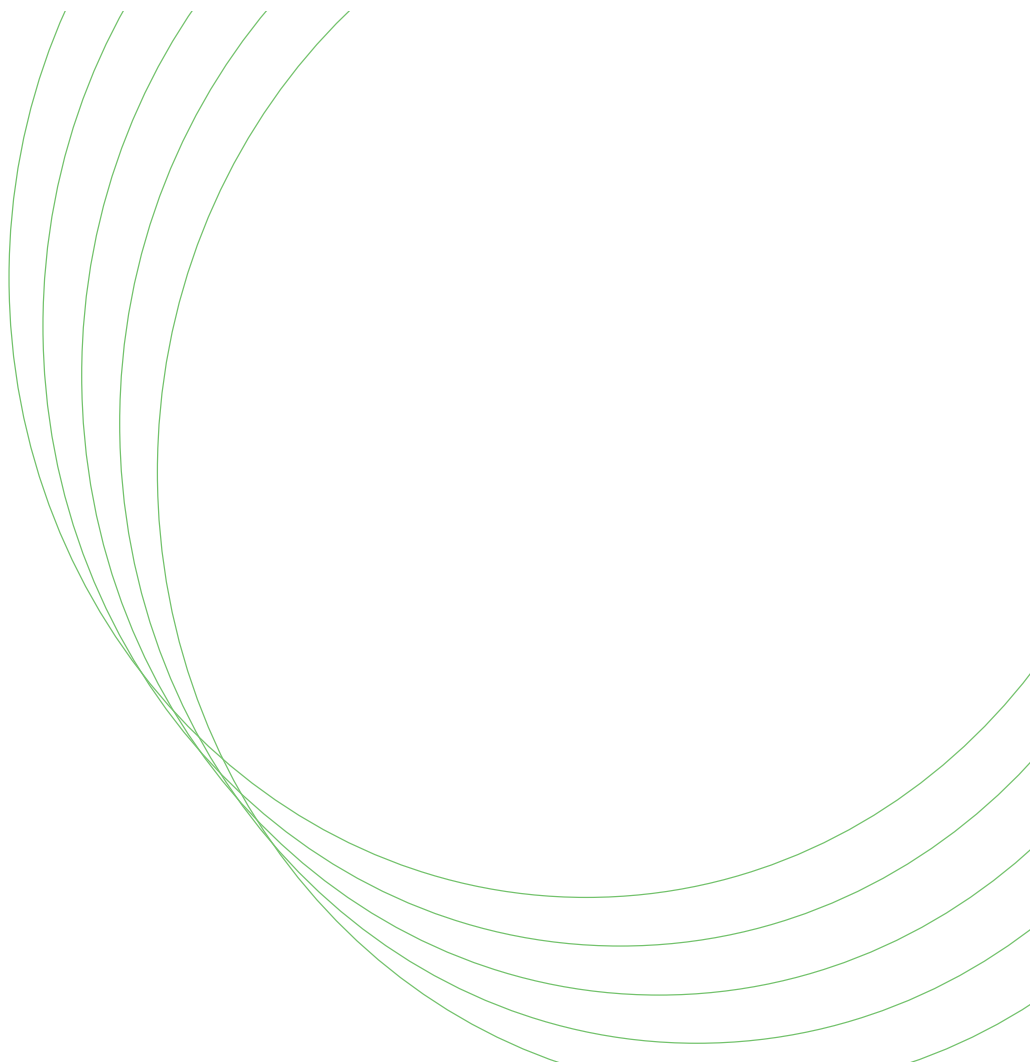


Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal

Freddy Rey



Restaurer les milieux
et prévenir les inondations
grâce au génie végétal



Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal

Freddy Rey

Éditions Quæ

A decorative graphic element consisting of several thin, light green curved lines that sweep across the bottom half of the page, starting from the left and curving towards the right.

Collection Matière à débattre et décider

La dépendance alimentaire de l'Afrique du Nord
et du Moyen-Orient à l'horizon 2050

Bertrand Schmitt, Chantal Le Mouël

2017, 144 p.

Agriculture et alimentation durables

Trois enjeux dans la filière céréales

Gilles Charmet, Joël Abécassis, Sylvie Bonny,
Anthony Fardet, Florence Forget, Valérie Lullien-Pellerin

2017, 192 p.

Le recyclage des résidus organiques

Regards sur une pratique agro-écologique

Hélène Jarousseau, Sabine Houot,

Jean-Marie Paillat, Hervé Saint-Macary, coord.

2016, 276 p.

Diffusion and Transfer of Knowledge in Agriculture

Christian Huyghe, Pascal Bergeret, Uno Svedin

2016

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

www.quae.com

© Éditions Quæ, 2018

ISBN 978-2-7592-2778-5

ISSN 2115-1229

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Remerciements

L'AUTEUR REMERCIE TOUTES CELLES ET CEUX QUI ONT APPORTÉ LEUR CONTRIBUTION aux études ayant permis de nourrir les réflexions et propositions de cet ouvrage, et plus particulièrement :

- les contributeurs des études : Anaïs Abraham, Pascal Breil, Vincent Breton, Max Bruciamacchié, Mélanie Burylo, Lauric Cécillon, Laure Dangla, Philippe Delcros, Agathe Dumas, Thierry Dutoit, Amandine Erktan, Céline Gallicher-Lavanne, Renaud Jaunatre, Sébastien Klotz, Sophie Labonne, Géraud Lavandier, Aymeric Lazarin, Séverine Louis, Nicolle Mathys, Patrice Mériaux, Éric Mermin, Christine Poulard, Christian Puech, Pierre Raymond, Didier Richard, Nicole Sardat, Nicolas Talaska, Pascal Tardif, Mathieu Weirich et les étudiants d'AgroParisTech Nancy ;
- les membres des comités de pilotage des études : Henri Pignoly et Philippe Picon (Syndicat mixte d'aménagement de la vallée de la Durance), Denis Baudequin (Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur), Jean-Guillaume Lacas (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur), Jean-Christophe Suau, Géraldine Duvochel et Alain Poirel (Électricité de France), Olivier Nalbone et Christel Francart (région Provence-Alpes-Côte d'Azur), Jacques Levert et Jean-Michel Ningre (ministère de l'Agriculture), Olivier Rousset (préfecture de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur), Florent Charles et Charles Bosshardt (Service de Restauration des terrains en montagne des Alpes-de-Haute-Provence), Caroline Savoyat (Syndicat mixte d'aménagement de la Bléone), Michel Combe (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse) ;
- les praticiens et chercheurs partenaires : Alain Grogno, Jean-Claude Fort, Éric Bayle, Jean-Luc Jardin (Office national des forêts des Alpes-de-Haute-Provence), Yves Crosaz (Géophyte), Patrick Bourdige (Zygène), le Groupement d'intérêt scientifique de Draix ;
- les financeurs des études : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, ministère de la Transition écologique et solidaire, ministère de l'Agriculture, Électricité de France, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Union européenne (Fonds européen de développement économique régional).



Sommaire

Remerciements	5
Introduction. Concilier la restauration des milieux et la prévention des inondations	9
Une gestion de plus en plus intégrée des milieux	9
Le génie végétal comme solution d'ingénierie écologique	11
Restauration écologique et/ou contrôle des risques naturels ?	15
Vers une conciliation entre restauration des milieux et prévention des inondations	16
1 – Pourquoi et comment végétaliser les terrains érodés ?	19
De nombreuses problématiques liées à l'érosion des versants et à la sédimentation fine dans les rivières	19
Exemple des ravines marneuses dans le bassin versant de la Durance dans les Alpes du Sud françaises	20
Végétaliser pour restaurer et lutter contre l'érosion et la sédimentation fine	22
Un génie végétal innovant et multibénéfices	25
Une solution d'ingénierie végétale à concevoir et à tester	26
La recherche au service de l'ingénierie	31
Sites d'étude dans le bassin versant de la Durance dans les Alpes du Sud françaises	37
2 – Recherches sur les interactions entre végétation, érosion et sédimentation fine	39
Seuils d'efficacité de la couverture végétale pour contrôler la production sédimentaire de ravines	39
Dynamique de la végétation et restauration écologique	46
Résistance des ouvrages et de la végétation aux contraintes de crue	56
Rôle de la végétation dans le contrôle de l'érosion et de la sédimentation fine	61
3 – De la recherche à l'ingénierie et à la décision	73
Synthèse des avancées scientifiques appliquées aux Alpes du Sud françaises	73
Quels enseignements pour l'ingénierie dans les bassins versants torrentiels ?	80

Une approche pour l'aide à la décision à l'échelle du bassin versant de la Durance	84
Des besoins nouveaux en ingénierie végétale pour concilier la restauration des milieux et la prévention des inondations	96
Vers une stratégie globale de génie végétal pour concilier restauration des milieux et prévention des inondations à l'échelle des bassins versants	102
Références bibliographiques	105

Introduction. Concilier la restauration des milieux et la prévention des inondations

Une gestion de plus en plus intégrée des milieux

LES POLITIQUES PUBLIQUES EN FRANCE ET EN EUROPE imposent aujourd'hui aux décideurs d'envisager une gestion de plus en plus intégrée des milieux et des territoires qui conjugue plusieurs bénéfices. Ainsi, dans le domaine de l'eau, les donneurs d'ordre doivent aujourd'hui chercher à concilier la restauration des milieux et la prévention des inondations à travers la mise en œuvre de la nouvelle compétence de Gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (Gemapi) (Graindorge, 2017). Créée par la loi Maptam du 27 janvier 2014, modifiée par la loi NOTRE du 7 août 2015 et précisée dans le cadre du décret « Dignes » du 12 mai 2015, elle est entrée officiellement en vigueur le 1^{er} janvier 2018. Il s'agit en fait d'une « supercompétence », qui regroupe quatre compétences correspondant aux alinéas 1, 2, 5 et 8 de l'article L. 211-7 du code de l'environnement, relatif au « Grand cycle de l'eau » :

- aménagement de bassins hydrographiques ;
- entretien et aménagement des cours d'eau, canaux, lacs ou plans d'eau ;
- défense contre les inondations et contre la mer ;
- protection et restauration des écosystèmes aquatiques, des zones humides et des formations boisées riveraines.

Elle oblige les collectivités locales à concilier la gestion des milieux aquatiques (Gema) — dont la restauration des milieux dégradés — et la prévention des inondations (PI) dans l'aménagement de leur territoire, en recherchant une cohérence hydrographique grâce à une gestion intégrée à envisager à l'échelle des bassins versants, tels qu'ils ont été identifiés dans les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) de chacun des grands bassins hydrographiques que comporte le territoire national (figure 1). Répondant à cette logique de bassin versant, avec des relations amont-aval fortes, elle concerne tout particulièrement les bassins versants situés en contexte torrentiel, soumis à des risques importants, et les systèmes d'endiguement des cours d'eau de montagne (torrents ou rivières torrentielles). Pour répondre à la fois à la Gema et à la PI, les Syndicats mixtes ou les Établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre

Figure 1. Protection d'habitations contre les inondations, grâce à une digue (rive droite) et un enrochement surmonté d'une couverture végétale (rive gauche).



Figure 2. Quels ouvrages utiliser pour restaurer ce cours d'eau dégradé (Gema) tout en protégeant la ligne à grande vitesse contre les inondations (PI) ?



(EPCI-FP) chargés de cette compétence doivent orienter et financer des projets pluridisciplinaires, qui relèvent de l'ingénierie (figure 2). Pour conjuguer sécurité et écologie, en appui, en complément ou parfois en substitution aux ouvrages de génie civil, on peut faire appel au génie végétal.

Le génie végétal comme solution d'ingénierie écologique

I Les bénéfices multiples du génie végétal

Sous-ensemble du génie écologique et parfois qualifié de « génie biologique », le génie végétal, appliqué aux milieux terrestres et aquatiques (figures 3 et 4), fait appel à des techniques de construction utilisant les plantes comme matériau grâce à la connaissance de leurs propriétés mécaniques et/ou biologiques (www.agebio.org). Le génie végétal, ou plus précisément l'ingénierie végétale (phase de conception des ouvrages de génie végétal), est un élément reconnu de l'ingénierie écologique, laquelle se définit comme « la conception de systèmes durables, en adéquation avec les principes de l'écologie, dont le but est d'intégrer les sociétés humaines dans leur environnement naturel pour un bénéfice commun » (Mitsch, 2012). Le génie végétal est utilisé pour la restauration écologique des milieux dégradés, mais aussi pour limiter les risques naturels.

La restauration écologique englobe toutes les actions dont le but est de réparer les milieux dégradés et de rétablir des écosystèmes à la fois autonomes et stables dans leur structure et dans leur fonctionnement (Dutoit et Rey, 2009 ; Clewell et Aronson, 2013 ; Gallet *et al.*, 2017). L'ingénierie écologique de manière générale et le génie végétal en particulier peuvent servir à la restauration d'environnements dégradés. Les actions mises en place peuvent comprendre :

- la réhabilitation de milieux dégradés, qui met en œuvre des techniques destinées à retrouver la succession naturelle de l'écosystème, en particulier par le recours à des espèces végétales pionnières dont le développement est favorisé, sans forcément chercher à recouvrer l'écosystème tel qu'il existait avant sa dégradation (Aronson *et al.*, 1993) ;
- le suivi et l'entretien des milieux réhabilités, ce qui permet de guider la dynamique naturelle des systèmes afin qu'ils recouvrent leur autonomie structurelle et fonctionnelle, en allant parfois jusqu'à retrouver l'écosystème originel (processus de restauration écologique au sens strict).

Les risques naturels, comme l'érosion des sols, les crues torrentielles et les glissements de terrain, sont des phénomènes aux conséquences potentiellement graves (Poesen *et al.*, 2003). L'utilisation de la végétation comme moyen de protection contre les risques naturels est typique des programmes de génie forestier et hydraulique en Europe, tels que la « Restauration des terrains en montagne » (RTM) en France (Vallauri *et al.*, 2002), « Wildbach und Lawinen Verbaug » en Allemagne et en Autriche ou « Sistemazioni Idrulico-Forestali » en Italie (Bischetti *et al.*, 2014). De nos jours, le recours au génie

Figure 3. Ouvrages de génie végétal en milieu terrestre.



Figure 4. Ouvrages de génie végétal en milieu aquatique.



végétal pour contrôler ces types de risques naturels à l'aide de végétation herbacée et ligneuse reste un défi important dans les zones où des enjeux socio-économiques et écologiques existent (Phillips *et al.*, 2013). Le recours au génie végétal nécessite une compréhension profonde des processus hydrologiques, écologiques et biophysiques en jeu sur le site concerné.

On peut également parler des bénéfices multiples des actions de génie végétal pour les habitats naturels et des services que peuvent retirer les populations humaines des écosystèmes. Ces actions comprennent, au-delà de la restauration écologique et de la réduction des risques, la restauration de la qualité des milieux aquatiques et terrestres et en particulier leur dépollution (Penru *et al.*, 2017). Lors d'une action de restauration, un avantage significatif du génie végétal est qu'il offre une solution à long terme et réduit le besoin d'interventions ultérieures.

Le génie végétal est en plein développement actuellement, en France comme ailleurs. Des cadres réglementaires comme la Directive-cadre sur l'eau (DCE), et plus récemment la Stratégie européenne sur les infrastructures vertes, introduisent la nécessité de mettre en application des techniques « douces » plutôt que des techniques « dures » (ouvrages d'art en béton et/ou avec ossatures métalliques, comme les barrages de correction) dans le cadre du contrôle des risques naturels, l'objectif étant de restaurer les environnements dégradés ou de prévenir les dégradations futures lors de nouvelles constructions. L'Union européenne et de nombreux pays dans le monde encouragent ainsi désormais le recours aux techniques de génie végétal, souvent à travers des programmes incitatifs visant à en promouvoir l'usage prioritaire (voir par exemple European Commission, 2013). L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) soutient de manière proactive l'usage de Solutions fondées sur la nature (SfN) (Nesshöver *et al.*, 2017) et de l'ingénierie écologique pour la prévention des risques de catastrophes naturelles (EcoDRR), et intègre le génie végétal parmi les techniques de protection contre les risques (Renaud *et al.*, 2016).

En France, les connaissances sur l'efficacité des techniques de génie végétal dans le contrôle de l'érosion sont issues de l'expérience séculaire des services RTM depuis 1860, ainsi que, plus récemment, de l'expérience de bureaux d'études et d'entreprises. Des guides de génie végétal pour le contrôle de l'érosion, principalement en anglais, peuvent aider aux bonnes pratiques dans ce domaine. Certains sont des catalogues de techniques, sous forme de dictionnaires multilingues (par exemple Zeh, 2007). D'autres constituent essentiellement des guides techniques de construction des ouvrages (Schiechtel et Stern, 1996 ; 1997 ; Gray, 2003 ; Zeh, 2007). Enfin, certains guides ou articles, au-delà de la description des ouvrages, proposent des éléments de diagnostic et de stratégie pour la réalisation des opérations de génie végétal, avec une application principalement aux berges de rivières (Adam *et al.*, 2008), aux pentes et talus (Gray et Sotir, 1996 ; Norris *et al.*, 2008), aux bassins versants torrentiels (Rey, 2011) ou à l'ensemble de ces milieux (Coppin et Richards, 2007 ; Crosaz *et al.*, 2014).

I Un processus interactif entre chercheurs et praticiens

Comme pour l'ingénierie écologique, le génie végétal implique une interaction forte entre les chercheurs et les praticiens, à savoir entre la connaissance et son application (Stokes *et al.*, 2014). Les questions soulevées sont de plus en plus complexes, et nombre de praticiens sont désormais impliqués dans les projets de recherche, ce qui permet d'améliorer le dialogue et les échanges entre les différents acteurs. Les projets de génie végétal peuvent également bénéficier d'approches plus orientées vers l'interdisciplinarité, et d'une meilleure compréhension des contraintes rencontrées par les praticiens, comme le choix des matériaux et les coûts.

Les projets de génie végétal appellent à la mise en place d'une démarche de réflexion et de travail spécifique qui peut se décliner sur trois plans (Rey, 2014c) :

- le questionnement : identification des problèmes techniques, socio-économiques et écologiques, évalués par les praticiens. Les donneurs d'ordre et les praticiens, ainsi que les chercheurs le cas échéant, doivent collaborer afin de s'accorder sur les objectifs spécifiques à atteindre pour les résoudre ;
- la recherche finalisée (si nécessaire) : traduction des préoccupations techniques, socio-économiques et écologiques en interrogations scientifiques, et accroissement des connaissances à travers les observations et les expérimentations ;
- la gestion : le génie végétal doit être en adéquation avec les politiques d'encouragement des solutions douces, notamment en intégrant les questions environnementales aux pratiques techniques standards telles que le génie civil. Les résultats de la recherche doivent ensuite être utilisés pour mettre au point des méthodes et des outils d'assistance à la gestion, à la conceptualisation des projets et aux actions. Ces outils doivent être conçus en collaboration avec les praticiens.

Le génie végétal fait appel à toutes les caractéristiques précitées, et la réussite d'un projet passe par des interactions étroites entre les parties prenantes. Une communication et une interaction renforcées doivent permettre de rendre les interventions basées sur le génie végétal plus efficaces au fil du temps et des expériences. Des programmes de suivi sur le long terme, avec des données de référence précises, sont nécessaires pour comparer des études de cas similaires et établir des bases de données partagées sur les réussites et les échecs des différentes techniques et matériaux végétaux utilisés (Perez *et al.*, 2017). Ces considérations devraient permettre d'améliorer la compréhension par les praticiens des connaissances récentes dans le domaine de l'écologie et des géosciences, et parallèlement d'accroître la compréhension par les scientifiques des besoins pratiques dans le domaine du génie végétal.

Restauration écologique et/ou contrôle des risques naturels ?

EN FONCTION DE L'OBJECTIF PRINCIPAL D'UN PROJET, le choix de l'opération de génie végétal et la stratégie définie sur le long terme peuvent varier de manière importante. Ainsi, l'érosion du sol ou du lit d'un cours d'eau peut causer différents types de dommages :

- perte d'horizon superficiel du sol, de matière organique et de nutriments, ce qui amenuise la qualité des sols, donc les rendements de culture, et par extension menace les activités agricoles (Jin *et al.*, 2008), pouvant également causer la dégradation d'infrastructures routières, de ponts et de voies ferrées ;
- modifications topographiques (déformation du terrain), avec le creusement de lits de ravine et le déclenchement de glissements de terrain (Poesen *et al.*, 2003) ;
- perte de biodiversité, ce qui affecte la végétation et les habitats naturels pour la faune (Mkanda, 2002) ;
- envasement des réservoirs d'eau, conséquence de l'érosion du sol et du transport de sédiments, ce qui compromet le fonctionnement de ce type de structure (Schleiss *et al.*, 2016) ;
- accroissement des inondations, causé par le dépôt de sédiments fins dans le lit des cours d'eau (Steiger *et al.*, 2001).

Les stratégies de contrôle de l'érosion des sols varient ainsi en fonction du type de problème à résoudre. Par exemple, si l'objectif final est de réduire la production de sédiments dans les rivières et les réservoirs, il suffit de contrôler le phénomène de sédimentation. Par conséquent, il est possible de laisser l'érosion se produire sur le versant d'une colline et de se contenter de piéger et retenir les sédiments avant qu'ils n'atteignent le lit d'un cours d'eau (Rey, 2009). Si l'érosion du lit d'une rivière cause un déplacement latéral et l'effondrement des berges, et impacte les infrastructures, l'objectif principal est de protéger ces installations à l'aide de solutions de génie végétal (et civil) spécialisées et adaptées, basées sur un rééquilibrage sédimentaire pouvant comporter une réalimentation du lit de la rivière en matériaux grossiers (Peklo, 2015). Si la préservation des sols et de la biodiversité est l'objectif final, il est nécessaire de mettre en place à la fois un contrôle de l'érosion et un processus de restauration écologique afin de prévenir le détachement et l'élimination des particules du sol (Petroni et Preti, 2010). Le principal défi auquel sont aujourd'hui confrontés les praticiens du génie végétal est de parvenir à définir des règles qui puissent répondre à un ensemble de fonctions et bénéfices divers et variés, notamment en vue de concilier la restauration écologique des milieux et le contrôle des risques naturels (Schmidt *et al.*, 2013).

Pour faire en sorte de répondre au mieux aux diverses problématiques posées, de nouveaux outils doivent être mis au point pour permettre de sélectionner, dimensionner et concevoir les structures de génie végétal : modèles d'interaction sol-végétation, cadres technologiques, approches méthodologiques et recommandations techniques. Il est particulièrement nécessaire de savoir comment utiliser les plantes pour atteindre les objectifs

visés et pour anticiper le développement spatio-temporel de l'ouvrage de génie végétal installé, tout en prenant en compte les conditions climatiques et écologiques d'un site. Au stade de l'avant-projet, l'ingénieur chargé de la conception doit pouvoir décider si les techniques de génie végétal sont applicables ou si elles doivent être utilisées en association avec d'autres techniques conventionnelles (techniques dites « mixtes »), afin d'améliorer la résistance structurelle et la résilience du système. Enfin, une vision globale et à long terme du projet est nécessaire, à toutes les échelles spatiales, de l'échelle locale à celle du bassin versant. Cette approche fait donc appel à l'esprit d'innovation des praticiens et soulève de nouvelles questions pour les scientifiques, au sein d'un processus interactif qui nécessite la conception et le suivi d'actions de génie végétal visant à conjuguer les attentes de restauration écologique des milieux et de contrôle des risques naturels.

Vers une conciliation entre restauration des milieux et prévention des inondations

DANS LE CADRE DE LA GEMAPI ÉVOQUÉE AU DÉBUT DE CE LIVRE, l'ingénieur du végétal doit chercher à répondre aux deux objectifs affichés de la Gema et de la PI. Il peut pour cela s'appuyer sur un savoir-faire existant en ingénierie végétale qui reste important aujourd'hui. Avec cette contrainte de la Gemapi, il s'ensuit toutefois des besoins nouveaux en ingénierie, qui concernent essentiellement le choix des ouvrages et la quantification des interventions, pour des actions qui concilient la Gema avec la PI sur un même site ou un même bassin versant. En effet, alors qu'aujourd'hui les actions de Gema et de PI sont souvent planifiées à différents endroits dans le bassin versant, une même action devra désormais s'envisager pour conjuguer les deux à même les sites traités, en même temps qu'elle devra permettre une gestion de l'eau par bassin versant, avec des questions de dépendance amont-aval et latérales (continuités écologiques et fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau) (figure 1).

Si de manière plus globale, comme nous l'avons vu plus tôt, il existe une littérature abondante sur le génie végétal, force est de reconnaître que celle-ci met souvent en avant l'apport des techniques végétales dans la gestion écologique des milieux, et plus particulièrement de leur restauration, ainsi que dans le contrôle de l'érosion et la stabilisation des milieux érodés (versants, berges de rivières, etc.). Ainsi, la végétalisation des versants d'un bassin pour réduire et ralentir le ruissellement, l'utilisation du génie végétal sur les berges des rivières pour leur restauration écologique ou pour limiter la vitesse du courant, ou toute autre utilisation du végétal dans des opérations de restauration hydromorphologique de cours d'eau, sont autant d'actions connues et éprouvées qui permettent de mieux conjuguer la restauration des milieux et le contrôle des risques hydrologiques. La manière dont ces ouvrages et la végétation qu'ils permettent d'installer contribuent plus spécifiquement à la prévention des inondations — au sens d'une participation aux mesures préventives pour une meilleure protection contre certaines inondations —,