 fois aussi longs que larges. Bourgeons foliaires plan-convexes à apex plus ou moins appliqué sur le rameau 45
44. Bourgeons floraux ovoïdes, mesurant ordinairement plus de 8 mm, plus de 2 fois aussi longs que larges, brun chocolat à brun rougeâtre *Salix hastata* (fig. 53 à 55)
- Bourgeons floraux en forme de « larmes », mesurant ordinairement moins de 8 mm, moins de 2 fois aussi longs que larges, jaunâtres à orangés *Salix bicolor* (fig. 23 à 25)
45. Rameaux terminaux et bourgeons brun chocolat, brun rougeâtre ou orange. Rameaux de 2-3 ans ordinairement brun verdâtre à rouge orangé, glabres à glabrescents. Bourgeons terminaux glabres ou velus à pilosité aranéuse, enchevêtrée, appliquée, parfois dense *Salix hastata* (fig. 53 à 55)
- Rameaux terminaux et bourgeons beiges, jaunâtres ou jaune verdâtre. Rameaux de 2-3 ans gris clair à noirâtres, densément velus. Bourgeons terminaux densément velus à pilosité hirsute allongée (la majorité des poils dépassant 1 mm masquant souvent la surface du bourgeon sous-jacent) *Salix laggeri* (fig. 62 à 64)
46. Bourgeons de petite taille, n'atteignant pas 4 mm *Salix aurita* (fig. 20 à 22)
- Bourgeons plus grands, dépassant 4 mm *Salix appendiculata* (fig. 14 à 16)



Fig. 11 - *S. alba*
(rameau glabrescent).



Fig. 12 - *S. alba*.



Fig. 13 - *S. alba*.



Fig. 14 - *S. appendiculata*.



Fig. 15 - *S. appendiculata*.



Fig. 16 - *S. appendiculata*.



Fig. 17 - *S. atrocinerea*.

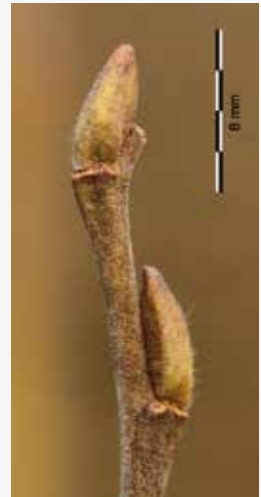


Fig. 18 - *S. atrocinerea*.



Fig. 19 - *S. atrocinerea*.



Fig. 20 - *S. aurita*.



Fig. 21 - *S. aurita*.



Fig. 22 - *S. aurita*.



Fig. 23 - *S. bicolor*
(bourgeons foliaires
et floraux).



Fig. 24 - *S. bicolor*
(bourgeon foliaire et
bourgeon floral atypique).



Fig. 25 - *S. bicolor*
(bourgeon floral typique).



Fig. 26 - *S. breviserrata*.



Fig. 27 - *S. breviserrata*.



Fig. 28 - *S. breviserrata*.



Fig. 29 - *S. caesia*.



Fig. 30 - *S. caesia*.



Fig. 31 - *S. caesia*.



Fig. 32 - *S. caprea*
(bourgeons floraux).



Fig. 33 - *S. caprea*
(bourgeons floraux
et foliaires).



Fig. 34 - *S. caprea*
(bourgeon foliaire).



Fig. 35 - *S. cinerea*
(rameaux de 1-2 ans).



Fig. 36 - *S. cinerea*
(bois strié sous l'écorce).



Fig. 37 - *S. cinerea*.



Fig. 38 - *S. daphnoides*
(rameau pruineux).



Fig. 39 - *S. daphnoides*
(bourgeon floral).



Fig. 40 - *S. daphnoides*
(bourgeon foliaire).



Fig. 41 - *S. elaeagnos*.



Fig. 42 - *S. elaeagnos*.



Fig. 43 - *S. elaeagnos*.



Fig. 44 - *S. foetida*.



Fig. 45 - *S. foetida*.



Fig. 46 - *S. foetida*.

Guide des espèces - 6. Clé d'identification des saules



Fig. 47 - *S. fragilis*.



Fig. 48 - *S. fragilis*.



Fig. 49 - *S. fragilis*.



Fig. 50 - *S. glaucosericea*.



Fig. 51 - *S. glaucosericea*.



Fig. 52 - *S. glaucosericea*.



Fig. 53 - *S. hastata*
(rameaux de l'année avec
bourgeons floraux et foliaires).



Fig. 54 - *S. hastata*
(bourgeons floraux).



Fig. 55 - *S. hastata*
(bourgeon floral).



Fig. 56 - *S. helvetica*.



Fig. 57 - *S. helvetica*.



Fig. 58 - *S. helvetica*.



Fig. 59 - *S. herbacea*.



Fig. 60 - *S. herbacea*.



Fig. 61 - *S. herbacea*.



Fig. 62 - *S. laggeri*.



Fig. 63 - *S. laggeri*
(rameau de 2 ans).



Fig. 64 - *S. laggeri*.



Fig. 65 - *S. myrsinifolia*
subsp. *alpicola* (rameau
de 2 ans glabre).



Fig. 66 - *S. myrsinifolia*
subsp. *alpicola* (rameau
de l'année très velu).



Fig. 67 - *S. myrsinifolia*
subsp. *alpicola*.



Fig. 68 - *S. myrsinifolia*
s. str. (rameaux de
1 et 2 ans).



Fig. 69 - *S. myrsinifolia*
s. str.



Fig. 70 - *S. myrsinifolia*
s. str.



Fig. 71 - *S. pentandra*.



Fig. 72 - *S. pentandra*
(chaton desséché présent
en hiver).



Fig. 73 - *S. pentandra*.



Fig. 74 - *S. purpurea*.



Fig. 75 - *S. purpurea*.



Fig. 76 - *S. purpurea*
(bourgeons alternes).



Fig. 77 - *S. repens*.



Fig. 78 - *S. repens*.



Fig. 79 - *S. repens*.



Fig. 80 - *S. reticulata*.



Fig. 81 - *S. reticulata*.



Fig. 82 - *S. reticulata*.



Fig. 83 - *S. retusa*.



Fig. 84 - *S. retusa*.



Fig. 85 - *S. retusa*.



Fig. 86 - *S. serpyllifolia*.



Fig. 87 - *S. serpyllifolia*.



Fig. 88 - *S. serpyllifolia*.



Fig. 89 - *S. triandra* (rameau de 2 ans).



Fig. 90 - *S. triandra*.



Fig. 91 - *S. triandra*.



Fig. 92 - *S. viminalis*.



Fig. 93 - *S. viminalis*.



Fig. 94 - *S. viminalis*.

Conclusion et annexes

Conclusion générale

Confronté à des contraintes toujours plus nombreuses et complexes, le génie végétal n'a pourtant cessé de se développer en Europe. Parmi les nombreuses réalisations connues figurent des réussites incontestables sur une grande variété de cours d'eau au régime hydrologique et au fonctionnement écologique des plus diversifiés. Pourtant, que d'occasions ratées où le génie végétal aurait pu satisfaire des objectifs sécuritaires et conservatoires. En lieu et place, certains ouvrages laissent des empreintes écologique et paysagère lourdes. Poids des habitudes, volonté de simplification et déficit de connaissances dans un domaine où la pluridisciplinarité est requise, manque de confiance dans des techniques novatrices, information et formation déficitaires, sont autant de raisons expliquant ce constat mitigé.

À une période où les concepts de développement durable, trames vertes et bleues et corridors biologiques conditionnent le développement territorial, le génie végétal constitue un outil incontournable. Il permet à des dispositifs de protection contre les risques naturels d'être, au-delà de simples ouvrages techniques, des aménagements contribuant à la conservation des espèces, la protection du paysage et la qualité de vie des citoyens. Cette multifonctionnalité des ouvrages est une qualité intrinsèque du génie végétal, outil d'avenir pour une gestion globale des cours d'eau et de la biodiversité des milieux aquatiques et riverains.

Château d'eau de l'Europe, haut lieu de biodiversité marqué par ses paysages à fort degré de naturalité, les Alpes endossent une responsabilité particulière en ces termes. Or, c'est une des régions où le génie végétal a été peu utilisé. Certes, les conditions hydrauliques, hydrologiques, topographiques ou climatiques souvent extrêmes ont pu dissuader les aspirations novatrices des gestionnaires. Malgré tout, le potentiel d'utilisation a été largement sous-estimé. C'est ce constat qui a rassemblé les différents partenaires du projet Géni'Alp, convaincus des nombreux avantages et potentialités du génie végétal.

Conscient de cette lacune, l'information et la promotion ont constitué l'un des deux points forts du projet. Si les chantiers pilotes en constituent la résultante concrète, cet ouvrage en est la synthèse, traitant les multiples facettes du savoir et du savoir-faire de cette science appliquée. Il marque une étape cognitive traitant de manière novatrice plusieurs thèmes liés à la gestion des cours d'eau montagnards et plus particulièrement :

- la rédaction de synthèses sur les aspects législatifs, politiques, hydrauliques et techniques propres à la mise en œuvre du génie végétal en régions de montagne ;
- la description de cinq aménagements à vocations démonstrative et expérimentale réalisés dans des conditions que l'on peut qualifier « d'extrêmes » sur les six que compte le projet ;
- la présentation de travaux comparant l'état de la biodiversité sur différents types d'aménagements végétaux par rapport aux ouvrages de génie civil et aux berges naturelles ;
- le premier guide francophone richement illustré présentant, outre les caractéristiques botaniques et écologiques des espèces, leurs aptitudes techniques et leur potentiel d'utilisation pour les aménagements d'altitude.

Par son contenu varié et sa portée biogéographique transnationale, cet ouvrage aspire à répondre à une diversité d'attentes et de publics pour que le génie végétal ne demeure pas la préoccupation de quelques spécialistes, mais soit à la portée de tous.

Résolument holistique dans sa démarche, son développement et sa mise en œuvre, le génie végétal s'insère néanmoins dans un cadre précis, circonscrit par certains principes et limites physiques. En effet, il demeure clairement subordonné aux possibilités d'attribution d'espaces de mobilité aux cours d'eau, dans la mesure où ces derniers n'interfèrent pas avec la sécurité des biens et des personnes, ainsi qu'aux contraintes mécaniques des contextes torrentiels. Par ailleurs, les capacités de résilience de l'hydrosystème fluvial et la grande complexité des processus en jeu à l'échelle du territoire imposent que sa mise en œuvre et ses impacts soient réfléchis à l'échelle du bassin versant ou, à défaut, d'un tronçon de cours d'eau.

Enfin, à l'achèvement de ces lignes demeure la conviction, qu'outre la promotion et la formation qu'il conviendra de poursuivre avec les outils élaborés (chantiers, panneaux, maquettes, plaquettes, livre), il y a encore beaucoup à faire. En effet, une tranche d'altitude entre 1 500 et 2 000 m est encore quasiment vierge de toute réalisation. Si les enjeux peuvent apparaître moindres, n'est-ce pas pour autant le lieu d'implantation de plusieurs centres de sports d'hiver ? Sur le plan botanique, la formation à la

reconnaissance hivernale des espèces présentées est à développer auprès des gestionnaires et entreprises réalisatrices, tout comme sur le plan scientifique la connaissance complémentaire de leur écologie, de leur génétique et de leurs aptitudes techniques. Des investigations complémentaires sont en effet nécessaires pour mieux identifier leurs limites de résistance comme celles des techniques utilisées. L'utilisation suppose, enfin, des facilités d'approvisionnement. Or, elles font encore défaut pour plusieurs espèces ligneuses ou herbacées structurantes d'écosystèmes riverains. Le développement de pépinières alpines est un enjeu majeur, tout comme la génétique des

populations qui identifiera les contours des principales populations alpines. Du concept à la conception, puis à l'action, et, inversement, de l'action jusqu'au concept, les contributions pragmatiques ou paradigmatiques à apporter sont multiples.

En ce début de XXI^e siècle, qui dans le domaine de la gestion de la Nature s'annonce être celui de la restauration écologique, parions que le génie végétal ait la même influence que le personnage mythologique ayant inspiré son nom, *Genius*, « *un esprit tutélaire qui présidait à la conception et à la destinée d'un homme* ».

Bibliographie partie I

- Abernethy B, Rutherford ID. 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilize stream banks? *Geomorphology* **23** : 55-75.
- Adam P, Debiais N, Gerber F, Lachat B. 2008. Le génie végétal. Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. La Documentation française, Paris, 292 p.
- Adam P, Malavoi JR, Debiais N. 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'Eau Seine Normandie, Nanterre, 293 p.
- Agence de l'Eau RM&C, GRAIE. 1999. La gestion intégrée des rivières : pour une approche globale, Volume 1, Agences de l'eau.
- Agence de l'Eau RM&C. 2007. Outils socio-économiques pour une nouvelle culture de l'eau, Guide technique n°10, Comité de Bassin Rhône-Méditerranée.
- Agence de l'Eau RM&C. 2011. L'état des eaux des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse 2010.
- Agence de l'Eau RM&C, DREAL Rhône-Alpes, ONEMA. 2009. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2010-2015, Comité de Bassin Rhône-Méditerranée.
- Angradi TR, Schweiger EW, Bolgrien DW, Ismert P, Selle T. 2004. Bank stabilization, riparian land use and the distribution of large woody debris in a regulated reach of the Upper Missouri River, North Dakota, USA. *River Research and Applications* **20** : 829-846.
- Bernard P. 1994. Les zones humides. Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques. Commissariat au Plan. La Documentation française, Paris, 391 p.
- Borland WM. 1960. Stream channel stability. United States Bureau of Reclamation, Denver.
- Bravard JP. 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières ? *La Houille Blanche* **7-8** : 515-521.
- Bravard JP, Landon N, Peiry JL, Piégay H. 1999. Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology* : 291-311.
- Christer N, Roland J. 1995. Floristic differences between riparian corridors of regulated and free-flowing boreal rivers. *Regulated Rivers : Research & Management* **11** : 55-66.
- Degoutte G. 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviale appliquée. Lavoisier, Paris, 394 p.
- Donat M. 1995. Bioengineering Techniques for Streambank Restoration - A Review of Central European Practices. Watershed Restoration Project Report 2. Ministry of Environment, Lands and Parks et Ministry of Forests, 86 p.
- EAWAG. 2010. La diversité des habitats et la richesse spécifique. *EAWAG News* **69** : 8-11.
- Everson DA, Boucher DH. 1998. Tree species-richness and topographic complexity along the riparian edge of the Potomac River. *Forest Ecology and Management* **109** : 305-314.
- Ferreira MT, Moreira IS. 1999. River plants from an Iberian basin and environmental factors influencing their distribution. *Hydrobiologia* **415** : 101-107.
- Ferro V, Porto P. 2011. Predicting the equilibrium bed slope in natural streams using a stochastic model for incipient sediment motion. *Earth Surface Processes and Landforms* **36** : 1007-1022.
- Fouque C, Ximénès MC, Barnaud G, Lévêq D, Broyer J. 2006. Les zones humides françaises : évolutions récentes - Première partie : les milieux. *Faune sauvage* **271** : 4-12.
- Fripp J, Hoag JC, Moody T. 2008. Streambank soil bioengineering : a proposed refinement of the definition. In *Riparian Wetland Project Information - October 2008*.
- Genin JR. 2009. Application de la télédétection pour la caractérisation des changements géomorphologiques d'une rivière en tresses. Université de Provence, Aix-en-Provence, 21 p.
- Gerber E, Krebs C, Murrell C, Moretti M, Rocklin R, Schaffner U. 2008. Exotic invasive knotweeds (*Fallopia spp.*) negatively affect native plant and invertebrate assemblages in European riparian habitats. *Biological Conservation* **141** : 646-654.
- Gilbert GK. 1914. The transportation of debris by running water. *US Geological Survey Professional Paper* **86** : 221.
- Gray D, Sotir R. 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization - A Practical Guide for Erosion Control. John Wiley and Sons, Inc., New-York, 378 p.
- Grelot F. 2004. Gestion collective des inondations : peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ? Cemagref, 383 p.
- Grelot F. 2009. L'évaluation économique du risque. In *Actes du colloque des 3 et 4 juin 2009 «Risque d'inondation : quels défis pour la recherche en appui à l'action publique ?»*, pp. 63-68. MEEDDM et Cemagref Lyon.
- INERIS, BRGM. 2007. Atlas des Risques Naturels Majeurs de l'Oise, Direction Départementale des Territoires de l'Oise.
- Jakob M, Bovis M, Oden M. 2005. The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency. *Earth Surface Processes and Landforms* **30** : 755-766.
- Köstler JN, Brueckner E, Bibelriether H. 1968. Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchung zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Paul Parey, Hamburg, 284 p.
- 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. Ministère de l'Environnement, Paris, 143 p.
- Landon N, Piégay H, Bravard JP. 1998. The Drôme river incision (France) : from assessment to management. *Landscape and Urban Planning* **43** : 119-131.
- Lane EW. 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers* **81** : 1-17.
- Larsen EW, Greco SE. 2002. Modeling channel management impacts on river migration : a case study of Woodson Bridge State Recreation Area, Sacramento River, California, USA. *Environmental Management* **30** : 209-224.
- Lévêq C. 1998. Biodiversity and management of inland aquatic ecosystems. *Revue des Sciences de l'Eau* **11** : 211-221.
- Liébault F. 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Université Lumière, Lyon, 358 p.
- Liébault F, Cassel M, Jantzi H, Tacon S, Talaska N. 2010. Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes. Cemagref, Grenoble, 27 p.
- Liébault F, Gomez B, Page M, Marden M, Peacock D, Richard D, Trotter CM. 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications* **21** : 739-756.
- Mackin JH. 1948. Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin* **59** : 463-512.
- Malavoi JR, Bravard JP. 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA, Vincennes, 224 p.
- Malavoi JR, Bravard JP, Piégay H, Hérouin E, Ramez P. 1998. Guide technique SDAGE n°2 : Méthode de délimitation de l'espace de liberté des cours d'eau. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse, 39 p.
- Malavoi JR, Garnier CC, Landon N, Recking A, Baran P. 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. ONEMA, Vincennes.
- Millar RG, Quick MC. 1993. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers. *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE* **119** : 1343-1363.
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable des Transports et du Logement (MEDDTL), Agences de l'eau, DIREN de bassin, SIEE. 2005. Synthèse des états des lieux 2004, MEDDTL.
- Montgomery DR, Buffington JM. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* **109** : 596-611.
- Montgomery DR, Buffington JM. 1998. Channel processes, classification, and response. In *River Ecology and Management*, pp 13-42. Eds Naiman R, Bilby R. Springer-Verlag, New-York.
- N'Guyen J. 2008. Acceptabilité socio-économique d'un espace de liberté pour la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin). Mémoire d'Ingénieur, ENGESS Strasbourg, CNRS.
- Nilsson C, Ekblad A, Dynesius M, Backe S, Gardfjell M, Carlberg B, Hellqvist S, Jansson R. 1994. Comparison of Species Richness and Traits of Riparian Plants between a Main River Channel and its Tributaries. *Journal of Ecology* **82** : 281-295.
- Nilsson C, Grelsson G, Johansson M. 1989. Patterns of plant species richness along riverbanks. *Ecology* **70** : 77-84.
- Office fédéral de l'environnement (OFEV). 2007. Directive Cadre sur l'Eau et législation suisse sur le contrôle de la pollution des eaux : comparatif. BAFU (EG-Wasserrahmenrichtlinie und Schweizer Wasser - und Gewässerschutzgesetzgebung : eine Gegenüberstellung, Auftrag des Bundesamtes für Umwelt).
- Office fédéral de l'environnement (OFEV). 2012. Gestion par bassin versant : guide pratique pour une gestion intégrée des eaux en Suisse. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). 2003. Idées directrices - Cours d'eau suisses : pour une politique de gestion durable de nos eaux, OFEFP/OFEG (éd.), OFAG, ARE, Berne.
- Pautou G, Girel J, Peiry JL, Hughes F, Richards K, Foussadier R, Garguet-Duport B, Harris T, Barsoum N. 1996. Les changements de végétation dans les hydrosystèmes fluviaux : l'exemple du haut Rhône et de l'Isère dans le Grésivaudan. *Revue d'Écologie Alpine* **3** : 41-66.
- Peiry JL, Salvador PG, Nouguier F. 1994. L'incision des rivières dans les Alpes du Nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon* **69** : 47-56.
- Piégay H, Alber A, Slater L, Bourdin L. 2009. Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences* **71** : 371-388.
- Piégay H, Darby SE, 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** : 773-789.
- Planty-Tabacchi A, Tabacchi E, Bonillo MS. 2001. Invasions of river corridors by exotic plant species : patterns and causes. In *Plant invasions : species ecology and ecosystem management*, pp 221-234. Eds Brundu G, Brock J, Camardam L, Child L, Wade M. Backhuys Publishers, Leiden.

- Prunier P, Garraud L, Köhler C, Lambelet C, Selvaggi A, Werner P. 2010. Distribution et régression de la petite massette (*Typha minima*) dans les Alpes. *Bot. Helv.* 120 : 43-52.
- Renöfält BM, Jansson R, Nilsson C. 2005. Spatial patterns of plant invasiveness in a riparian corridor. *Landscape Ecology* 20 : 165-176.
- Renöfält BM, Nilsson C, Jansson R. 2005. Spatial and temporal patterns of species richness in a riparian landscape. *Journal of Biogeography* 32 : 2025-2037.
- Saillard J. 2006. Préservation de l'espace de liberté de l'Allier sur le site Loire nature de Varennes/Moulins. In *Colloque Loire Nature - Pour une gestion durable d'un fleuve et de ses affluents - 7-9 novembre 2006*. Loire Nature.
- Schiechl HM. 1992. Weiden in der Praxis. Patzer Verlag, Berlin-Hanover, 130 p.
- Schiechl HM, Stern R. 1997. Water Bioengineering Techniques for Watercourse Bank and Shoreline Protection. Blackwell Science, Oxford, 186 p.
- Schnitzler-Lenoble A. 2007. Biodiversité végétale. In *Forêts alluviales d'Europe*. Tec et Doc, Paris, 388 p.
- Schumm SA. 1971. Fluvial Geomorphology: Channel adjustment and river metamorphosis. In *River Mechanics*, pp 5.1-5.22. Ed. Shen HW, Fort Collins.
- Surian N, Cisotto A. 2007. Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 : 1641-1656.
- Surian N, Rinaldi M. 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology* 50 : 307-326.
- Surell A. 1841. Etude sur les torrents des Hautes-Alpes, Tome 1. Dunod, Paris, 283 p.
- Wasson JG, Malavoi JR, Maridet L, Paulin L. 2000. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref.
- Wilcock P, Pitlick J, Cui Y. 2009. Sediment transport primer: estimating bed-material transport in gravel-bed rivers. In *General Technical Report*, p 78. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins.
- Wynn TM, Mostaghimi S. 2006. Effects of riparian vegetation on stream bank subaerial processes in southwestern Virginia, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 31 : 399-413.
- Zanetti C. 2010. Caractéristiques du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues, Thèse, Cemagref Aix-en-Provence, Université de Provence Aix-Marseille 1, Aix-en-Provence, 442 p.
- Zeh H. 2007. Génie biologique, manuel de construction. Société suisse du génie biologique et Fédération Européenne pour le génie biologique, Zurich, 441 p.
- Donat M. 1995. Bioengineering Techniques for Streambank Restoration - A Review of Central European Practices. Watershed Restoration Project Report 2. Ministry of Environment, Lands and Parks et Ministry of Forests, 86 p.
- EAWAG. 2010. La diversité des habitats et la richesse spécifique. *EAWAG News* 69 : 8-11.
- Everson DA, Boucher DH. 1998. Tree species-richness and topographic complexity along the riparian edge of the Potomac River. *Forest Ecology and Management* 109 : 305-314.
- Ferreira MT, Moreira IS. 1999. River plants from an Iberian basin and environmental factors influencing their distribution. *Hydrobiologia* 415 : 101-107.
- Ferro V, Porto P. 2011. Predicting the equilibrium bed slope in natural streams using a stochastic model for incipient sediment motion. *Earth Surface Processes and Landforms* 36 : 1007-1022.
- Fouque C, Ximénes MC, Barnaud G, Levet D, Broyer J. 2006. Les zones humides françaises : évolutions récentes - Première partie : les milieux. *Faune sauvage* 271 : 4-12.
- Fripp J, Hoag JC, Moody T. 2008. Streambank soil bioengineering: a proposed refinement of the definition. In *Riparian Wetland Project Information - October 2008*.
- Genin JR. 2009. Application de la télédétection pour la caractérisation des changements géomorphologiques d'une rivière en tresses. Université de Provence, Aix-en-Provence, 21 p.
- Gerber E, Krebs C, Murrell C, Moretti M, Rocklin R, Schaffner U. 2008. Exotic invasive knotweeds (*Fallopia spp.*) negatively affect native plant and invertebrate assemblages in European riparian habitats. *Biological Conservation* 141 : 646-654.
- Gilbert GK. 1914. The transportation of debris by running water. *US Geological Survey Professional Paper* 86 : 221.
- Gray D, Sotir R. 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization - A Practical Guide for Erosion Control. John Wiley and Sons, Inc., New-York, 378 p.
- Grelot F. 2004. Gestion collective des inondations : peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ? Cemagref, 383 p.
- Grelot F. 2009. L'évaluation économique du risque. In *Actes du colloque des 3 et 4 juin 2009 « Risque d'inondation : quels défis pour la recherche en appui à l'action publique ? »*, pp. 63-68. MEEDDM et Cemagref, Lyon.
- INERIS, BRGM. 2007. Atlas des Risques Naturels Majeurs de l'Oise, Direction Départementale des Territoires de l'Oise.
- Jakob M, Bovis M, Oden M. 2005. The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency. *Earth Surface Processes and Landforms* 30 : 755-766.
- Köstler JN, Brueckner E, Bibelriether H. 1968. Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchung zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Paul Parey, Hamburg, 284 p.
- 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. Ministère de l'Environnement, Paris, 143 p.
- Landon N, Piégay H, Bravard JP. 1998. The Drôme river incision (France) : from assessment to management. *Landscape and Urban Planning* 43 : 119-131.
- Lane EW. 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers* 81 : 1-17.
- Larsen EW, Greco SE. 2002. Modeling channel management impacts on river migration: a case study of Woodson Bridge State Recreation Area, Sacramento River, California, USA. *Environmental Management* 30 : 209-224.
- Lévêque C. 1998. Biodiversity and management of inland aquatic ecosystems. *Revue des Sciences de l'Eau* 11 : 211-221.
- Liébaud F. 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Université Lumière, Lyon, 358 p.
- Liébaud F, Cassel M, Jantzi H, Tacon S, Talaska N. 2010. Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes. Cemagref, Grenoble, 27 p.
- Liébaud F, Gomez B, Page M, Marden M, Peacock D, Richard D, Trotter CM. 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications* 21 : 739-756.
- Mackin JH. 1948. Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin* 59 : 463-512.
- Malavoi JR, Bravard JP. 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale. ONEMA, Vincennes, 224 p.
- Malavoi JR, Bravard JP, Piégay H, Hérouin E, Ramez P. 1998. Guide technique SDAGE n°2 : Méthode de délimitation de l'espace de liberté des cours d'eau. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse, 39 p.
- Malavoi JR, Garnier CC, Landon N, Recking A, Baran P. 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. ONEMA, Vincennes.
- Millar RG, Quick MC. 1993. Effect of bank stability on geometry of gravel rivers. *Journal of Hydraulic Engineering - Asce* 119 : 1343-1363.
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable des Transports et du Logement (MEDDTL), Agences de l'eau, DIREN de bassin, SIEE. 2005. Synthèse des états des lieux 2004, MEDDTL.

Bibliographie partie II

- Abernethy B, Rutherford ID. 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilise stream banks? *Geomorphology* 23 : 55-75.
- 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. Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. La Documentation française, Paris, 292 p.
- Adam P, Malavoi JR, Debais N. 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'Eau Seine Normandie, Nanterre, 293 p.
- Agence de l'Eau RM&C, GRAIE. 1999. La gestion intégrée des rivières : pour une approche globale, Volume 1, Agences de l'eau.
- Agence de l'Eau RM&C. 2007 Outils socio-économiques pour une nouvelle culture de l'eau, Guide technique n°10, Comité de Bassin Rhône-Méditerranée.
- Agence de l'Eau RM&C. 2011. L'état des eaux des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse 2010.
- Agence de l'Eau RM&C, DREAL Rhône-Alpes, ONEMA. 2009. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2010-2015, Comité de Bassin Rhône-Méditerranée.
- Angradi TR, Schweiger EW, Bolgrien DW, Ismert P, Selle T. 2004. Bank stabilization, riparian land use and the distribution of large woody debris in a regulated reach of the Upper Missouri River, North Dakota, USA. *River Research and Applications* 20 : 829-846.
- Bernard P. 1994. Les zones humides. Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques. Commissariat au Plan. La Documentation française, Paris, 391 p.
- Borland WM. 1960. Stream channel stability. United States Bureau of Reclamation, Denver.
- Bravard JP. 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux : quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières ? *La Houille Blanche* 7-8 : 515-521.
- Bravard JP, Landon N, Peiry JL, Piégay H. 1999. Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers. *Geomorphology* : 291-311.
- Christer N, Roland J. 1995. Floristic differences between riparian corridors of regulated and free-flowing boreal rivers. *Regulated Rivers : Research & Management* 11 : 55-66.
- Degoutte G. 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Hydraulique et morphologie fluviale appliquée. Lavoisier, Paris, 394 p.

Montgomery DR, Buffington JM. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* **109** : 596-611.

Montgomery DR, Buffington JM. 1998. Channel processes, classification, and response. In *River Ecology and Management*, pp 13-42. Eds Naiman R, Bilby R. Springer-Verlag, New-York.

N'Guyen J. 2008. Acceptabilité socio-économique d'un espace de liberté pour la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin). Mémoire d'Ingénieur, ENGESS Strasbourg, CNRS.

Nilsson C, Ekblad A, Dynesius M, Backe S, Gardfjell M, Carlberg B, Hellqvist S, Jansson R. 1994. Comparison of Species Richness and Traits of Riparian Plants between a Main River Channel and Its Tributaries. *Journal of Ecology* **82** : 281-295.

Nilsson C, Grelsson G, Johansson M. 1989. Patterns of plant species richness along riverbanks. *Ecology* **70** : 77-84.

Office fédéral de l'environnement (OFEV). 2007. Directive Cadre sur l'Eau et législation suisse sur le contrôle de la pollution des eaux : comparatif. BAFU (EG-Wasserrahmenrichtlinie und Schweizer Wasser - und Gewässerschutzgesetzgebung: eine Gegenüberstellung, Auftrag des Bundesamtes für Umwelt).

Office fédéral de l'environnement (OFEV). 2012. Gestion par bassin versant : guide pratique pour une gestion intégrée des eaux en Suisse. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). 2003. Idées directrices - Cours d'eau suisses : pour une politique de gestion durable de nos eaux, OFEFP/OFEG (éd.), OFAG, ARE, Berne.

Pautou G, Girel J, Peiry JL, Hughes F, Richards K, Foussadier R, Garguet-Duport B, Harris T, Barsoum N. 1996. Les changements de végétation dans les hydrosystèmes fluviaux : l'exemple du haut Rhône et de l'Isère dans le Grésivaudan. *Revue d'Écologie Alpine* **3** : 41-66.

Peiry JL, Salvador PG, Nouguier F. 1994. L'incision des rivières dans les Alpes du Nord : état de la question. *Revue de Géographie de Lyon* **69** : 47-56.

Piégay H, Alber A, Slater L, Bourdin L. 2009. Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences* **71** : 371-388.

Piégay H, Darby SE, 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** : 773-789.

Planty-Tabacchi A, Tabacchi E, Bonillo MS. 2001. Invasions of river corridors by exotic plant species: patterns and causes. In *Plant invasions: species ecology and ecosystem management*, pp 221-234. Eds Brundu G, Brock J, Camardam L, Child L, Wade M. Backhuys Publishers, Leiden.

Renöfält BM, Jansson R, Nilsson C. 2005. Spatial patterns of plant invasiveness in a riparian corridor. *Landscape Ecology* **20** : 165-176.

Renöfält BM, Nilsson C, Jansson R. 2005. Spatial and temporal patterns of species richness in a riparian landscape. *Journal of Biogeography* **32** : 2025-2037.

Saillard J. 2006. Préservation de l'espace de liberté de l'Allier sur le site Loire nature de Varennes/Moulins. In *Colloque Loire Nature - Pour une gestion durable d'un fleuve et de ses affluents - 7-9 novembre 2006*. Loire Nature.

Schiechtl HM. 1992. Weiden in der Praxis. Patzer Verlag, Berlin-Hanover, 130 p.

Schiechtl HM, Stern R. 1997. Water Bioengineering Techniques for Watercourse Bank and Shoreline Protection. Blackwell Science, Oxford, 186 p.

Schnitzler-Lenoble A. 2007. Biodiversité végétale. In *Forêts alluviales d'Europe*. Tec et Doc, Paris, 388 p.

Schumm SA. 1971. Fluvial Geomorphology : Channel adjustment and river metamorphosis. In *River Mechanics*, pp 5.1-5.22. Ed. Shen HW, Fort Collins.

Surian N, Cisotto A. 2007. Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* **32** : 1641-1656.

Surian N, Rinaldi M. 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology* **50** : 307-326.

Surell A. 1841. Etude sur les torrents des Hautes-Alpes, Tome 1. Dunod, Paris, 283 p.

Wasson JG, Malavoi JR, Maridet L, Paulin L. 2000. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref.

Wilcock P, Pittlick J, Cui Y. 2009. Sediment transport primer : estimating bed-material transport in gravel-bed rivers. In *General Technical Report*, p 78. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins.

Wynn TM, Mostaghimi S. 2006. Effects of riparian vegetation on stream bank subaerial processes in southwestern Virginia, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* **31** : 399-413.

Zanetti C. 2010. Caractéristiques du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues, Thèse, Cemagref Aix-en-Provence, Université de Provence Aix-Marseille 1, Aix-en-Provence, 442 p.

Zeh H. 2007. Génie biologique, manuel de construction. Société suisse du génie biologique et Fédération européenne pour le génie biologique, Zurich, 441 p.

Bibliographie partie III

Adriaens A. 1993. A study of the influence of environmental factors on the growth of *Salix aurita* in the Hautes-Fagnes Nature Reserve (Belgium). *Belgian Journal of Botany* **126** : 71-80.

Aeschmann D, Burdet HM. 1994. Flore de la Suisse et des territoires limitrophes. Le nouveau Binz, 2^e éd. Griffon, Neuchâtel, 603 p.

Aeschmann D, Lauber K, Moser DM, Theurillat JP. 2004. Flora Alpina. Vol. 1-3. Belin, Paris.

Ambroży S. 2010. Annual dynamics of natural regeneration of silver birch (*Betula pendula* Roth) on a research plot located in the area of forest decline in the Silesian Beskid Mountains. *Folia Forestalia Polonica* **52(2)** : 76-82.

Barker DH (ed.). 1995. Vegetation and slopes. Institution of civil engineers, Thomas Telford Ltd., London, 297 p.

Beismann H, Wilhelmi H, Bailleres H, Spatz HC, Bogenrieder A, Speck T. 2000. Brittleness of twig bases in the genus *Salix*: fracture mechanics and ecological relevance. *Journal of Experimental Botany* **51** : 617-633.

Bidat M. 2009. Inventaire des zones humides de l'aire optimale d'adhésion du Parc National de la Vanoise. Thèse de Bachelor, Filière Gestion de la Nature. hepia / PN Vanoise, Lullier, 38 p.

Busing RT, Slabaugh PE. 2008. *Hippophae rhamnoides* L. common sea-buckthorn. The woody Plant Seed Manual. USDA Forest Service. *Agric. Handbk.* **727** : 588-590.

CBNA, CBNMC. 2011. Catalogue de la flore vasculaire de la région Rhône-Alpes. 7 p.

Charpin A, Jordan D. 1990-1992. Catalogue floristique de la Haute-Savoie. Vol. 1-2. Mémoires de la Société botanique de Genève.

Crosaz Y. 2005. Lutte contre l'érosion des terres noires en montagne méditerranéenne. Connaissance du matériel végétal herbacé et quantification de son impact sur l'érosion. Cemagref, Grenoble, 244 p.

Crosaz Y, Dinger F. 1999. Mesure de l'érosion sur ravines élémentaires et essais de végétalisation. Bassin versant expérimental de Draix. *Congrès « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne » - Actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne, 22-24 octobre 1997* : 103-118.

Delahaye T, Prunier P. 2006. Inventaire commenté et liste rouge des plantes vasculaires de Savoie. Bulletin spécial n°2 de la Société Mycologique et Botanique de la Région Chambérienne, 106 p.

Delarze R, Gonzeth Y. 2008. Guide des milieux naturels de Suisse. Rossolis, Bussigny, 424 p.

Dinger F. 1997. Végétalisation des espaces dégradés en altitude. Cemagref, Grenoble, 144 p.

Donat M. 1995. Bioengineering Techniques for Streambank Restoration - A Review of Central European Practices. Watershed Restoration Project Report 2. Ministry of Environment, Lands and Parks et Ministry of Forests, 86 p.

Eggenberg S, Möhl A. 2008. Flora Vegetativa : un guide pour déterminer les plantes de Suisse à l'état végétatif. Rossolis, Bussigny, 680 p.

Eschrich W. 1992. Gehölze im Winter: Zweige und Knospen. G. Fischer, Stuttgart, 136 p.

Florineth F. 2004. Pflanzen statt Beton: Handbuch zur Ingenieurbioogie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag, Berlin-Hannover, 272 p.

Florineth F, Rauch HP, Staffer H. 2002. Stabilization of landslides with bioengineering measures in south Tyrol/Italy and Thankot/Nepal. *International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim. Matsumoto/Japan. Congress publication* **2** : 827-837.

Francis RA, Gurnell AM, Petts GE, Edwards PJ. 2005. Survival and growth responses of *Populus nigra*, *Salix elaeagnos* and *Alnus incana* cuttings to varying levels of hydric stress. *Forest Ecology and Management* **210** : 291-301.

Graf C, Böll A, Graf F. 2003. Des plantes pour lutter contre l'érosion et les glissements en surface. Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf, *Not. Prat.* **37** : 1-8.

Gillet F, Foucault B, Julve P. 1991. La phytosociologie synusiale intégrée : objets et concepts. *Candollea* **46** : 315-340.

Godet J-D. 1989. Guide des bourgeons de nos arbres, arbustes, arbrisseaux : guide d'identification de 150 espèces. Delachaux et Niestlé, Paris, 430 p.

Greulich F. 2008. Contribution à l'étude de la dynamique de régénération des saulaies des bancs d'alluvions du Haut-Rhône français. Dipl. Ing. HES, Filière Gestion de la Nature. École d'Ingénieurs de Lullier, Lullier, 76 p.

Greutert S. 2011. Sélection de graminées pour l'utilisation en génie végétal dans les biotopes des cours d'eau de montagne. Thèse de Bachelor, Filière Gestion de la Nature. hepia, Lullier, 50 p.

Hipps NA, Higgs KH, Collard LG. 1996. The effect of irrigation and root pruning on the growth of sycamore (*Acer pseudoplatanus*) seedlings in nursery beds and after transplantation. *Journal of Horticultural Science* **71** : 819-828.

Hörandl E, Florineth F, Hadacek F. 2002. Weiden in Österreich und angrenzenden Gebieten. Arbeitsbereich Ingenieurbioogie u. Landschaftsbau, Univ. Bodenkultur Wien, Wien.

- Hughes FMR, Johansson M, Xiong SJ, Carlborg E, Hawkins D, Svedmark M, Hayes A, Goodall A, Richards KS, Nilsson C. 2010. The influence of hydrological regimes on sex ratios and spatial segregation of the sexes in two dioecious riparian shrub species in northern Sweden. *Plant Ecology* **208** : 77-92.
- Hytonen J, Saarsalmi A. 2009. Long-term biomass production and nutrient uptake of birch, alder and willow plantations on cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* **33** : 1197-1211.
- Isselin-Nondedeu F. 2005. Déterminismes géomorphologique et fonctionnels de la distribution des plantes dans les milieux d'altitude : essai d'éco-géomorphologie. Thèse de doctorat. Cemagref, Grenoble, 302 p.
- Jalas J, Suominen J, Lampinen R, Kurtto A (eds.). 1972-1999. Atlas Florae Europaea. Distribution of vascular plants in Europe. Vol. 1-12. The Committee for Mapping the Flora of Europe, Helsinki.
- Jensen M. 2003. Effect of Seed Maturity and Pretreatment on Dormancy and Germination of *Sorbus mougeotii* Seeds. *Scandinavian Journal of Forest Research* **18** : 479-486.
- Karrenberg S, Blaser S, Kollmann J, Speck T, Edwards PJ. 2003. Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment. *Functional Ecology* **17** : 170-177.
- Kerr G, Cahalan C. 2004. A review of site factors affecting the early growth of ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Forest Ecology and Management* **188** : 225-234.
- Kölher C. 2006. Recherche de sites favorables pour la réimplantation de *Typha minima* Hoppe dans le canton de Genève. Dipl. Ing. HES, Filière Gestion de la Nature. École d'Ingénieur de Lullier, Lullier.
- Krautzer B, Peratoner G, Bozzo F. 2004. Site-Specific Grasses and Herbs: Seed production and use for restoration of mountain environments. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 111 p.
- Krautzer B, Graiss W, Poetsch EM. 2005. Evaluation of seed mixtures for subalpine pastures. Proceedings of the 13th International Occasional Symposium of European Grassland Federation, Tartu, Estonia August 2005. *Grassland Science in Europe* **10** : 186-189.
- Kurtto A, Lampinen R (eds.). 2004-2010. Atlas Florae Europaea. Distribution of Vascular Plants in Europe. Vol. 13-15. The Committee for Mapping the Flora of Europe et Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki.
- Kutschera I, Lichtenegger E. 2002. Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Leopold Stocker Verlag, Graz, Stuttgart, 604 p.
- Lachat B. 1994. Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales. Ministère de l'environnement, Paris, 143 p.
- Lauber K, Wagner G. 1998. Flora Helvetica : Flore illustrée de Suisse. 2^e éd. Haupt, Berne-Stuttgart-Vienne, 1616 p.
- Lautenschlager-Fleury D, Lautenschlager E. 1994. Die Weiden von Mittel- und Nordeuropa: Bestimmungsschlüssel und Artbeschreibungen für die Gattung 'Salix' L. Birkhäuser, Basel, 171 p.
- Lavaine C, Evette A, Piégay H, Brahic P. 2011. Génie végétal contre l'érosion des berges de cours d'eau dans un contexte de changement climatique : quelles nouvelles espèces utiliser ? Rencontres Interdisciplinaires Doctorales de l'Aménagement Durable 2011, 16 p.
- Lavaine C, Evette A, Piégay H, Lachat B, Brahic P. 2011. Les Tamaricées en génie végétal. Sciences, Eaux et Territoire, Hors-série n°4, Cemagref, 9 p.
- Li TSC, Beveridge THJ (avec la contribution de Oomath BD, Schroeber WR, Small E). 2004. Production et utilisation de l'argousier (*Hippophae rhamnoides* L.). Presses scientifiques du CNRC, Ottawa (Ontario), Canada, 145 p.
- Morgan RPC, Rickson J (Eds.). 1995. Slope Stabilization and Erosion Control : A Bioengineering Approach. London, Spon Ed., 274 p.
- Moser D, Gygax A, Bäumler B, Wyler N, Palese R. 2002. Liste Rouge des fougères et plantes à fleurs menacées de Suisse. Ed. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne/Centre du Réseau Suisse de Floristique, Chambésy/Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, Chambésy. Série OFEFP L'environnement pratique, 118 p.
- Moor M. 1958. Pflanzengesellschaften schweizerischer Flussauen. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.* **34** : 221-360.
- Norris JE, Stokes A, Mickovski SB, Cammeraat E, van Beek R, Nicoll BC, Achim A. 2008. Slope stability and Erosion Control : Ecotechnological Solutions. Springer, Dordrecht, 287 p.
- Pandeva D. 2006. Ecologically and economically valuable forms of sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) in the Balkan Mountains. *Genetics and Breeding* **35** : 21-28.
- Pantke R. 1997. Die Datenbank Vegetation der Schweiz (Pflanzengesellschaften der Schweiz). *Bulletin de l'Association suisse de Phytosociologie* **1** : 6.
- Peratoner G, Spatz G. 2004. Organic Seed Propagation of *Festuca nigrescens* Lam. (*Festuca rubra* ssp. *commutata* Gaud.). *Pflanzenbauwissenschaften* **8** : 40-46.
- Prunier P, Köhler C, Lambelet C, Frossard PA. (2010). Espèces caractéristiques et positionnement syntaxonomique des communautés à petite massette (*Typha minima*) : une contribution au choix des sites de réintroduction d'une espèce alluviale menacée. *Bot. Helv.* **120** : 95-103.
- Rameau J-C, Mansion D, Dumé S. 1993. Flore Forestière Française, Montagnes. Institut pour le Développement Forestier, Paris, 2421 p.
- Regvar M, Vogel-Mikuš K, Kugonič N, Turk B, Batič F. 2006. Vegetational and mycorrhizal successions at a metal polluted site : indications for the direction of phytostabilisation. *Environmental Pollution* **144** : 976-984.
- Rey F, Berger F, Quézel C, Le Hir C. 2003. Le rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres. *Ingénieries EAT, Risques naturels et aménagement du territoire n° spécial* : 165-178.
- Roulier C. 1998. Typologie et dynamique de la végétation des zones alluviales de Suisse. *Mat. Levé géobot. de la Suisse* **72**.
- Rousseau H. 2002. Développement des techniques de reproduction végétative et essais de cultivars d'argousiers. Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, Québec, 35 p.
- Sartoretti X. 2009. Ouvrages de génie végétal en cours d'eau de montagne - Sélection d'un choix de végétaux ligneux et herbacés particulièrement adaptés, sur la base d'analyses de modèles naturels. Thèse de Bachelor, Filière Gestion de la Nature. hepia, Lullier, 54 p.
- Schiechtl HM. 1973. Sicherungsarbeiten Im Landschaftsbau: Grundlagen, Lebende Baustoffe, Methoden. Callwey, München, 144 p.
- Schiechtl HM. 1992. Weiden in der Praxis. Patzer Verlag, Berlin-Hannover, 130 p.
- Schiechtl HM, Stern R. 1997. Water Bioengineering Techniques for Watercourse Bank and Shoreline Protection. Blackwell Science, Oxford, 186 p.
- Schulz B. 1999. Gehölzbestimmung im Winter. Ulmer, Stuttgart, 329 p.
- Steiger P. 2010. Wälder der Schweiz. Von Lindengrün zu Lärchengold. Vielfalt der Waldbilder und Waldgesellschaften in der Schweiz. Ott Verlag, Thun, 464 p.
- Stewart WDP, Pearson MC. 1967. Nodulation and nitrogen fixation by *Hippophae rhamnoides* in the field. *Plant and Soil* **26** : 348-360.
- Stokes A, Spanos I, Norris EJ, Cammeraat E. 2007. Eco- and Ground Bio-Engineering: the use of vegetation improve slope Stability. Proceeding of the first International Conference on Eco-Engineering, 13-17 September 2004. Springer, Dordrecht.
- Tutin TG (ed.). 1964-1980. Flora Europaea. Vol. 1-5. Cambridge University Press.
- Vittoz P, Engler R. 2007. Seed dispersal distances: a typology based on dispersal modes and plant traits. *Bot. Helv.* **117** : 109-124.
- Vogt UK. 2001. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. *Journal of Experimental Botany* **52** : 1527-1536.
- Wiedmer E, Senn-Irlet B. 2006. Biomass and primary productivity of an *Alnus viridis* stand - A case study from the Schächental valley, Switzerland. *Botanica Helvetica* **116** : 55-64.
- Zeh H. 2007. Génie biologique, manuel de construction. Société suisse du génie biologique et Fédération Européenne pour le génie biologique, 442 p.
- Zoller H. 1974. Flora und Vegetation der Inntalauen zwischen Scuol und Martina (Unterengadin). *Ergebn. Wiss. Unters. Schweiz. Nationalpark* **12** : 1-209.
- Zouaoui HI. 2011. La quantification de l'évaporation dans le genre *Salix* : une contribution à la renaturation et à la revitalisation des cours d'eau. Maîtrise Universitaire en Sciences de l'Environnement. Université de Genève. Institut des Sciences de l'Environnement. Genève, 89 p.

Sites Internet

Centre national de données et d'informations sur la flore de Suisse

<http://www.infoflora.ch/fr/>

Commission suisse pour la conservation des plantes sauvages

<http://www.cps-skew.ch>

European Grassland Federation (EGF)

<http://www.europeangrassland.org/>

Forestry Commission (UK)

<http://www.forestry.gov.uk/>

Institut national de l'information géographique et forestière

<http://www.ifn.fr/>

Inventaire national du Patrimoine naturel

<http://inpn.mnhn.fr/accueil/index>

Législation française :

<http://www.legifrance.gouv.fr/>

Législation suisse

<http://www.admin.ch/>

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

<http://agriculture.gouv.fr/>

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

Office fédéral de l'environnement (OFEV).

<http://www.bafu.admin.ch/>

Tela Botanica – Le réseau de la botanique francophone

<http://www.tela-botanica.org>

US Forest Service

<http://www.fs.fed.us/database/feis/plants/>

Lexique botanique

Abrouissement

Consommation des jeunes pousses des arbres et arbustes par le bétail ou le gibier.

Accru forestier

Végétation forestière pionnière colonisant naturellement des surfaces ouvertes abandonnées (prairies, landes, etc.).

Acidicline

Qui se développe préférentiellement sur les substrats et sols acides.

Acidiphile

Qui se développe exclusivement sur les substrats et sols acides.

Acrotonie

Mode de croissance marqué par une élongation privilégiée du bourgeon apical de la tige principale lors des premiers stades de développement (≠ basitonie).

Acuminé-ée

Terminé brusquement par une pointe allongée et fine (*Salix daphnoides* – fig. 4 p. 240).

Adventif-ive

Se dit d'un organe (bourgeon ou racine) se développant à un endroit inhabituel sur la plante. Les racines adventives se développent ainsi sur des tiges aériennes.

Aile

1. Chacun des deux pétales latéraux chez les fabacées.
2. Chacune des expansions latérales d'un organe cylindrique (le plus souvent une tige ou un pétiole).

Akène

Fruit sec indéhiscent contenant une seule graine (*Petasites*, *Leontodon* – fig. 6 p. 215).

Anémochore

Se dit des graines ou des fruits secs dispersés par le vent (*Epilobium*, *Petasites*).

Anthère

Chacune des parties terminales de l'étamine produisant le pollen.

Apex

Extrémité d'une tige, d'un bourgeon, d'une feuille ou d'une racine (fig. 2 p. 200).

Apical-ale

Qui est situé à l'extrémité, à l'apex. Se dit notamment du bourgeon terminal situé au sommet d'un rameau (fig. 3 p. 208).

Appliqué-ée

Se dit de poils ou de bourgeons qui sont plaqués sur une feuille ou une tige (*Salix alba* – fig. 13 p. 294) (≠ étalé, divergent).

Aranéoux-euse

Qui est couvert de poils fins enchevêtrés comme une toile d'araignée (*Salix elaeagnos* – fig. 3 p. 242).

Arbrisseau

Plante ligneuse ramifiée dès la base et ne dépassant ordinairement pas 4 m de hauteur à l'âge adulte.

Arbuste

Plante ligneuse à tige simple ne dépassant pas 7 m de hauteur à l'âge adulte.

Ascendant-ante

Se dit d'une tige ou d'un rameau arqué à la base puis redressé (*Phleum alpinum* – fig. 2 p. 222).

Autécologie

Étude des exigences écologiques (facteurs biotiques ou abiotiques) des végétaux pris séparément dans leur milieu.

Axillaire

Qui est situé latéralement (à l'aisselle) par rapport à un autre organe. Se dit généralement d'un bourgeon, d'une feuille ou d'une bractée (fig. 3 p. 230).

Basicline

Qui se développe préférentiellement sur les substrats et sols alcalins.

Basilaire

Qui se développe à la base d'une plante ou de l'une de ses ramifications.

Basiphile

Qui se développe exclusivement sur les substrats et sols alcalins.

Basitonie

Mode de croissance marqué par une vitesse d'élongation analogue des bourgeons apicaux et axillaires lors des premiers stades de développement (≠ acrotonie).

Biocénose

Ensemble des êtres vivants coexistant dans des conditions abiotiques définies (biotope). La phytocénose correspond à l'ensemble des végétaux coexistant dans une station donnée.

Biotope

Ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème.

Bractée

Petite feuille ou écaille implantée à la base d'une fleur, de son pédicelle ou d'une inflorescence (fig. 5 p. 186).

Caduc-uque

Qui est renouvelé périodiquement. Se dit essentiellement du feuillage (≠ persistant).

Caducifolié-ée

À feuilles caduques.

Calcarifère

Se dit d'un substrat contenant du calcaire (= carbonaté).

Calcicole

Se dit d'une espèce ou d'une végétation qui se développe sur des sols riches en calcium.

Calcifuge

Se dit d'une espèce ou d'une végétation qui ne se développe pas sur des sols riches en calcium.

Calice

Ensemble des sépales d'une fleur.

Canaliculé-ée

Creusé d'un sillon en forme de canal ou de gouttière (*Poa alpina* – fig. 3 p. 224).

Cannelé-ée

Se dit d'un organe cylindrique muni de côtes longitudinales séparées par des sillons larges et réguliers (*Salix triandra* – fig. 2 p. 260).

Capitule

Inflorescence composée d'un ensemble compact de fleurs terminales sessiles insérées sur un réceptacle élargi. Le capitule simule une seule fleur (*Petasites*, *Leontodon* – fig. 1 p. 214).

Capsule

Fruit à une ou plusieurs loges renfermant ordinairement plusieurs graines et s'ouvrant par des pores ou plusieurs fentes longitudinales (*Salix* – fig. 7 p. 259).

Caréné-ée

Pourvu d'une carène (*Poa alpina* – fig. 3 p. 224).

Carène

1. Saillie longitudinale à section triangulaire, en forme de proue de bateau.
2. Ensemble de deux pétales inférieurs soudés chez les fabacées, rappelant la proue d'un bateau.

Cariçaie

Groupement végétal de milieux humides dominé par les laiches (fig. 7 p. 201).

Caulinaire

Relatif à la tige. Se dit le plus souvent d'un organe inséré sur une tige.

Cépée

Touffe de tiges issues des rejets de souche (traitement en cépée des plantations par recépage – fig. 9 p. 239).

Cespiteux-euse

Qui forme des touffes denses (*Deschampsia cespitosa* – fig. 1 p. 202).

Climax

Stade d'équilibre et de maturité d'un écosystème, relativement stable et conditionné par les seuls facteurs climatiques et/ou édaphiques.

Cordiforme

En forme de cœur (*Petasites* – fig. 4 p. 277) (= cordé).

Corolle

Ensemble des pétales d'une fleur.

Corymbe

Inflorescence formée de fleurs sensiblement situées sur un même plan et portées par des pédicelles de longueur inégale (à la différence de l'ombelle).

Crénelé-ée

Bordé de dents obtuses ou arrondies. Se dit le plus souvent de la marge des feuilles (*Ribes alpinum* – fig. 5 p. 228).

Cryophile

Qui se développe dans des stations froides (≠ thermophile).

Cultivar

Variété cultivée. La variété « *Nana* » est un cultivar de *Salix purpurea*.

Cyme

Inflorescence composée d'une fleur centrale, la plus ancienne, et d'un ou deux axes latéraux la dépassant.

Déalpin-ine

Se dit d'une espèce orophile se développant en situation de piémont ou de plaine.

Décombant-ante

Retombant dans sa partie terminale. Se dit d'une tige dressée à la base et arquée vers le sol à son extrémité.

Décussé-ée

Se dit de feuilles opposées insérées alternativement à angle droit les unes par rapport aux autres (fig. 9a p. 288).

Denté-ée

Bordé de dents pointues ordinairement orientées perpendiculairement à l'axe de la feuille (*Alnus incana* – fig. 4 p. 182) (≠ entier).

Denticulé-ée

Bordé de petites dents aiguës (ou denticules) dirigées vers l'avant (*Prunus padus* – fig. 4 p. 226).

Diaspore

Organe végétal susceptible de donner naissance à un nouvel individu (graine, fruit, tige, bulbille, spore, etc.).

Dioïque

Se dit d'une espèce unisexuée dont les fleurs mâles et femelles sont présentes sur des pieds différents. Toutes les espèces de saule sont dioïques (≠ monoïque).

Drageon

Tige se développant sur une racine (*Hippophae rhamnoides* – fig. 7 p. 211).

Écaille

Élément membraneux, souvent coriace, couvrant ou protégeant différents types d'organes (bourgeons, fleurs, inflorescences).

Écosystème

Ensemble dynamique d'organismes vivants (biocénose) interagissant entre eux et avec leur environnement physique (biotope).

Édaphique

Relatif au sol.

Enchevêtré-ée

Entremêlé de façon désordonnée (*Salix hastata* – fig. 55 p. 297).

Entier-ière

À marge non dentée, lisse. Se dit notamment des feuilles (*Salix helvetica* – fig. 4 p. 250) (= indivis).

Épi

Inflorescence formée d'un axe portant des fleurs ou des épillets sessiles ou subsessiles (*Brachypodium rupestre* – fig. 5 p. 195).

Épillet

Unité élémentaire de l'inflorescence des graminées, constituée d'une ou plusieurs fleurs entourées à leur base de une à deux glumes (*Brachypodium rupestre* – fig. 6 p. 195).

Étamine

Organe mâle de la fleur composé du filet et de l'anthère produisant le pollen (*Salix purpurea* – fig. 6 p. 261).

Étendard

Pétale supérieur des légumineuses (*Onobrychis montana* – fig. 4 p. 220).

Eutrophe

Qualifie un sol ou une eau libre riche en éléments nutritifs, généralement non ou faiblement acide et permettant une forte activité biologique (≠ oligotrophe).

Filet

Filament fixé au réceptacle floral supportant l'anthère.

Foliacé-ée

Ayant l'aspect d'une feuille.

Foliole

Division unitaire indépendante d'une feuille composée (*Trifolium badium* – fig. 5 p. 268).

Fourrés

Peuplement pré-forestier dense et peu pénétrable composé d'arbustes et d'arbrisseaux (fig. 8 p. 233).

Friche

État d'un terrain, antérieurement cultivé, après quelques années d'abandon des pratiques agricoles.

Fusiforme

En forme de fuseau (mince et pointu aux extrémités) (*Sorbus aucuparia* – fig. 3 p. 264).

Gaine

Manchon cylindrique situé à la base d'une feuille ou d'une bractée et enveloppant plus ou moins la tige (*Achnatherum calamagrostis* – fig. 3 p. 176).

Genouillé-ée

Se dit d'un organe arqué, comme un genou (*Achnatherum calamagrostis* – fig. 6 p. 177).

Glabre

Dépourvu de poils.

Glabrescent-ente

Presque glabre (*Salix helvetica* – fig. 3 p. 250).

Glaucue

De couleur vert bleuâtre (*Salix glaucosericea* – fig. 1 p. 246).

Glomérule

Inflorescence sphérique formée de nombreuses fleurs subsessiles insérées en un même point (*Lotus corniculatus* – fig. 3 p. 216).

Glume

Chacune des petites bractées, foliacées ou membraneuses, situées à la base de l'épillet. Insérées généralement par paires, on distingue la glume inférieure et la glume supérieure (*Deschampsia cespitosa* – fig. 6 p. 203).

Glumelle

Chacune des petites bractées, foliacées ou membraneuses, enveloppant chaque fleur de l'épillet. Insérées généralement par paires, on distingue la glumelle inférieure, aussi appelée lemme, et la glumelle supérieure, aussi appelée paléole (*Deschampsia cespitosa* – fig. 6 p. 203).

Héliophile

Qui se développe uniquement en pleine lumière (≠ sciaphile).

Hirsute

Qualifie une plante ou un organe possédant de longs poils rigides et dressés (*Salix laggeri* – fig. 2 p. 252).

Hybridation

Croisement interspécifique produisant des descendants ordinairement stériles.

Hybride

Produit de l'hybridation. *Salix x multinervis* est l'hybride entre *Salix aurita* et *S. cinerea*.

Hydromorphe

Se dit d'un sol temporairement ou régulièrement engorgé en eau (présence de traces d'oxydes de fer).

Hygrophile

Qui se développe sur des sols régulièrement inondés. Se dit d'une plante non aquatique ayant des exigences élevées en eau lors de son cycle biologique (≠ xérophile).

Inflorescence

Unité individualisée constituée d'un groupe de fleurs.

Introgression

Dispersion naturelle de gènes d'une espèce à l'intérieur d'une autre par suite de croisements inter-parentaux successifs. Le phénomène d'introgression est très fréquent chez les saules.

Involucre

Ensemble des bractées d'une fleur ou d'une inflorescence ordinairement groupées en position basale.

Lacinié-ée

Finement divisé en lanières, généralement inégales. Se dit principalement des feuilles, ligules ou pétioles (*Calamagrostis varia* – fig. 3 p. 198) (= lacéré).

Lancéolé-ée

En forme de fer de lance, soit atténué aux deux extrémités (*Salix daphnoides* – fig. 5 p. 240).

Lenticelle

Orifices aérifères de l'écorce. Il s'agit de massifs lâches de cellules corticales présentant de larges espaces intercellulaires (*Sambucus racemosa* – fig. 2 p. 262).

Ligule

1. Chez les graminées et certaines laiches, petite languette membraneuse se situant à l'extrémité de la gaine (*Avenula pubescens* – fig. 3 p. 188).

2. Chez les asteracées, nom donné au limbe des fleurs ligulées (ressemblant à un pétale).

Limbe

Partie plane et élargie de la feuille, lieu privilégié de la photosynthèse.

Linéaire

Se dit d'un organe allongé, étroit, à bordures parallèles (*Salix elaeagnos* – fig. 4 p. 242).

Lobe

Division arrondie et peu profonde d'une feuille ou d'un pétale (*Sorbus mougeotii* – fig. 4 p. 266).

Lobé-ée

Muni de lobes.

Mégaphorbiaie

Groupement végétal composé de plantes herbacées vivaces à larges feuilles se développant généralement sur des sols frais à humides riches en substances nutritives (fig. 18a p. 284).

Mellifère

Se dit d'une plante produisant du nectar.

Mésophile

Qui se développe dans des conditions moyennes de température et d'humidité.

Mésotrophe

Qualifie un sol ou une eau libre moyennement riche en éléments nutritifs, neutre à modérément acide, permettant une assez bonne activité biologique.

Monocéphale

N'ayant qu'une seule tête. Par extension, se dit d'une tige ne portant qu'une seule fleur ou un seul capitule (*Leontodon hispidus* – fig. 1 p. 214).

Monoïque

Se dit d'une plante à fleurs mâles et femelles séparées (fleurs unisexuées) situées sur un même individu (*Betula pendula* – fig. 6 p. 193).

Monospécifique

Se dit d'un peuplement végétal qui ne comporte qu'une seule espèce (*Calamagrostis epigeios* – fig. 1 p. 196).

Mucron

Pointe courte et raide située à l'extrémité d'une feuille.

Mucroné-ée

Muni d'un mucron.

Neutre

Ni acide, ni basique.

Neutrocalcicole

Qui se développe sur des sols neutres riches en carbonates de calcium.

Nitrophile

Qui se développe sur des sols riches en azote assimilable.

Oblong-ongue

Se dit d'un organe (généralement une feuille) allongé et arrondi aux extrémités (= en forme d'ellipse allongée) (*Sorbus aucuparia* – fig. 4 p. 264).

Obovale

En forme d'œuf aplati inversé (projection en plan). Se dit des feuilles ou des pétales dont la partie basale est plus étroite que la partie sommitale (*Salix aurita* – fig. 4 p. 234).

Obtus-use

Dont le sommet est arrondi (*Salix foetida* – fig. 3 p. 244) (≠ aigu).

Ombelle

Inflorescence constituée d'un ensemble de fleurs terminales aux pédicelles sensiblement égaux rayonnants d'un même point. On observe le plus souvent des ombelles composées (ombelles d'ombelles de *Peucedanum ostruthium* – fig. 17 p. 283).

Ombelliforme

En forme d'ombelle (*Lotus corniculatus* – fig. 3 p. 216).

Orophile

Se dit d'un organisme ou d'une formation végétale se développant préférentiellement, voire exclusivement, en montagne.

Ovale

En forme d'œuf aplati (projection en plan). Se dit des feuilles ou des pétales dont la partie sommitale est plus étroite que la partie basale (*Prunus padus* – fig. 5 p. 226).

Ovoïde

En forme d'œuf (en volume). Se dit des fruits ou des bourgeons dont la partie sommitale est plus étroite que la partie basale (*Acer pseudo-platanus* – fig. 3 p. 174).

Paillette

Petite écaille, souvent filiforme et peu visible, insérée à la base des fleurs tubuleuses sur le réceptacle du capitule de certaines espèces d'asteracées et de dipsacacées.

Palmé-ée

Mode de disposition des nervures comportant un nombre impair de nervures principales rayonnant d'un point à partir de la base du limbe (en forme de patte d'oie) (*Acer pseudo-platanus* – fig. 4 p. 174).

Panicule

Inflorescence composée d'un axe principal ramifié comportant un nombre indéterminé de fleurs ou d'épillets (grappe de grappes). La longueur des ramifications décroît généralement de bas en haut, procurant une silhouette pyramidale à l'inflorescence (*Achnatherum calamagrostis* – fig. 4 p. 176).

Pédicelle

Axe grêle portant une fleur, un fruit ou un épillet au sein d'une inflorescence.

Pédoncule

Axe robuste portant une fleur solitaire de grande taille, un fruit ou une inflorescence.

Pelouse

Formation végétale rase dominée par les végétaux graminoides à feuilles étroites (fig. 7 p. 207).

Pennatifide

Qualifie une feuille pennée dont les incisions atteignent sensiblement la moitié de la largeur du limbe (*Leontodon hispidus* subsp. *hyoseroides* – fig. 5 p. 214).

Pennatiséqué-ée

Qualifie une feuille pennée dont les incisions atteignent la nervure principale ou rachis (*Sorbus aucuparia* – fig. 4 p. 264).

Penné-ée

Mode de disposition des nervures comportant une nervure principale ou rachis, prolongeant le pétiole, duquel se détachent les nervures secondaires (en forme de peigne). Les feuilles imparipennées sont composées d'un nombre impair de folioles (*Fraxinus excelsior* – fig. 4 p. 208).

Perchis

Peuplement pré-forestier composé de tiges dressées issues de semis et ayant entre 5 et 15 cm de diamètre (fig. 7b p. 209).

Périanthe

Ensemble des pièces périphériques stériles de la fleur, soit l'ensemble calice plus corolle.

Pétale

Pièce stérile interne d'une fleur, ordinairement colorée et ayant un rôle de protection et d'affichage. L'ensemble des pétales d'une fleur constitue la corolle.

Pétiole

Axe foliaire portant la partie étalée de la feuille.

Peuplement

Ensemble de populations composé d'espèces appartenant souvent à un même groupe taxonomique, qui présentent une écologie semblable et occupent un même biotope ou habitat. Par extension, un peuplement forestier est un groupement d'arbres caractérisé par une structure et une composition homogènes sur un espace déterminé.

Phénologie

Étude des rythmes saisonniers de la vie animale ou végétale.

Physiologie

Étude du fonctionnement des organes et des cellules et de leurs relations avec l'environnement telles que la nutrition, les échanges gazeux, la croissance et le développement ou encore la reproduction (végétative ou sexuée).

Physionomie

Aspect général d'une plante ou d'une communauté végétale.

Phytogéographie

Domaine de la biogéographie, ou géographie botanique, étudiant la distribution terrestre des végétaux.

Phytosociologie

Étude synthétique des communautés végétales spontanées visant à caractériser leur structure, leur composition spécifique, leur écologie, leur distribution, leur genèse et leur évolution.

Pionnier-ière

Se dit d'une espèce ou d'une végétation à forte capacité de dispersion et croissance rapide colonisant les substrats ou sols nus. Les végétaux pionniers structurent les stades initiaux des séries de végétations.

Pistil

Organe femelle de la fleur ordinairement composé d'un ovaire, d'un style et d'un stigmate.

Plagiotrope

Qui est orienté dans un plan oblique ou horizontal (cas des rhizomes notamment).

Polymorphe

Se dit d'une espèce présentant une grande variabilité de forme (*Salix daphnoides* – fig. 8 p. 287).

Polytypique

Se dit d'une espèce présentant des populations génétiquement différenciées aux phénotypes distincts. Les espèces polytypiques comportent souvent plusieurs sous-espèces ou variétés (*Anthyllis vulneraria* – fig. 2-6 p. 186).

Population

Ensemble d'individus interféconds occupant un espace déterminé à un instant donné.

Post-pionnier-ière

Se dit d'une espèce ou d'une végétation de pleine lumière se développant postérieurement aux stades pionniers de la succession végétale.

Prairie

Végétation herbacée vivace, haute et dense, dominée par les graminées à feuilles larges (fig. 7 p. 273).

Prostré-ée

Appliqué sur le sol (*Salix herbacea* et *S. reticulata* – fig. 6 p. 287) (= couché).

Pruineux-euse

Pourvu d'une fine couche cireuse blanchâtre, s'effaçant facilement par frottement (*Salix daphnoides* – fig. 38 p. 296).

Pubescent-ente

Pourvu de poils.

Radical-ale

Situé à la base de la tige, près du collet.

Radicant-ante

Qualifie un organe développant des racines adventives susceptibles de s'enraciner. Se dit des tiges couchées à même le sol. Les rameaux de *Salix herbacea* sont généralement radicans.

Rameau

Tige plus ou moins ligneuse issue d'un bourgeon et portant des feuilles. Les rameaux de l'année, apparus au printemps dernier, se transformeront en rameaux de deux ans au printemps suivant (à la naissance des nouveaux rameaux de l'année).

Recépage

Coupe de plants ou de brins de taillis au ras du sol en vue d'obtenir des rejets.

Réceptacle

Renflement sommital du pédoncule ou du pédicelle sur lequel s'insèrent toutes les pièces de la fleur ou du capitule.

Recru

Végétation forestière composée de rejets et de drageons apparaissant après une coupe (fig. 7a p. 209).

Réfléchi-ie

Fortement recourbé, rabattu vers l'arrière (*Trifolium montanum* – fig. 6 p. 271).

Rejet

Pousse apparaissant à la base de la tige ou sur la souche (*Salix caprea* – fig. 9 p. 239).

Réticulé-ée

Pourvu d'un réseau de nervures entrelacées comme les mailles d'un filet (*Salix aurita* – fig. 4 p. 234).

Rhizomateux-euse

Se dit d'un végétal pourvu de rhizomes.

Rhizome

Tige souterraine présentant des entrenœuds courts et une croissance généralement horizontale ; organe de réserve, le rhizome assure tant la propagation que la survie de la plante (*Tussilago farfara* – fig. 1a p. 276).

Ripicole

Qui vit au bord des cours d'eau, sur les rives.

Ripisylve

Formation forestière localisée au bord d'un cours d'eau (= forêt ripicole).

Rosette

Ensemble dense de feuilles plaquées sur le sol prenant naissance au niveau du collet (interface tige-racine) (*Leontodon hispidus* – fig. 1 p. 214).

Rudéral-ale

1. Se dit le plus souvent d'une plante ou d'une végétation se développant spontanément dans des milieux fortement marqués par les activités anthropiques (décombres, terrains vagues, friches, etc.).

2. Au sens purement écologique, se dit également des organismes pionniers se développant dans des biotopes régulièrement perturbés (éboulis, alluvions).

Saillant-ante

Qui dépasse de façon évidente, formant ainsi un relief bien marqué (*Salix cinerea* – fig. 36 p. 296).

Saxicole

Se dit d'une plante ou d'une végétation se développant à même la roche, sur des substrats dépourvus d'humus.

Scabre

Se dit d'un organe rude, râpeux au toucher, qui accroche le doigt au frottement.

Scarieux-euse

Se dit d'un organe écaillé à membraneux, translucide et généralement de couleur blanchâtre (marge scarieuse).

Sépale

Pièce florale généralement aplatie, verdâtre et coriace située en position périphérique de la fleur. L'ensemble des sépales forme le calice.

Sessile

Se dit d'un organe (feuille, fleur, inflorescence) dépourvu de pétiole, de pédoncule ou de pédicelle (*Salix daphnoides* – fig. 7 p. 241) (≠ pétiolé, pédonculé, pédicellé).

Sillonné-ée

Creusé de stries longitudinales profondes (*Trisetum flavescens* – fig. 3 p. 272).

Social-ale

Se dit d'une espèce végétale présentant une forte aptitude à la multiplication végétative et formant des populations denses et étendues (*Calamagrostis epigeios* – fig. 7 p. 197).

Sous-arbrisseau

Arbrisseau de taille inférieure à 50 cm.

Stipule

Chacun des deux appendices foliacés ou lignifiés, de forme variable, présents à la base du pétiole (*Trifolium badium* – fig. 3 p. 268).

Stolon

Tige généralement aérienne et rampante à longs entrenœuds différenciant des racines adventives susceptibles de s'enraciner. Disparaissant en période hivernale, le stolon favorise uniquement la propagation et n'a pas de rôle de réserve à la différence du rhizome.

Stolonifère

Pourvue de stolons.

Spontané-ée

Se dit d'une espèce cultivée qui croît au voisinage de son lieu d'implantation (échappée de culture) et dont les populations peuvent se maintenir sans s'étendre ou disparaître après quelques années.

Taxon

Unité systématique d'un rang indéfini (variété, sous-espèce, espèce, genre, etc.).

Thermophile

Qui se développe dans des stations chaudes (≠ cryophile).

Thyrse

Inflorescence en cyme composée (cyme de cymes) (*Fraxinus excelsior* – fig. 5 p. 209).

Tomenteux-euse

Densément couvert d'une pilosité cotonneuse, feutrée appelée tomentum (*Salix elaeagnos* – fig. 5 p. 242).

Trifide

Se terminant par trois pointes (*Berberis vulgaris* – fig. 2 p. 190).

Tronqué-ée

Coupé brusquement par une ligne transversale (*Brachypodium rupestre* – fig. 4 p. 194).

Tubulaire

En forme de tube (= tubulé). Les fleurs d'*Hippophae rhamnoides* sont tubulaires.

Ubiquiste

Se dit d'un organisme qui se développe dans des écosystèmes variés du fait de sa grande plasticité écologique.

Uniflore

Pourvue d'une seule fleur (*Agrostis schraderiana* – fig. 5 p. 180).

Utricule

1. Enveloppe bractéale renfermant l'ovaire puis le fruit chez les laiches (*Carex* – fig. 6 p. 200).
2. Vésicule présente sur les feuilles submergées des utriculaires piégeant les micro-organismes planctoniques.

Vivace

Qui vit plusieurs années.

Vivipare

Se dit d'une espèce produisant directement de nouveaux individus sur le pied parental à partir d'une graine ou d'un bourgeon ; la viviparité se traduit par l'apparition de petites plantules sur l'inflorescence (*Poa alpina* – fig. 9 p. 225).

Xérophile

Qui se développe sur des substrats ou sols arides (≠ hygrophile).

Index des espèces traitées dans la partie III

Index des noms latins

A <i>cer pseudoplatanus</i> L.	174	L <i>aburnum alpinum</i> (Mill.) Bercht. & J. Presl	212
<i>Achnatherum calamagrostis</i> (L.) P. Beauv.		<i>Laserpitium latifolium</i> L.	282
= <i>Stipa calamagrostis</i> (L.) Walhenb.	176	<i>Leontodon hispidus</i> L.	214
<i>Adenostyles alliariae</i> (Gouan) A.Kern.	279	> subsp. <i>alpinus</i> (Jacq.) Finch & P.D.Sell	214
<i>Adenostyles alpina</i> (L.) Bluff & Fingerh.		> subsp. <i>hispidus</i>	214
= <i>A. glabra</i> (Mill.) DC., <i>Cacalia alpina</i> L., <i>C. glabra</i> Mill.	279	> subsp. <i>hyoseroides</i> (Welw. ex Rchb.) Gremli	214
<i>Adenostyles leucophylla</i> (Willd.) Rchb.		> subsp. <i>opimus</i> (W.D.J.Koch) Finch & P.D.Sell	214
= <i>A. tomentosa</i> (Vill.) Schinz & Thell.	279	> subsp. <i>pseudocrispus</i> (Sch.Bip. ex Bisch.) Lambinon	214
<i>Agrostis capillaris</i> L.		<i>Lotus alpinus</i> (DC.) Schleich. ex Ramond	
= <i>A. tenuis</i> Sibth.	178	= <i>L. corniculatus</i> subsp. <i>alpinus</i> (DC.) Rothm.	216
<i>Agrostis schraderiana</i> Bech.	180	<i>Lotus corniculatus</i> L.	216
<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	182	> subsp. <i>corniculatus</i>	216
<i>Alnus viridis</i> (Chaix) DC.		> subsp. <i>tenuis</i> (Waldst. & Kit. ex Willd.) Berher	216
= <i>A. alnobetula</i> (Ehrh.) K. Koch	184	> subsp. <i>valdepilosus</i> (Schur) Kerguélen	
<i>Angelica sylvestris</i> L.	283	= subsp. <i>hirsutus</i> (Wallr.) Schübler & G.Martens	216
<i>Anthyllis vulneraria</i> L.	186		
> subsp. <i>alpestris</i> (Kit.) Asch. & Graebn.	186	M <i>yriscaria germanica</i> (L.) Desv.	218
> subsp. <i>carpatica</i> (Pant.) Nyman	186		
> subsp. <i>guyoti</i> (Chodat) Grenon	186	O <i>nobrychis montana</i> DC.	220
> subsp. <i>polyphylla</i> (DC.) Nyman	186		
> subsp. <i>valesiaca</i> (Beck) Guyot	186	P <i>etasites albus</i> (L.) Gaertn.	278
> subsp. <i>vulneraria</i>	186	<i>Petasites hybridus</i> (L.) P.Gaertn., B.Mey. & Scherb.	
> subsp. <i>vulnerarioides</i> (All.) Arcang.	186	= <i>P. officinalis</i> Moench	278
<i>Avenula pubescens</i> (Huds.) Dumort.		<i>Petasites paradoxus</i> (Retz.) Baumg.	278
= <i>Helictotrichon pubescens</i> (Huds.) Pilg.	188	<i>Peucedanum ostruthium</i> (L.) W.D.J.Koch	
		= <i>Imperatoria ostruthium</i> L.	282
B <i>erberis vulgaris</i> L.	190	<i>Phleum alpinum</i> L.	222
<i>Betula pendula</i> Roth		> subsp. <i>alpinum</i>	222
= <i>B. verrucosa</i> Ehrh.	192	> subsp. <i>rhaeticum</i> Humphries	222
<i>Brachypodium rupestre</i> (Host) Roem. & Schult.		<i>Poa alpina</i> L.	224
= <i>B. pinnatum</i> subsp. <i>rupestre</i> (Host) Schübler & G.Martens	194	<i>Prunus padus</i> L.	226
		> subsp. <i>padus</i>	226
C <i>alamagrostis epigejos</i> (L.) Roth	196	> subsp. <i>borealis</i> Nyman	
<i>Calamagrostis pseudophragmites</i> (Haller f.) Koeler	280	= subsp. <i>petraea</i> (Tausch) Domin	226
<i>Calamagrostis varia</i> (Schrad.) Host	198		
<i>Carex paniculata</i> L.	200	R <i>ibes alpinum</i> L.	228
<i>Chaerophyllum aureum</i> L.	283	<i>Rosa pendulina</i> L.	
<i>Chaerophyllum hirsutum</i> L.	282	= <i>R. alpina</i> L.	230
<i>Chaerophyllum villarsii</i> W.D.J.Koch	283		
D <i>eschampsia cespitosa</i> (L.) P. Beauv.	202	S <i>alix appendiculata</i> Vill.	
		= <i>S. grandifolia</i> Ser.	232
E <i>pilobium angustifolium</i> L.		<i>Salix aurita</i> L.	234
= <i>Chamerion angustifolium</i> (L.) Holub.	281	<i>Salix caesia</i> Vill.	236
<i>Epilobium dodonaei</i> Vill.		<i>Salix caprea</i> L.	238
= <i>Chamerion dodonaei</i> (Vill.) Holub	281	<i>Salix daphnoides</i> Vill.	240
<i>Epilobium fleischeri</i> Hochst.		<i>Salix elaeagnos</i> Scop.	
= <i>E. dodonaei</i> subsp. <i>fleischeri</i> (Hochst.) Schinz & Thell.	281	= <i>S. elaeagnos</i> Scop., <i>S. incana</i> Schrank	242
<i>Epilobium hirsutum</i> L.	281	<i>Salix foetida</i> Schleich. ex. DC.	244
		<i>Salix glaucosericea</i> Flod.	246
F <i>estuca laevigata</i> Gaudin	204	<i>Salix hastata</i> L.	248
<i>Festuca nigrescens</i> Lam.	206	<i>Salix helvetica</i> Vill.	250
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	208	<i>Salix laggeri</i> Wimm.	
		= <i>S. pubescens</i> Schleich. ex A.Kern. & J.Kern.	252
H <i>eraclium sphondylium</i> L.	283	<i>Salix myrsinifolia</i> Salisb.	
<i>Hippophaë rhamnoides</i> L.	210	= <i>S. nigricans</i> Smith	254
		> subsp. <i>myrsinifolia</i>	254
		> subsp. <i>alpicola</i> (Buser) Kerguélen	254

<i>Salix pentandra</i> L.	256	F étuque courbée - Fétuque lisse	204
<i>Salix purpurea</i> L.	258	Fétuque noirâtre	206
> subsp. <i>angustior</i> Lautenschl.	258	Fléole des Alpes - Phléole des Alpes	222
> subsp. <i>lambertiana</i> (Sm.) Macreight	258	Fléole des Alpes rhétiques - Phléole des Alpes rhétiques	222
> subsp. <i>purpurea</i>	258	Frêne commun - Frêne élevé	208
<i>Salix triandra</i> L.	260		
<i>Sambucus racemosa</i> L.	262	G roseillier des Alpes - Groseillier sauvage	228
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	264		
<i>Sorbus mougeotii</i> Soyer-Will. & Godron	266	I mpératoire - Benjoin	282
T <i>rifolium badium</i> Schreb.	268	L aiche paniculée - Laïche paniculé - Carex paniculé	200
<i>Trifolium montanum</i> L.	270	Laser à larges feuilles - Laser blanc - Laser à feuilles larges	282
<i>Trifolium thalii</i> Vill.	283	Liondent des Alpes	214
<i>Trifolium pallescens</i> Schreb.	283	Liondent hispide	214
<i>Trisetum flavescens</i> (L.) P. Beauv.	272	Liondent des éboulis	214
<i>Tussilago farfara</i> L.	278	Liondent gras	214
		Lotier corniculé - Lotier commun	216
V <i>aleriana montana</i> L.	282	Lotier des Alpes	216
<i>Valeriana officinalis</i> L.	282	Lotier à feuilles étroites	216
<i>Valeriana tripteris</i> L.	282	Lotier glabre	216
		Lotier hirsute	216

Index des noms français

A dénostyle à feuilles blanches	279	M erisier à grappes - Cerisier à grappes	226
Adénostyle à feuilles d'alliaire - Adénostyle blanchâtre	279	Myricaire - Tamarin d'Allemagne	218
Adénostyle des Alpes - Adénostyle glabre	279	P âturin des Alpes	224
Agrostide capillaire - Agrostide commune - Agrostis capillaire	178	Pétasite blanc	278
Agrostide de Schrader - Agrostide poilue - Agrostis de Schrader	180	Pétasite hybride - Grand pétasite	278
Alisier de Mougeot - Sorbier de Mougeot	266	Pétasite paradoxal - Pétasite blanc de neige	278
Angélique des bois - Angélique sauvage	283	R osier des Alpes - Églantier des Alpes	230
Anthyllide vulnéraire	186		
Anthyllide de Guyot	186	S ainfoin des montagnes - Esparcette des montagnes	220
Anthyllide à nombreuses feuilles	186	Saule à oreillettes - Petit marsault	234
Anthyllide du Valais	186	Saule à trois étamines - Osier brun	260
Anthyllide fausse vulnéraire	186	Saule alpestre	254
Argousier	210	Saule appendiculé - Saule à grandes feuilles	232
Aubour des Alpes - Cytise des Alpes	212	Saule bleuâtre - Saule bleu	236
Aulne blanc - Aune blanc - Aulne gris	182	Saule de Lager - Saule blanchâtre - Saule pubescent	252
Aulne vert - Aune vert - Aulne des Alpes	184	Saule de Suisse	250
Avoine jaunâtre - Trisetè jaunâtre	272	Saule drapé - Saule blanchâtre - Saule cotonneux	242
Avoine pubescente	188	Saule faux daphné - Saule prumineux	240
		Saule fétide	244
B erce commune - Berce des prés - Berce sphondyle	283	Saule glauque - Saule glauque soyeux	246
Bouleau verruqueux	192	Saule hasté	248
Brachypode des rochers	194	Saule laurier - Saule à cinq étamines	256
Calamagrostide argentée - Stipe calamagrostide	176	Saule marsault - Saule des chèvres	238
Calamagrostide bigarrée - Calamagrostide panachée	198	Saule noircissant	254
Calamagrostide commune - Calamagrostis commun	196	Saule pourpre - Osier pourpre	258
Calamagrostide faux roseau - Calamagrostide des rivages - Calamagrostis faux roseau	280	Sorbier des oiseleurs	264
Canche cespiteuse - Canche gazonnante	202	Sureau à grappes - Sureau de montagne	262
Cerfeuil de Villars	283		
Cerfeuil doré - Cerfeuil d'or	283	T rèfle brun - Trèfle bai	268
Cerfeuil hirsute - Cerfeuil dressé	282	Trèfle de Thal	283
		Trèfle des montagnes	270
É pilobe à feuilles de romarin - Épilobe de Dodoens	281	Trèfle pâle - Trèfle pâissant	283
Épilobe à feuilles étroites - Laurier de saint Antoine - Épilobe en épi	281	Tussilage - Pas-d'âne	278
Épilobe de Fleischer	281		
Épilobe hirsute - Épilobe hérissé - Épilobe velu	281	V alériane des montagnes	282
Épine-vinette - Vinettier	190	Valériane officinale - Valériane des collines - Valériane à petites feuilles	282
Érable sycomore	174	Valériane triséquée - Valériane à feuilles trifides - Valériane à trois folioles	282

Index des noms de milieux

Classification phytosociologique retenue				Noms communs	Pages
Classe	Ordre	Alliance	Association		
<i>Salicetea purpureae</i> Moor 1958				Fourrés et perchis alluviaux de saules	152-154
<i>Salicetalia purpureae</i> Moor 1958 = <i>Myricarietalia</i> Aichinger 1933 p.p.				Fourrés et perchis alluviaux de saules	152-154
<i>Salicion triandrae</i> Müller et Görs 1958				Saulaies à saule à trois étamines des matériaux fins	152
<i>Salicetum triandrae</i> Malcuit ex Noirfalise in Lebrun et al. 1955 = <i>Salicetum triandro-viminalis</i> Lohmeyer 1953 ex Moor 1958				Saulaie à saule à trois étamines	152
<i>Salicion elaeagni</i> Moor 1958 = <i>Salicion incanae</i> Aichinger 1933 p.p. = <i>Salicion elaeagno-daphnoidis</i> (Moor 1958) Grass in Mucina et al. 1993				Saulaies à saule drapé des matériaux grossiers	153
<i>Salici elaeagni-Myricarietum</i> Moor 1958 = <i>Myricarietum</i> (Rübel 1912) Jenik 1955 = <i>Epilobio-Myricarietum</i> Aichinger 1933				Saulaie à myricaire	153
<i>Salici elaeagni-Hippophaetum</i> Br.-Bl. in Volk 1939 = <i>Salicetum elaeagno-daphnoides</i> Moor 1958 = <i>Salicetum elaeagni</i> Oberdorfer 1962 = <i>Salicetum elaeagni</i> (Hag. 1916) Jenik 1955				Saulaie à argousier	153
Groupement à <i>Salix elaeagnos</i>				Saulaie mésophile à saule drapé	154
Groupement à <i>Salix daphnoides</i>				Saulaie à saule faux daphné	154
<i>Carpino-Fagetea</i> Jakucs 1967 = <i>Quercu-Fagetea</i> Br.-Bl. et Vlieger in Vlieger 1937 p.p. = <i>Fraxino-Fagetea sylvaticae</i> Moor 1976				Forêts de feuillus mésophiles	155-157
<i>Fraxinetalia</i> Scamoni et Passarge 1959 = <i>Alno-Fraxinetalia</i> Moor 1976				Aulnaies blanches et frênaies alluviales	155-157
<i>Alnion incanae</i> Pawlowski in Pawlowski, Sokolowski et Wallisch 1928 = <i>Alno-Ulmion</i> Br.-Bl. et Tx 1943 ex Tchou 1948 em T. Müller & Gors 1958 = <i>Alno-Padion</i> Knapp ex Medwecka-Kornas in Matuszkiewicz et Borowik 1957				Aulnaies blanches	155-157
<i>Equiseto hiemale-Alnetum incanae</i> Moor 1958				Aulnaie à prêle d'hiver	155
<i>Calamagrostio-Alnetum incanae</i> Moor 1958 = <i>Agropyro-Alnetum incanae</i> Br.-Bl. 1975 p.p.				Aulnaie à calamagrostide	156
<i>Violo-Alnetum incanae</i> Zoller 1974 = <i>Agropyro-Alnetum incanae violetosum biflorae</i> Br.-Bl. 1975				Aulnaie à violette à deux fleurs	156
<i>Alno-Salicetum pentandrae</i> Br.-Bl. 1950				Aulnaie blanche à saule laurier	156
<i>Aceri-Alnetum incanae</i> Winteler 1927 = <i>Adenostylo-Alnetum incanae</i> Frey 1995				Aulnaie à érables	157

Classification phytosociologique retenue				Noms communs	Pages
Classe	Ordre	Alliance	Association		
<i>Betulo caparticae-Alnetea viridis</i> Rejmánek in Huml, Leps, Prach et Rejmánek 1979				Formations arbustives et fourrés de l'étage subalpin	158-160
<i>Veratro-Salicetalia</i> Passarge 1978				Fourrés méso-cryophiles montagnards à subalpins	158-160
<i>Alnion viridis</i> Schnyder 1930				Aulnaies-saulaies arbustives des versants frais et bords de ruisseaux	158-159
<i>Salicetum appendiculatae</i> (Br.-Bl. 1950) Oberdorfer 1978					
= <i>Alnetum viridis salicetosum appendiculatae</i> Br.-Bl. 1950					
= <i>Acero-Salicetum appendiculatae</i> Oberdorfer 1957				Saulaie à saule appendiculé	158
= <i>Salici appendiculatae-Aceretum pseudoplatani</i> Oberdorfer 1957 nom. inv. Karner et Mucina in Grabherr et Mucina 1993					
<i>Alnetum viridis</i> Br.-Bl. 1918				Aulnaie verte	159
= Groupement à <i>Alnus viridis</i> Rübél 1911					
<i>Salicion waldsteinianae</i> Oberdorfer 1978				Saulaies basses alluviales neutro-calcicoles	159-160
= <i>Salicion pentandrae</i> Br.-Bl. 1950 p.p.					
<i>Salicetum caesio-foetidae</i> Br.-Bl. 1950				Saulaie à saule bleuâtre et saule fétide	159
Groupement à <i>Salix hastata</i> et <i>Salix foetida</i>				Saulaie à saule hasté et saule fétide	160
<i>Loiseleurio-Vaccinietea</i> Egger ex Schubert 1960				Landes et saulaies acidophiles subalpines	160
= <i>Vaccinio-Piceetea</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 p.p.					
<i>Rhododendro-Vaccinietalia</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et Jenny 1926				Landes et saulaies acidophiles subalpines	160
<i>Salicion helveticae</i> Rübél ex Theurillat in Theurillat, Aeschmann, Kúpfer et Spichiger 1995				Saulaies acidophiles à saule helvétique	160
<i>Salicetum helveticae</i> Br.-Bl. in Br.-Bl., Pallmann et Bach 1954				Saulaie acidophile à saule helvétique	160

Crédits photos et illustrations

Préambule et Partie I

Barré Jean-Baptiste : 33 (6) ; 35 (9) ; 37 (11) ; 52 (4).

Citterio Anne : 21 (2).

Daumergue Nathan : 16 (4) ; 18 (7) ; 39 (17).

Direction départementale de l'Équipement de Savoie : 22 (4).

Dommanget Fanny : 40 (19).

Ducasse Léon : 23 (7).

Evette André : 41 (20).

Frossard Pierre-André : 22 (5) ; 43 (1) ; 44 (2, 3, 4) ; 62 (1).

Institut géographique national : 39 (18).

Lannes Camille : 24 (8) ; 56 (10).

Lebouteiller Caroline : 34 (7b).

Leduc Pauline : 34 (7a).

Liébault Frédéric : 30 (1) ; 31 (2, 3) ; 32 (4, 5) ; 34 (8a, 8b) ; 35 (10) ; 37 (11, 12, 13, 14) ; 42 (21).

Matringe Alexandre : 15 (2) ; 16 (3) ; 17 (6).

Mériaux Patrice : 53 (5).

Mermin Éric : 52 (4).

Office fédéral de l'Environnement : 38 (15).

Peyras Laurent : 53 (6).

Région Franche-Comté : 14 (1).

Renou Emmanuel : 21 (1).

Sartoretti Xavier : 16 (5).

Valé Nicolas : 21 (3) ; 22 (6) ; 24 (8) ; 25 (9) ; 30 (1) ; 31 (3) ; 39 (16) ; 42 (21) ; 44 (2, 4) ; 49 (1) ; 51 (2) ; 52 (3) ; 56 (10).

Zanetti Caroline : 52 (4) ; 55 (7, 8, 9).

Partie II

AgroParisTech Nancy : 66 (2).

Argoud Jean-Pierre : 68 (10) ; 81 (16a).

Barré Jean-Baptiste : 70 (1) ; 71 (2) ; 74 (5) ; 77 (12) ; 82 (23) ; 87 (9) ; 89 (13) ; 94 (22) ; 95 (25) ; 99 (31).

Baz Franck : 116 (68) ; 117 (71, 72) ; 118 (73, 74, 75).

BIOTEC : 85 (4) ; 86 (5) ; 88 (10) ; 102 (35).

Brigades vertes / Département du Rhône : 123 (3, 4) ; 130 (24) ; 131 (29) ; 132 (30) ; 133 (36).

Cavaillé Paul : 139 (1, 2, 3) ; 140 (4, 5), 141 (6, 7) ; 142 (8, 9) ; 143 (10) ; 144 (11, 12).

Cave Béatrice : 128 (18, 19, 20, 21) ; 129 (23) ; 133 (39) ; 134 (40).

Centre de formation professionnelle forestière : 111 (55, 57) ; 112 (59) ; 113 (60, 61, 62) ; 114 (63, 64, 65, 66).

Chateaufieux Maxime : 86 (6) ; 87 (7b, 8) ; 88 (11) ; 89 (12).

Communauté de communes du Pays de Charlieu : 124 (6, 7, 8, 9).

Daumergue Nathan : 68 (9, 11) ; 111 (56) ; 115 (67).

Defontaine 1833 : 67 (6).

Department of Hydraulic Engineering - Autonomous Provinz of Bozen : 81 (17a) ; 82 (18, 19, 21).

Di Tella 1912 : 66 (3).

Ducasse Léon : 144 (13).

Evette André : 63 ; 67 (8) ; 81 (16b) ; 81 (17b) ; 84 (3) ; 87 (7a) ; 103 (41) ; 104 (42, 43) ; 105 (45) ; 118 (76, 77).

Frossard Pierre-André : 74 (4) ; 75 (6, 7) ; 77 (11) ; 78 (14) ; 83 (1) ; 90 (15) ; 91 (16, 17, 18) ; 93 (21) ; 95 (24) ; 97 (28) ; 98 (29, 30) ; 99 (32) ; 102 (36, 38, 39).

George Guiter : 131 (25).

hepia : 92 (19, 20) ; 96 (26, 27).

IGN BD TOPO : 84 (2) ; 100 (33) ; 104 (44) ; 110 (54) ; 112 (58).

Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau : 77 (10).

Irstea : 80 (15) ; 82 (20).

Malavoi et al. 2007 : 73 (3).

Mathieu 1864 : 66 (4).

Matringe Alexandre : 106 (46, 47) ; 107 (48, 49, 50) ; 108 (52) ; 109 (53) ; 125 (10) ; 126 (12) ; 127 (15).

Medico James : 136 (45).

Office national des forêts : 108 (51).

OpenStreetMap : 103 (40).

Oplatka 1988 : 76 (8).

Raymond Pierre : 120 (78, 79, 80, 81).

Roman Damien : 122 (1, 2) ; 123 (5) ; 127 (16) ; 131 (26, 28) ; 132 (31, 32, 33, 34, 35) ; 133 (37, 38) ; 134 (41, 42) ; 135 (43) ; 136 (44).

RTM / Office national des forêts : 65 (1) ; 127 (17) ; 129 (22).

Service forestier italien : 131 (27).

Stangl et Weinbacher 2006 : 82 (22).

Swisstopo : 90 (14) ; 95 (23).

Syndicat de la Reyssoze : 126 (14).

Syndicat mixte d'aménagement de l'Arve et de ses abords : 101 (34) ; 102 (37) ; 117 (69, 70).

Syndicat mixte du Lignon, de l'Anzon et du Vizézy : 125 (11) ; 126 (13).

Vischer 2003 : 66 (5) ; 67 (7).

Volsinger et al. 2000 : 78 (13).

Weitzer et al. 1998 : 76 (9).

Prunier Patrice : 150 (4, 5) ; 152 (4) ; 153 (6, 7) ; 154 (9) ; 156 (11) ; 157 (14) ; 158 (15, 17) ; 160 (20, 21) ; 162 (2a) ; 166 (9b) ; 174 (3, 4) ; 175 (8a, 8b) ; 178 (5) ; 179 (7) ; 181 (7, 8) ; 182 (3) ; 183 (8) ; 184 (1) ; 186 (2, 4, 5) ; 187 (6, 7) ; 190 (1, 2) ; 191 (7) ; 192 (3) ; 193 (8) ; 199 (6) ; 201 (7, 9) ; 205 (6, 7) ; 208 (3, 4) ; 209 (7a, 7b) ; 210 (1) ; 211 (7) ; 212 (1) ; 213 (6) ; 214 (1, 2, 3) ; 215 (6a, 6b) ; 218 (1) ; 220 (1, 3) ; 221 (6, 7) ; 222 (1) ; 223 (5, 7) ; 225 (10) ; 227 (7, 9) ; 228 (1, 2) ; 229 (6, 7, 8) ; 230 (3) ; 232 (1, 2, 4) ; 233 (6, 7) ; 234 (1, 2, 4) ; 235 (5, 6, 7) ; 236 (1, 2, 3, 4) ; 237 (5, 6, 7) ; 238 (4) ; 239 (8, 9) ; 241 (8) ; 243 (8) ; 245 (8) ; 246 (1, 4a) ; 247 (7) ; 248 (5) ; 249 (6, 7, 8) ; 250 (1) ; 251 (8) ; 255 (8) ; 256 (1, 2) ; 258 (3, 5) ; 260 (1, 4) ; 261 (8) ; 262 (1, 2, 4) ; 263 (6, 7, 8) ; 264 (1, 2, 3, 4, 5) ; 265 (7) ; 266 (2) ; 267 (6) ; 273 (7) ; 276 (1a, 1b) ; 277 (2a, 3a, 3b) ; 278 (5b) ; 279 (8) ; 280 (9, 10d) ; 281 (12, 13) ; 282 (15a, 15c) ; 283 (16a, 16b, 17a) ; 284 (18) ; 285 (1b) ; 286 (4a) ; 287 (5a, 5b, 6b) ; 288 (9a) ; 294 (14, 21) ; 295 (24, 26, 29, 30, 32, 34) ; 296 (41, 44, 45) ; 298 (63, 65) ; 299 (71, 72, 78) ; 300 (83, 86).

Sartoretti Xavier : 160 (22) ; 164 (6a, 6b) ; 165 (7a, 7b) ; 185 (8) ; 202 (1) ; 203 (7) ; 217 (6) ; 218 (3) ; 224 (1) ; 225 (11) ; 244 (4, 5) ; 245 (6) ; 253 (8) ; 256 (4, 5) ; 257 (6, 7) ; 269 (7).

Tagand Romain : 148 (1).

Partie III

Bonin Ludovic : 147 ; 148 (1) ; 150 (3) ; 159 (18) ; 161 (1) ; 174 (1, 2, 5) ; 175 (6, 7) ; 176 (1, 2, 3, 4) ; 177 (5, 6, 7) ; 178 (1, 2, 3, 4) ; 179 (6) ; 180 (1, 2, 3, 4, 5) ; 181 (6) ; 182 (1, 2, 4, 5) ; 183 (6) ; 184 (2, 3, 4, 5) ; 185 (6, 7) ; 186 (3) ; 188 (1, 2, 3, 4, 5) ; 189 (6, 8) ; 190 (3, 4) ; 191 (5, 6) ; 192 (1, 2, 4, 5) ; 193 (6, 7, 9) ; 194 (1, 2, 3, 4) ; 195 (5, 6, 7) ; 196 (1, 2, 3, 4, 5) ; 197 (7) ; 198 (1, 2, 3, 4, 5) ; 199 (7, 8) ; 200 (1, 2, 3, 4, 5, 6) ; 201 (8) ; 202 (2, 3, 4, 5) ; 204 (1, 2, 3, 4, 5) ; 206 (1, 2, 3, 4, 5) ; 207 (6, 7) ; 208 (1, 2) ; 209 (5, 6) ; 210 (2, 3, 4, 5) ; 211 (6) ; 212 (2, 3, 4, 5) ; 214 (4) ; 215 (5) ; 216 (1, 2, 3, 4) ; 217 (5, 7) ; 218 (2, 4, 5) ; 220 (2, 4, 5) ; 223 (2, 3, 4) ; 223 (6) ; 224 (2, 3, 4, 5, 6, 7) ; 225 (8, 9) ; 226 (1, 2, 3, 4, 5, 6) ; 227 (8) ; 228 (3, 4, 5) ; 230 (1, 2, 4, 5) ; 231 (6, 7) ; 232 (3, 5) ; 233 (8) ; 234 (3) ; 238 (1, 2, 3, 4, 5) ; 238 (1, 3, 5) ; 239 (6, 7) ; 240 (1, 2, 3, 4, 5) ; 241 (6, 7, 9) ; 242 (2, 3, 4, 5) ; 243 (6, 7) ; 244 (2, 3) ; 245 (7) ; 246 (2, 3) ; 248 (2, 3, 4) ; 250 (2, 3, 4, 5) ; 251 (6, 7) ; 252 (2, 3) ; 253 (6, 7) ; 254 (1, 2a, 2b, 3a, 3b, 4, 5) ; 255 (6, 7, 9) ; 256 (3) ; 258 (1, 2, 4) ; 259 (6, 7, 8) ; 260 (2, 3, 5) ; 261 (6, 7) ; 265 (6) ; 266 (1, 3, 4, 5) ; 267 (7, 8) ; 268 (1, 2, 3, 4, 5) ; 269 (6) ; 270 (1, 2, 3, 4, 5) ; 271 (6, 7) ; 272 (1, 2, 3, 4, 5) ; 273 (6) ; 277 (2b, 2c) ; 278 (4, 5a, 6) ; 279 (7a, 7b) ; 280 (10a, 10b, 10c) ; 282 (14a, 14b, 14c, 15b) ; 283 (17b) ; 285 (1a) ; 286 (2a, 2b, 3a, 3b, 4b) ; 287 (6a, 7a, 7b, 8a, 8b) ; 288 (9b, 10a, 10b) ; 294 (11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 20) ; 295 (23, 25, 27, 28, 31, 33) ; 296 (35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43) ; 297 (47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58) ; 298 (59, 60, 62, 64, 66, 67, 68, 69, 70) ; 299 (73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82) ; 300 (87, 89, 90, 91, 92, 93, 94).

Delahaye Thierry : 247 (5).

Duvoisin Jonas : 148 (1) ; 149 (2) ; 152 (5) ; 154 (8) ; 155 (10) ; 158 (16) ; 159 (19) ; 183 (7) ; 213 (7) ; 246 (4b) ; 247 (6) ; 252 (1, 4, 5) ; 262 (3, 5).

Frossard Pierre-André : 151 (1, 2, 3) ; 156 (12) ; 157 (13) ; 162 (2b) ; 163 (3a, 3b, 4a, 4b) ; 164 (5a, 5b) ; 166 (8a, 8b, 9a) ; 168 (10) ; 186 (1) ; 213 (8) ; 219 (6, 7) ; 231 (8) ; 242 (1) ; 244 (1) ; 248 (1) ; 257 (8).

Mombrial Florian : 238 (2) ; 281 (11).

O'Rourke Jane : 189 (7) ; 197 (6) ; 203 (6) ; 294 (19, 22) ; 296 (46) ; 298 (61) ; 299 (79) ; 300 (84, 85, 88).

Réalisation

Design graphique et maquette :
Anne-Claire Lecomte
www.studiographisme.fr

Relecture :
À avec accent !
www.a-avec-accent.fr

L'ouvrage

Le présent ouvrage est le résultat d'un important travail commun mené dans le cadre du projet franco-suisse Interreg IV A Géni'Alp (Génie Végétal en rivière de montagne) dédié à la promotion et à la mise en œuvre du génie végétal pour la stabilisation des berges de cours d'eau de montagne, dans le but d'améliorer l'intégration environnementale et paysagère des ouvrages de protection.

L'approche franco-suisse a permis de réunir des acteurs importants et complémentaires des deux pays et de faire collaborer à la fois partenaires techniques et financiers, organismes de recherche en environnement et collectivités locales chargées de la gestion globale des milieux aquatiques et de l'eau, pour répondre à des objectifs liés à l'amélioration globale de l'état des milieux aquatiques.

À travers des retours d'expériences à l'échelle des Alpes sur les techniques et les espèces utilisées pour la protection des berges, ils se sont faits porte-parole du développement de techniques douces comme alternatives ou compléments aux techniques de génie civil pour la maîtrise de l'érosion en rivière de montagne.

Cet ouvrage a pour but d'informer les collectivités et acteurs de l'eau sur l'existence d'alternatives à la protection systématique des berges et, lorsque celle-ci s'avère indispensable, de la possibilité d'utiliser d'autres techniques que celles traditionnellement utilisées, même en rivière de montagne où les contraintes physiques sont fortes. Il s'adresse à un public averti, formé aux différentes problématiques de gestion globale de l'eau et des milieux aquatiques, de l'aménagement du territoire et des milieux naturels. En qualité de technicien de rivière, gestionnaire de milieux aquatiques, agent de collectivité locale ou de l'État, maître d'œuvre, chercheur ou étudiant... les attentes et le niveau de lecture ne seront pas les mêmes... L'ambition des auteurs est que chacun puisse néanmoins trouver dans cet ouvrage des informations techniques adaptées à son métier ou à sa formation.

Le présent ouvrage s'organise ainsi en trois grandes parties (gouvernances, techniques, espèces), utilisables indépendamment les unes des autres.

Le projet Interreg IV A Géni'Alp

● Porteurs du projet

Rhône-Alpes Région

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

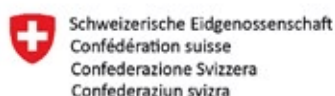
● Partenaires techniques



Communes de Bex, Gryon et Olon (Vd)



● Partenaires financiers



Géni'Alp a été sélectionné dans le cadre du programme de coopération territoriale européenne

INTERREG IV A France-Suisse 2007-2013.