

Mitteilungsblatt Nr. 3/2015, Dezember 2015
Bulletin no 3/2015, décembre 2015
Bollettino n. 3/2015, dicembre 2015
ISSN 1422-0008

Génie végétal et ingénierie végétale

***Ingenieurbiologie und pflanzliche
Bauweisen***

Ingegneria e biotecnica naturalistica

**INGENIEURBIOLOGIE
GENIE BIOLOGIQUE
INGEGNERIA NATURALISTICA**

**Mitteilungsblatt für die Mitglieder
des Vereins für Ingenieurbio-
logie**

Heft Nr. 4/2015, 25. Jahrgang
Erscheint viermal jährlich

Herausgeber:

Verein für Ingenieurbio-
logie
c/o HSR Hochschule für Technik Rapperswil
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum
Obersee-Strasse 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0)55 222 47 90
E-Mail: sekretariat@ingenieurbio-
logie.ch

Internet-Adresse:

http://www.ingenieurbio-
logie.ch

Druck:

Vögli AG, Langnau i. E.

**Verantwortlicher Redaktor/
Rédactrice responsable:**

Sebastian Schwindt
Assistant Docteurant
Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH)
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Station 18, CH-1015 Lausanne
Tel.: +41 21 693 2401
E-Mail: sebastian.schwindt@epfl.ch

**Redaktionsausschuss/
Comité de rédaction:**

Robert Bänziger
Tel.: +41 44 850 11 81
E-Mail: info@baenziger-ing.ch

Monika La Poutre
Tel.: +43 650 86 15215
E-Mail: m.stampfer@gmx.at

Roland Scheibli
Tel.: +41 43 259 27 64
E-Mail: roland.scheibli@bd.zh.ch

Christian Rickli
Tel.: +41 44 739 24 03
E-Mail: christian.rickli@wsl.ch

Lektorat/Lectorat:

Martin Huber
Tel.: +41 32 671 22 87
Fax: +41 32 671 22 00

Übersetzungen/Traductions:

Rolf T. Studer
E-Mail: rolf.studer@mail.com
Michel Jaeger
E-Mail: mr.mjaeger@gmail.com

Veranstaltungen:

Verein für Ingenieurbio-
logie
c/o HSR Hochschule für Technik Rapperswil
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum
Obersee-Strasse 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0)55 222 47 90
E-Mail: sekretariat@ingenieurbio-
logie.ch

**Weitere Exemplare dieses Heftes
können zum Stückpreis von Fr. 15.–
beim Sekretariat bezogen werden.**

Titelbild/Frontispice:

Renaturation d'une carrière
dans la Drôme (France)
Renaturation d'une carrière
dans la Drôme (France)
Rinaturazione di una cava
nel dipartimento della Drôme (Francia)

Ce numéro spécial fait suite à un colloque international sur le thème «Génie végétal et ingénierie végétale: compétences, réglementations et bénéfices», organisé à Lyon (France) du 23 au 25 novembre 2015 par l'Association française pour le génie biologique ou génie végétal (AGéBio), en association avec la Fédération européenne du génie biologique (EFIB) et l'Association fédérative des acteurs de l'ingénierie et du génie écologiques (A-IGEco). Le public était composé de chercheurs, de prescripteurs (ingénieurs-conseils, bureaux d'étude...), d'entrepreneurs (entreprises de travaux, fournisseurs de matériel végétal...), de formateurs et d'enseignants, de donneurs d'ordre, enfin d'étudiants. L'objectif était de rassembler l'ensemble des experts européens et mondiaux de cette thématique, afin d'échanger et de débattre sur les dernières avancées en termes de génie végétal et d'ingénierie végétale. Le colloque était orienté sur la thématique des compétences, de la réglementation et des bénéfices. Les thèmes abordés ont concerné essentiellement trois domaines: 1/ le contrôle, la stabilisation et la gestion des sols érodés; 2/ la restauration, la réhabilitation ou la renaturation de milieux dégradés, incluant une intégration paysagère des aménagements; 3/ la phytoremédiation ou phytoremédiation par les phytotechnologies, correspondant à l'épuration ou la dépollution des sols et des eaux. Les organisateurs remercient Irstea et le projet Captiven, ainsi que le Labex OSUG@2020 de l'Observatoire des sciences de l'univers de Grenoble (OSUG), pour leur aide financière (projets financés par l'ANR dans le cadre des Investissements d'avenir).

Ce numéro a été coordonné par F. Rey, V. Breton, Y. Crosaz, D. Grandgirard, G. Huyghe, A. Maingre, K. Peklo et A. Stokes (AGéBio)

Diese Sonderausgabe resultiert aus einem internationalen Kolloquium zum Thema «Ingenieurbio- und pflanzliche Bauweisen: Kompetenzen, Regulierungen und Vorteile». Das Kolloquium fand zwischen dem 23. und 25. November in Lyon (Frankreich) statt und wurde von der französischen Vereinigung für Ingenieurbio- und pflanzliche Bauweisen (AgéBio) organisiert, in Kooperation mit dem europäischen Verband für Ingenieurbio- (EFIB) und der föderativen Vereinigung aktiver Ingenieure und Bioingenieure (A-IGEco). Das Publikum bestand aus Forschern, Entscheidungsträgern (beratende Ingenieure, Ingenieurbüros), Unternehmern (ausführende Unternehmen, Materialzulieferern), Dozenten und Lehrern, Auftraggebern und auch Studenten.

Das Ziel war es, alle europäischen und weltweiten Experten dieser Thematik zusammenzuführen, um sich auszutauschen und über die jüngsten Fortschritte in den Bereichen der Ingenieurbio- und des pflanzlichen Bauens zu debattieren. Das Kolloquium orientierte sich an Kompetenzen, Regulierungen und Vorteilen. Die behandelten Themen betrafen hauptsächlich drei Felder: 1) Kontrolle, Stabilisierung und Umgang mit Bodenabtrag, 2) Instandsetzung, Rehabilitation oder Renaturierung von Gebieten in schlechtem [unnatürlichen] Zustand, inklusive der landschaftlichen Integrierung baulicher Strukturen, 3) Pflanzliche Sanierungsmassnahmen durch Phytotechnologien, d.h. Reinigung oder Entgiftung von Böden und Gewässern. Die Organisatoren danken dem Irstea und dem Projekt Captiven, sowie Labex OSUG@2020 des Observatoriums der Weltraumwissenschaften Grenoble (OSUG), für ihre finanzielle Unterstützung (Projekte finanziert durch das ANR im Rahmen zukünftiger Investitionen).

Questo numero speciale fa seguito ad un colloquio internazionale sul tema «Ingegneria e biotecnica naturalistica: competenze, regolamentazione e benefici», organizzata a Lione (Francia) tra il 23 e il 25 novembre 2015, dall'Associazione francese per la biotecnica e l'ingegneria naturalistica (AGeBio), in collaborazione con la Federazione europea della biotecnica naturalistica (EFIB) e l'Associazione federativa degli attori dell'ingegneria e della biotecnica naturalistica (A-IGEco). Il pubblico era composto da ricercatori, progettisti (consulenti tecnici, uffici privati), imprenditori (imprese sul campo, fornitori di materiale vegetale...), formatori professionali ed insegnanti, legislatori e, infine, studenti. L'obiettivo era di riunire insieme gli esperti europei e mondiali in questo ambito, al fine di poter discutere dei recenti sviluppi in tema di biotecnica ed ingegneria naturalistica. Il dibattito è stato orientato principalmente su tre settori: 1/ il controllo, la stabilizzazione e la gestione dei suoli erosi, 2/ la restaurazione, la riabilitazione o la rinaturalizzazione dei terreni degradati, includendo nella sistemazione il paesaggio, 3/ la fitoremediation o la fitodepurazione per fitotecnologie, corrispondente all'epurazione o alla depurazione dei terreni e delle acque. Gli organizzatori ringraziano Irstea e il progetto Captiven, oltre al Labex OSUG@2020 dell'Osservatorio di scienze dell'università di Grenoble (OSUG), per il contributo finanziario (progetto sostenuto dall'ANR nell'ambito degli Investimenti per l'avvenire).

Génie végétal et ingénierie végétale: des compétences et une réglementation aux bénéfices de la nature et de l'homme

Rey F., Breton V., Crosaz Y., Grandgirard D., Huyghe G., Maingre A., Peklo K., Stokes A.

Résumé

Le génie végétal, ou génie biologique, désigne la mise en œuvre des techniques utilisant les végétaux et leurs propriétés mécaniques et/ou biologiques pour le contrôle de l'érosion des sols, la restauration de milieux dégradés et la dépollution des sols et des eaux. L'ingénierie végétale désigne la conception des projets d'application du génie végétal ou génie biologique. Aujourd'hui, la filière de ces deux domaines est en plein essor, en particulier en France et en Europe. Les professionnels expriment tous leurs besoins de reconnaissance et de développement des compétences et du savoir-faire, de consolidation et d'évolution des réglementations et directives en vigueur, ainsi que d'une meilleure identification des bénéfices issus du génie végétal. Ainsi, depuis peu, les acteurs de cette filière se structurent pour mieux se connaître et mettre leurs compétences en synergie. Les spécialistes de l'ingénierie végétale et du génie végétal prônent une éthique et une réglementation renforcées pour l'exercice de leur métier. Enfin, les professionnels reconnaissent la nécessité aujourd'hui de mieux identifier les bénéfices que les milieux naturels et les populations retirent des actions par et/ou pour le vivant. Pour cela, l'accroissement des connaissances et des données scientifiques, ainsi que la formalisation de formations tant initiales que continues, peuvent avantageusement contribuer à ce développement actuel de l'ingénierie végétale et du génie végétal.

Mots-clés

génie végétal, génie biologique, ingénierie écologique, végétation, services écosystémiques

Ingenieurbiologie und Pflanzenbau: Fachwissen und gesetzliche Regelung zum Wohl der Natur und des Menschen

Zusammenfassung

Die Ingenieurbiologie beschreibt die Umsetzung von Techniken basierend auf Pflanzen, sowie ihrer mechanischen und / oder biologischen Eigenschaften zur Kontrollierung der Bodenerosion, der Instandsetzung modifizierter Naturräume und der Reinigung kontaminierter Böden und Gewässer. Der Pflanzenbau beschreibt den Entwurf von Projekten im Anwendungsbereich der Ingenieurbiologie. Vor allem in Frankreich und in Europa sind heute beide Domänen auf dem Vormarsch. Ingenieure sind dankbar, ihre Bedürfnisse anbringen zu können, in Form der Festigung ihrer Kompetenzen und ihres Fachwissens, sowie der Entwicklung gesetzlicher Regelungen und die Identifizierung von Vorteilen der Ingenieurbiologie. Seit Kurzem sind die beteiligten Akteure dabei sich zu strukturieren um sich besser kennenzulernen und Synergieeffekte ihres Wissens zu erzielen. Die Spezialisten der Botanik und der Ingenieurbiologie streben eine Ethik und eine verstärkte gesetzliche Regelung für die Ausübung ihres Berufes an. Schliesslich wissen die Experten heute um die Notwendigkeit, dass es zum Wohl aller Lebewesen besser ist die Vorteile der Natur zu identifizieren, um die Notwendigkeit der späteren Revidierung menschlicher Eingriffe zu vermeiden. Dabei können die Vertiefung des Wissens und wissenschaftliche Studien, sowie die gesetzliche Rahmgebung für die Aus- und Weiterbildung von Fachpersonal positiv zur aktuellen Entwicklung des Bauens mit Pflanzen und der Ingenieurbiologie beitragen.

Keywords

Bauen mit Pflanzen, Ingenieurbiologie, Ökoengineering, Vegetation, Ökosystemdienstleistungen

Ingegneria naturalistica e biotecnica naturalistica: competenze e regolamentazione a favore della natura e dell'uomo

Riassunto

L'ingegneria naturalistica, o biotecnica naturalistica, si occupa della realizzazione di opere contro l'erosione del suolo, di rinnovamento di siti degradati e di depurazione di suoli e acque inquinate utilizzando le piante e le loro proprietà meccaniche e/o chimiche. L'ingegnere naturalista definisce quindi come applicare i concetti dell'ingegneria naturalistica o della biotecnica naturalistica. Oggigiorno, questi settori sono in pieno sviluppo in Europa e particolar modo in Francia. Gli esperti del settore manifestano il loro bisogno di sviluppo delle competenze e conoscenze, di consolidazione e miglioramento delle normative in vigore, nonché la necessità di una migliore identificazione dei benefici apportati dall'ingegneria naturalistica. Sicché negli ultimi tempi, gli attori di queste filiere si stanno organizzando per instaurare una migliore cooperazione e condividere e integrare così le loro competenze. Gli specialisti dell'ingegneria naturalistica e della biotecnica naturalistica raccomandano un'etica e una regolamentazione rafforzate per l'esercizio della loro professione. Inoltre, gli esperti del settore sottolineano la necessità d'identificare meglio i benefici che la popolazione può ottenere dalle opere realizzate per il mantenimento degli habitat naturali. Per queste ragioni, l'aumento delle conoscenze e dei dati scientifici, così come la formazione di base e quella continua, possono contribuire positivamente allo sviluppo dell'ingegneria naturalistica e della biotecnica naturalistica.

Parole chiave

Ingegneria naturalistica, biotecnica naturalistica, Eco-ingegneria, vegetazione, servizi eco-sistemic

Génie végétal et ingénierie végétale

Selon une définition commune de l'Association française pour le génie biologique ou génie végétal (AGéBio, 2015) et du Groupe Travaux et Métiers « Génie végétal » de l'Union nationale des entreprises du paysage (UNEP), le génie végétal, ou génie biologique, désigne la mise en œuvre des techniques utilisant les végétaux et leurs propriétés mécaniques et/ou biologiques pour: 1/ le contrôle, la stabilisation et la gestion des sols érodés, 2/ la restauration, la réhabilitation ou la renaturation de milieux dégradés, incluant une intégration paysagère des aménagements, 3/ la phytoréhabilitation ou phytoremédiation par les phytotechnologies, correspondant à l'épuration ou la dépollution des sols et des eaux. L'ingénierie végétale désigne quant à elle la conception des projets d'application du génie végétal (Rey et al., 2015).

Aujourd'hui, la filière englobant ces deux domaines est en plein essor, en particulier en France et en Europe. Les professionnels expriment tous leurs besoins de reconnaissance et de développement des compétences et du savoir-faire, de consolidation et d'évolution des réglementations et directives en vigueur, ainsi que d'une meilleure identification des bénéfiques issus du génie végétal. Ainsi, depuis peu, les acteurs de cette filière se structurent pour mieux se connaître et mettre leurs compétences en synergie. Les spécialistes de l'ingénierie végétale et du génie végétal prônent une éthique et une réglementation renforcées pour l'exercice de leur métier. Enfin, les professionnels reconnaissent la nécessité aujourd'hui de mieux identifier les bénéfiques que les milieux naturels et les populations retirent des actions par et/ou pour le vivant. Des questions émergent alors : quel est l'état actuel des filières et quelles sont les problématiques posées ? Qui détient les compétences aujourd'hui et quels sont les besoins de savoir-faire en ingénierie végétale et en génie végétal ? Quelles sont les nouveautés ou pistes de recherche en écologie végétale et ingénierie ? Quelles formations (initiales et continues) existent et quels sont les besoins d'évolution ?



Figure 1 : Aménagement de génie végétal associant seuils, géofilet biodégradable et végétaux.
Abbildung 1: Anwendung der Ingenieurbiologie mit Kombination von Sohlschwellen, biologisch abbaubarem Geotextil und Pflanzen.

Reconnaissance et développement des compétences

Comme indiqué en introduction de cet article, les professionnels œuvrant pour le génie écologique en général et le génie végétal en particulier se structurent et intensifient leurs échanges depuis quelques années. Citons par exemple la création de l'AGéBio en 2009, qui a rejoint récemment la plate-forme européenne que constitue la Fédération européenne du génie biologique (EFIB), ainsi que celle de l'Association fédérative des acteurs de l'ingénierie et du génie écologiques (A-IGEco) en 2014, mais aussi la tenue du colloque « Génie végétal et génie écologique: le savoir-faire des experts du paysage et du végétal », organisé tous les deux ans depuis 2012 par l'interprofession Val'Hor, à l'initiative de l'UNEP et de l'AGéBio, et enfin la formalisation d'annuaires, comme celui de la filière du génie écologique, sous l'égide du Ministère de l'écologie (MEDDE), ou celui de la filière du génie végétal, édité par l'AGéBio.

Stokes et al. (2014) et plus spécifiquement Rey et al. (2015) ont dressé récemment un constat sur la situation et l'avenir du génie végétal et de l'ingénierie végétale. Ils mettent tout d'abord en avant l'importance des compétences mises en œuvre dans ces deux domaines, expliquant que l'ingénierie

végétale et le génie végétal restent des affaires de spécialistes détenteurs d'un savoir-faire en la matière, comme le confirme Crosaz (2015). Ce savoir-faire leur attribue toute légitimité pour choisir et dimensionner les ouvrages adaptés à la problématique rencontrée (Peklo, 2015). Les guides de génie végétal existant, par exemple ceux de Lachat (1994), Zeh (2007), Adam et al. (2008) et Rey (2011), ou encore plus récemment celui co-rédigé par le consortium UNEP-AGéBio-FFP-AITF-HORTIS (2014), ne sont là que pour orienter et expliquer les choix, tout en décrivant les réalisations d'ouvrages, mais n'évitent pas l'intervention d'un ingénieur-conseil. Cela est d'autant plus vrai que les projets d'ingénierie végétale sont la plupart du temps pluridisciplinaires, car nécessitant une vision élargie des projets, empreints d'écologie et de biologie, mais aussi de géomorphologie, d'hydraulique ou de géotechnique, à diverses échelles d'espace et de temps. Parmi les nombreux problèmes se posant aujourd'hui, Huyghe et al. (2015) abordent ceux de la qualité, de la disponibilité et de la traçabilité du matériel végétal, que ce soit pour les plants, les boutures ou les semences. Ils mettent l'accent sur la nécessité de fuir les mélanges standards issus de programmes d'amélioration génétique, pour exiger

des variétés adaptées aux objectifs et aux conditions pédo-climatiques des chantiers. Naturellement, ces variétés doivent apparaître dans les catalogues des fournisseurs. Il faut souligner ici l'intérêt des démarches actuelles portées par le programme Végétal local & Vraies messicoles, qui vise à soutenir la commercialisation et l'utilisation de végétaux d'origine locale. Mais il faut aussi reconnaître que ces démarches ne couvrent pas complètement les différentes espèces utilisées en génie végétal et qu'une évolution du cadre réglementaire sur la commercialisation des graines et plants reste souhaitable. Le choix et le dimensionnement des ouvrages de génie végétal représentent l'autre principal défi qui se pose à l'ingénieur-conseil. Qu'en est-il aujourd'hui par exemple des connaissances sur la résistance mécanique des matériaux et des ouvrages aux contraintes? Si des chiffres de résistance apparaissent bien dans certains guides ou documents techniques, on ne sait pas toujours très bien quelle est leur origine et leur fiabilité, surtout devant la multiplicité des situations rencontrées sur le terrain. Ainsi, il faut plus que jamais que les choix soient guidés tout autant par la compréhension du milieu dégradé auquel on est confronté, comme le soulignent Crosaz (2015) et Peklo (2015), que par la connaissance des produits, comme par exemple les géofiliers biodégradables (Mary et al., 2015) ou les géosynthétiques (Ducol et Tankéré, 2015) (Figure 1).

Pour répondre en partie à ces lacunes de l'ingénierie végétale, on peut avantageusement compter sur les scientifiques, à même de développer des projets de recherche finalisée (Burylo et Rey, 2015) et cherchant à répondre à de nombreuses questions: quelle est la résistance des ouvrages face à des facteurs hydrologiques ou gravitaires? Quel matériel végétal et quelles espèces utiliser? Comment apprécier la dynamique végétale sensée assurer une action croissante de la végétation dans le temps vis-à-vis de ces facteurs? Et finalement, quelle est l'efficacité des végétaux, selon leur nature, leur abondance et leur diversité sur le milieu dégradé?



Figure 2: Aménagement de génie végétal à rôle de stabilisation de berges de rivière.
Abbildung 2: Anwendung der Ingenieurbiologie für die Stabilisierung der Uferböschungen eines Flusses.

Une autre nécessité est aujourd'hui le développement d'enseignements adaptés, à même de former des spécialistes de l'ingénierie végétale et du génie végétal. Parmi les initiatives récentes allant dans ce sens, citons celles d'AgroParisTech et de l'institut LaSalle Beauvais, qui proposent des modules d'enseignement tournés vers l'ingénierie végétale et le génie végétal, ou encore plus largement celle de l'ATEN, qui a rédigé des fiches métiers pour des formations d'ingénieur et de technicien en génie écologique.

Toutes ces évolutions ont un point commun en ligne de mire: l'établissement de cahiers des charges adaptés et cohérents en ingénierie végétale. Se pose alors une nouvelle question: celle du respect de leur mise en œuvre, appelant à l'établissement d'une réglementation adaptée.

Consolidation et évolution des réglementations et des directives

Les professionnels de l'ingénierie végétale et du génie végétal prônent aujourd'hui une éthique pour l'exercice de leur métier, afin de bénéficier de la reconnaissance qu'il leur est due (Huyghe et al., 2015). A cette fin, il apparaît nécessaire de s'appuyer sur les réglementations et directives en vigueur,

mais aussi, lorsque c'est possible, de les faire évoluer. Sur quelle base réglementaire l'ingénieur du végétal agit-il aujourd'hui? L'essor actuel du génie végétal doit beaucoup à la Directive cadre européenne sur l'eau (DCE). Adoptée en 2000 et transcrite en droit français en 2004, cette directive a instauré la nécessité de mettre en œuvre des techniques douces pour lutter contre l'érosion des sols et pour restaurer les milieux dégradés en général, dans un objectif global d'atteinte du bon état des masses d'eau: cours d'eau, lacs, eaux côtières, eaux souterraines.

Aujourd'hui, on se rend compte que le génie végétal et l'ingénierie végétale ne sont pas concernés par une seule réglementation, mais par plusieurs. Ces réglementations se définissent selon les finalités des opérations (gestion de l'eau, protection des sols...) et les moyens utilisés (commercialisation des végétaux, normes sur les matériaux...). Elles peuvent être perçues de deux façons différentes. Elles peuvent en effet apparaître parfois comme un frein, dans le sens où elles montrent aujourd'hui des insuffisances ou des inconvénients, et où elles semblent mal adaptées au contexte actuel. Mais elles peuvent apparaître aussi comme une opportunité si on considère les évolutions réglementaires récentes ou à venir en faveur de l'environnement. Ainsi, en janvier 2015, l'EFIB a publié ses Directives européennes pour le génie biologique (EFIB, 2015). Ayant mis à contribution les différentes associations nationales spécialisées œuvrant pour le génie végétal en Europe, elles doivent servir à la diffusion des connaissances et des savoir-faire liés aux techniques de génie végétal. Elles sont à considérer comme un soutien aux objectifs de transposition de diverses directives européennes, notamment la DCE, mais aussi la Directive sur les inondations, voire la future Directive sur les sols.

Meilleure identification des bénéfices issus du génie végétal

Les bénéfices qui ressortent de l'utilisation du génie végétal sont souvent plus nombreux qu'ils n'y paraissent. Ainsi, la finalité des actions de génie végétal est bien souvent écologique – la restaura-

tion d'un milieu dégradé par exemple. Mais la finalité peut être aussi économique et sociale. Un ouvrage de génie végétal peut notamment avoir pour rôle de consolider les berges d'une rivière ou lutter contre l'érosion (figure 2). Il peut dès lors être moins onéreux à installer et à gérer qu'un aménagement de génie civil, avec pour avantage une meilleure intégration dans le paysage (Bifulco et al., 2015). Un enjeu important pour le génie végétal reste ainsi aujourd'hui de mettre en avant l'ensemble des bénéfices induits par les projets l'utilisant, et liés aux services rendus par les écosystèmes. Cela doit permettre d'aider à mettre en avant les plus-values écologiques, économiques et sociales, tant qualitatives que quantitatives, des projets impliquant du génie végétal (Tournebize et al., 2015).

S'interroger plus largement sur les services rendus par l'action, au-delà de la réduction du dysfonctionnement (par exemple, quels impacts de l'action en termes de « restauration écologique » au sens large), doit permettre de valoriser au mieux le projet. Une évaluation des rapports coûts-avantages des interventions, en s'intéressant à un ensemble de services rendus, doit alors permettre de faire ressortir des bénéfices multiples. La mise au point d'outils d'évaluation des bénéfices du projet, si possible quantifiés et/ou chiffrés, doit permettre de mieux mettre en valeur les projets (valeurs écologique, économique et sociale, aménités...) et de mieux fixer les objectifs à atteindre.

Il s'agit finalement de situer l'intérêt du génie végétal sur les trois principales composantes du développement durable : environnementale (comparer les bilans carbone, les impacts sur la biodiversité), économique (bilans financiers) et sociale (aménités paysagères, emploi). Différents travaux déjà réalisés peuvent nous donner de premiers éléments d'analyse, mais cela reste partiel et une approche globale de la problématique reste à développer.

Bibliographie

ADAM P., DEBIAIS N., GERBER F., LACHAT B. 2008. Le génie végétal : un manuel technique au service de

l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. La documentation française, 290 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR LE GÉNIE BIOLOGIQUE OU GÉNIE VÉGÉTAL (AGéBio). www.agebio.org (consulté en 2015)

BIFULCO C., MARCOS PEREIRA A., CALADO FERREIRA V., PINTO MOTA A., RODRIGUES MARTINS L., CASTRO REGO F. 2015. Renewing dangerous highway slopes in Portugal. *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

BURYLO M., REY F. 2015. Effet des plantes sur les processus érosifs : de la connaissance des traits fonctionnels aux applications d'ingénierie végétale et de génie végétal. *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

CROSAZ Y. 2015. L'ingénierie du végétal au service de l'aménagement écologique et paysager des sites dégradés : connaissances, savoir-faire, carences et perspectives en matière de végétalisation par hydroensemencement. *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

DUCOL J.P., TANKERE M. 2015. Les matériaux synthétiques, alliés du génie végétal ? *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

EFIB. 2015. Directives européennes pour le génie biologique. 150 p.

HUYGHE G., BOURDUGE P., CROSAZ Y., REY F. 2015. Pour une meilleure production et utilisation du matériel végétal (semences, boutures, plants) dans les projets de génie végétal. *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

LACHAT B. 1994. Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales. Paris : ministère de l'Environnement, Diren Rhône-Alpes, 135 p.

MARY S., CROSAZ Y., DEBIAIS N., DOLCI F., DUCOL J.P., GRAND C., HUYGHE G., LIGNIER C., ROURE F., REY F. 2015. Développement de géofiliets biodégradables de qualité destinés à des opérations de génie végétal et écologique. *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

PEKLO K. 2015. L'apport d'un programme de modélisation hydrodynamique bidimensionnel au travail de l'ingénieur spécialisé dans les tech-

niques de l'ingénierie végétale pour le contrôle de l'érosion fluviale. *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

REY F. 2011. Génie biologique contre l'érosion torrentielle. Editions Quae. 100 p.

REY F., CROSAZ Y., DE MATOS M., CASSOTTI F. 2015. Génie végétal, génie biologique et génie écologique : concepts d'hier et d'aujourd'hui. *Sciences, eaux et territoires*, n° spécial « L'ingénierie écologique au service de l'aménagement du territoire », pp. 4-9.

STOKES A., DOUGLAS G., FOURCAUD T., GIADROSSICH F., GILLIES C., HUBBLE T., KIM J.H., LOADES K., MAO Z., MCIVOR I., MICKOVSKI S.B., MITCHELL S., OSMAN N., PHILLIPS C., POESEN J., POLSTER D., PRETI F., RAYMOND P., REY F., SCHWARZ M., WALKER L.R. 2014. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing practitioners and researchers. *Plant and soil*. vol. 377, pp. 1-23.

TOURNEBIZE J., CHAUMONT C., KCHOUK S., BOUARFA S., PULOU J., PASSEPORT E., FESNEAU C., GRAMAGLIA C. 2015. Les zones tampons humides artificielles : pour quoi et pour qui ? *Génie biologique*, n° spécial, ce numéro.

UNEP-AGÉBIO-FFP-AITF-HORTIS. 2014. Règles professionnelles : travaux de génie végétal. 32 p.

ZEH. 2007. Génie biologique : Manuel de construction. Vdf, 441 p.

Adresse de l'auteur :

AGéBio, 2 rue de la Papèterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères cedex, France (president@agebio.org)

L'ingénierie du végétal au service de l'aménagement écologique et paysager des sites dégradés :

Yves Crosaz

connaissances, savoir-faire, carences et perspectives en matière de végétalisation par hydroensemencement

Résumé

L'hydroensemencement est une des techniques du génie végétal clairement identifiée et précisément décrite dans la récente règle professionnelle de l'Union nationale des entreprises du paysage (UNEP, 2015). Mis en œuvre en France depuis bientôt 50 ans, il a été développé par quelques professionnels, tant scientifiques, ingénieurs-conseils, qu'entreprises du paysage, convaincus de l'intérêt technique et financier de l'utilisation des semences comme réponse pertinente à la stabilisation superficielle des sols (lutte contre l'érosion), à la cicatrisation des paysages et plus généralement à la renaturation des espaces dégradés. Paradoxalement, alors que la demande sociétale en matière de biodiversité n'a jamais été aussi forte, les connaissances et les savoir-faire de haut niveau nécessaires de la part des prescripteurs et réalisateurs sont néanmoins souvent sacrifiés sur l'hôtel du moindre coût. Il conviendrait par conséquent que l'ensemble de la filière se mobilise pour redynamiser ce secteur d'activité et, en première ligne, les donneurs d'ordres ont un grand rôle à jouer...

Mots-clés

hydroensemencement, végétalisation, semences, ingénierie, génie végétal

Das Bauen mit Pflanzen im Dienst ökologischer Baumassnahmen und für die Landschaftsgestaltung beeinträchtigter Standorte: Kenntnisse, Fachwissen, Versagen und Perspektiven für die Begrünung in Form des Ausbringens von Hydrosaat

Zusammenfassung

Die neueste Vorschrift der «Union nationale des entreprises du paysage» (UNEP, 2015 [auf Französisch]) impliziert den Einsatz von Hydrosaat in Form einer gut erforschten und präzise erfassten Technik der Ingenieurbiologie. Die in Frankreich seit bald 50 Jahren angewendete Technik wurde von Spezialisten entwickelt, darunter Wissenschaftler, Ingenieurberater und landschaftsbauliche Unternehmen. Alle hatten die Überzeugung des technischen und finanziellen Potenzials der Anwendung von Saatgut als passende Antwort für die Bodenstabilisierung (Kampf gegen die Erosion) zur Instandsetzung der Landschaft und generell der Renaturierung von Gebieten, die durch menschliches Handeln beschädigt sind. Paradox dazu, da die soziale Nachfrage nach Biodiversität nie grösser war, werden die Kenntnisse und das notwendige Fachwissen sehr hohen Niveaus für Leitfäden und prakti-

zierendes Personal trotzdem oft für die Kostensenkung geopfert. Es wäre daher sinnvoll, wenn die Gesamtheit aller Beteiligten aufsteht, um das Geschäftsfeld wachzurütteln, wobei in erster Linie die Gesetzgeber eine grosse Rolle spielen...

Keywords

Hydrosaat, Rekultivierung, Saatgut, Ingenieurwesen, Ingenieurbiologie

L'ingegneria naturalistica al servizio della sistemazione ecologica e paesaggistica dei siti degradati: conoscenze, savoir-faire, carenze e prospettive in materia di vegetazione per idrosemina

Riassunto

L'idrosemina é una tecnica dell'ingegneria naturalistica conosciuta e chiaramente descritta all'interno del pro-



Après germination des semences, le couvert végétal s'implante progressivement, aidé par la présence d'un géofilet biodégradable fixé au sol.

Nach der Keimung des Saatguts entwickelt sich die Pflanzendecke progressiv, unterstützt durch ein biologisch abbaubares Geotextil, das im Boden verankert ist.

to collo professionale dell'Unione nazionale delle aziende per il paesaggio (UNEP, 2015) recentemente redatto. Concepita in Francia all'incirca da 50 anni, è stata sviluppata per opera di professionisti, sia da collaboratori scientifici ed ingegneri, che da ditte operanti nel paesaggismo, convinti dell'interesse tecnico e finanziario della semina come risposta pertinente alla stabilizzazione superficiale dei terreni (lotta contro l'erosione), alla ricostruzione dei paesaggi e, più generalmente, alla rivitalizzazione delle zone danneggiate. Paradossalmente, nonostante la domanda in tema di biodiversità non sia mai stata talmente forte come oggi, le conoscenze e le capacità professionali di alto livello degli specialisti del settore sono spesso sacrificate in favore di un'offerta a basso costo. Di conseguenza, ne conviene che l'intera filiera si metta in moto al fine di rilanciare questo settore, ed in questo, i legislatori hanno un ruolo fondamentale...

Parole chiave

idrosemina, vegetalizzazione, sementi, ingegneria, Ingegneria Naturalistica

Introduction

Utiliser les plantes comme matériel de construction n'est certes pas une idée nouvelle. En France, cela fait plusieurs décennies que les techniques dites de « génie végétal » sont proposées à l'aménagement d'ouvrages en complément, voire en remplacement, des techniques plus anciennes du Bâtiment et des travaux publics (BTP) ayant fait leurs preuves. Au départ, les ingénieurs-conseil, spécialistes en la matière, font évoluer les solutions techniques et innovent en rapport avec une demande croissante et des finalités diverses : besoin de verdure, piégeage de CO₂, respect de la biodiversité, renaturation d'espaces, reconstruction de paysages, contrôle d'espèces indésirables...

Mais le matériel végétal n'est pas une brique de construction d'ouvrage comme les autres ! C'est une brique vivante, qui évolue dans le temps, parfois

très rapidement, en interaction avec le milieu dans lequel elle est placée. Ainsi, les semences germent et des couverts herbacés se mettent en place puis changent au fil des saisons...

Construire avec le végétal implique des connaissances approfondies en biologie, physiologie et écologie du végétal. Mais pas uniquement. Il faut aussi connaître un minimum la mécanique des sols, leur fonctionnement, les processus d'érosion, les impacts du climat, les disponibilités commerciales et la réglementation des semences... Autant de sujets qui viennent s'ajouter à la longue liste constituant l'environnement de travail que les ingénieurs-conseils, spécialisés en ingénierie du végétal, doivent savoir maîtriser, afin de passer le cap de la « simple » prescription technique pour entrer au cœur du sujet : l'argumentaire du comment en réponse au pourquoi.

Ces 20 dernières années, des avancées significatives ont été faites et parfois consignées et partagées dans des documents dont certains ont valeur de références (SETRA 1994 – Dinger 1997, SNCF 1996 – AFNOR 1998, ADEME 2007 – SNEEP 2008...).

En 2009, une structure interprofessionnelle, l'Association française pour le génie biologique ou génie végétal (AGéBio), est créée à l'initiative de quelques-uns de ces spécialistes. L'objectif est notamment de promouvoir en France l'utilisation des techniques du génie biologique ou génie végétal, preuve s'il en est que les professionnels sont présents et se structurent à l'échelon national.

Éléments de constats

Il y a dix ans, un état des lieux mettait en lumière des carences spécifiques à chacun des intervenants de la filière (Crosaz, 2005) : du maître de l'ouvrage, souvent peu sensibilisé, aux fournisseurs parfois prompts à livrer sur chantier une fourniture variante au marché, en passant par les maîtres d'œuvre faisant montre quelquefois d'une certaine incompétence.

En 2015, force est de constater que sur le terrain, la situation générale laisse encore à désirer et que la marge de progrès reste parfois énorme.

Maîtrise d'ouvrage

La maîtrise d'ouvrage attribue les marchés de maîtrise d'œuvre à des prix de plus en plus bas : il y a une quinzaine d'années, la rémunération des maîtrises d'œuvre « généraliste » pour des projets d'envergure se situait autour de 6 à 8% du coût des travaux suivant leur complexité. Il n'y avait déjà pas toujours de quoi emmener dans les équipes pluridisciplinaires des ingénieurs-conseils spécialisés en ingénierie du végétal, d'autant plus que la demande de ces spécialistes au sein des équipes n'était pas exigée par la maîtrise d'ouvrage. Aujourd'hui, la concurrence effrénée entre les candidats et alimentée au quotidien par des donneurs d'ordres en manque de budget, s'exerce aux alentours de 2,5 à 3,5% du coût total des travaux. Une baisse de rémunération de 50% en une quinzaine d'années, alors même que les charges relatives au fonctionnement des entreprises ont dans le même temps significativement augmenté. Ce constat sans concession est consigné dans un récent rapport intitulé « Les années sans croissance ont comprimé les marges des services de prestations intellectuelles » (Ouvrard, 2015). La fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du Conseil, de l'Ingénierie et du Numérique (CINOV), milite depuis plusieurs années pour une « juste » rémunération de la maîtrise d'œuvre. Quelle place pour une ingénierie spécialisée, qualitative, formée, innovante, à la pointe des nouvelles techniques dans ce contexte et au fait des nouvelles réglementations toujours plus nombreuses ?

Maîtrise d'oeuvre

Effectivement, quelques-uns savent parfaitement bien aujourd'hui établir une composition plurispécifique d'espèces végétales herbacées adaptée au chantier considéré et à l'objectif poursuivi, tenant compte de la disponibilité commerciale du moment et inscrites dans une réalité économique acceptable pour le payeur.

Pour autant, les entrepreneurs constatent régulièrement que les préconisations en la matière, inscrites noir sur blanc dans les cahiers des clauses techniques particulières (CCTP), peuvent être irréalistes. La raison est évidente et correspond à



Mélange plurispécifique de semences d'espèces végétales herbacées.
Mischung von Samen einer Vielzahl von Gräsern.

l'absence ou à la carence de compétences de la part de l'ingénierie.

Un récent dossier de consultation pour divers travaux d'aménagement en montagne est révélateur de la situation. En ce qui concerne la fabrication du béton, la qualité du sable est encadrée dans le CCTP jusque dans les moindres détails: il doit provenir de carrières ou gravières de la région agréées par le maître d'œuvre, il doit être issu de roches stables c'est-à-dire inaltérables à l'air, à l'eau, au gel (conformément à une norme), il doit avoir un équivalent de sable supérieur à 75% et doit être de classe granulatoire 0,085 mm. Même l'eau de gâchage est spécifiée: sa température ne doit pas excéder 20 degrés centigrade (sauf en cas de bétonnage par temps froid) et elle doit répondre aux spécifications d'un référentiel technique et d'une norme, tous les deux cités dans le texte. Et même la vibration interne du béton ne peut se faire qu'avec des vibrateurs agréés développant des fréquences élevées de 9000 à 20000 cycles par minutes. Quelle description ultra-précise!

Et qu'en est-il en ce qui concerne la végétalisation par hydroensemencement, l'origine, la nature et la qualité des semences, la qualité des autres fournitures et celle de l'eau pour constituer le

mélange hydraulique, le matériel utilisé, les dates d'intervention, les niveaux de résultats à atteindre, etc...? Lisez vous-même un extrait de ce dossier de consultation: « Engazonnement par hydroseeding: le mélange gazon sera de type rustique. Il devra être adapté à l'altitude et avoir une bonne résistance au soleil et à la sécheresse. Le mélange semis de gazon, engrais, fixateur et activateur de

germination pour projection, proposé par l'Entrepreneur, devra être soumis au Maître d'œuvre pour validation. Un regarnissage sera à faire sur les zones mal venues durant douze (12) mois après la première mise en œuvre. » Il n'y a aucune consistance technique aux propos de ce maître d'œuvre. En outre, la situation est pour le moins « guignolesque », mais c'est la loi (loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, dite loi MOP): le maître d'œuvre a la responsabilité de valider les propositions techniques de l'entreprise, qu'il est lui-même incapable de formuler.

Cher lecteur, le texte livré ci-dessus ne constitue en rien un élément de CCTP! Ces formules « copiées collées », aux textes abscons, qui témoignent de l'incompétence et de l'incurie de cette maîtrise d'œuvre, doivent absolument disparaître pour laisser place à des prescriptions techniques abouties, adaptées à chacune des situations et pour lesquelles la rédaction est conforme aux référentiels existants. Les demandes en matière de biodiversité nous amènent à en passer obligatoirement par là.

A l'antipode de ce premier exemple, voici une autre situation tout aussi intéressante: on trouve parfois dans des



Hydroensemencement des talus du col de la Bonette (Alpes-de-Haute-Provence) à plus de 2000 mètres d'altitude.

Ausbringen von Hydrosaat auf der Strassenböschung des Col de la Bonette (französische Seealpen) auf mehr als 2000 m Höhe.

CCTP relativement récents (serait-ce une mode en développement?) des compositions de mélanges à plusieurs dizaines de composants (on peut parfois dépasser les 50). Sur le papier, cela pourrait paraître séduisant et promoteur d'une biodiversité à venir. La réalité est toute autre. D'abord parce qu'il a été montré, sur un panel d'ouvrages en terre en conditions climatiques diverses (Crosaz, 2005), que les concurrences qui se mettent en place entre les individus des diverses espèces d'une part, et entre les individus d'une même espèce d'autre part, aboutissent rapidement à l'implantation des quelques espèces les plus agressives. C'est le cas notamment, si parmi les espèces prescrites, on trouve des espèces de grandes cultures. Ainsi, tous les autres composants du mélange n'ont pas le temps et l'espace suffisants pour s'exprimer. En conclusion, on ne peut pas recréer immédiatement et directement une biocénose diversifiée et en équilibre avec le nouveau milieu. La démarche intellectuelle consiste donc à « donner un coup de pouce à la nature » en aidant à la cicatrisation du milieu perturbé.

Ensuite et c'est bien là le facteur déterminant et limitant, la disponibilité commerciale des lots de semences est primordiale. Aucune « belle formule » ne tient face à l'indisponibilité des semences. Et en fin de compte, relativement peu d'espèces sont disponibles sous forme de semences en quantité suffisante pour permettre une prescription « en routine ». Les producteurs de semences de ce type en France se comptent sur les doigts d'une main. A partir de données récentes fournies par le Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants (GNIS) pour la saison 2013–2014, voilà quelques données qui illustrent bien la situation : sans compter les espèces dites « agricoles » (fétuques, trèfles, sainfoin...), environ 130 espèces sont identifiées dans les divers mélanges déclarés. Les huit premières, dont la petite pimprenelle, le plantain lancéolé, la canche cespiteuse ou l'anhyllide vulnérable, totalisent près de 80% de la masse totale commercialisée, les trente premières 98%. Les 70 dernières espèces (54% de la

palette végétale) présentent chacune une masse totale incorporée inférieure à 10 kg en une année. Ces quelques chiffres, qu'il faudrait en toute rigueur moduler, notamment en fonction du PMG des semences (PMG = poids de mille grains ; les espèces qui ont de très petites semences nécessitent par conséquent de très petites quantités à incorporer), témoignent néanmoins bien d'une demande, en l'état, caractérisée par un petit nombre d'espèces produites en grande quantité, et au moins plus de la moitié vraisemblablement issues de collectes.

Les prescriptions de mélange dont les semences ne sont pas disponibles ou en si faible quantité conduisent à fausser la concurrence entre opérateurs : certaines entreprises feront « comme si » et répondront en première instance que le mélange livré sera conforme au CCTP, d'autres tenteront parfois coûte que coûte de répondre, ou d'alerter le demandeur, voire de proposer des variantes (lorsque celles-ci sont autorisées !) et se verront bien souvent exclure de la procédure... car restons lucides, n'en déplaise au rédacteur du Code des marchés publics : au moment du choix de l'entreprise chargée d'exécuter les

travaux, le prix reste encore le critère prépondérant au détriment de la qualité, et les marchés sont le plus souvent attribués au moins cher, non au mieux moins disant et cela fait plusieurs siècles que ça dure (Crosaz, 2005).

Entreprises

Même si le nombre d'hydrosemoirs présents sur le territoire national augmente, les entreprises spécialistes de l'hydroensemencement ne sont pas si nombreuses. Compte tenu des prix d'achat en baisse, certaines se diversifient en se positionnant sur d'autres marchés comme la végétalisation de toiture, par exemple. D'autres s'accrochent et continuent à répondre à des marchés pour lesquels les prix de revient avoisinent le prix de vente. Dans une sorte de fuite en avant, les bilans annuels d'activités font ainsi apparaître des augmentations parfois importantes des chiffres d'affaires... mais le volume d'affaires, sans possibilité de dégager de marge, est une course perdue d'avance, avec des difficultés voire des arrêts d'activités tout à fait possible.

Sur les chantiers, les situations se tendent dans la mesure, par exemple, où de moins en moins de personnes ont le temps de vérifier la qualité des four-



Des centaines de parcelles pour tester la pertinence de divers cultivars et mélanges plurispécifiques d'espèces végétales (station expérimentale de l'INRA à Mauguio-Hérault).
Hundertere Versuchsparzellen um die Eignung verschiedener Kultursorten und Mischungen einer Vielzahl von Pflanzenarten zu testen (Versuchsstand des INRA bei Mauguio-Hérault [französische Mittelmeerküste])

nitures. Sur un récent chantier, les travaux de végétalisation de remblais par hydroensemencement ont dû être stoppés et l'entreprise sommée de revenir la semaine suivante avec un mélange de semences conforme aux exigences du CCTP. En effet, le constat de qualité des fournitures a révélé que la totalité des variétés graminéennes du mélange était du type gazon, alors qu'il était attendu des variétés du type fourragère, prescrites dans le cadre d'une exploitation agricole du couvert végétal (pâture ou fourrage). Dans ce cas, nous avons tous conscience que c'est une perte financière pour l'entreprise, mais il convient que les travaux soient réalisés en conformité avec les prescriptions techniques.

Les pistes de développement

Les pistes pour un développement de la technicité des opérateurs de la filière et de leur activité sont diverses.

Maîtrise d'ouvrage : augmentation et amélioration de la demande

La première piste se situe évidemment du côté des donneurs d'ordres, qui doivent sortir de la stratégie « greenwashing » (procédé de marketing ou de relations publiques utilisé par une organisation dans le but de se donner une image écologique responsable. La plupart du temps, l'argent est davantage investi en publicité que pour de réelles actions en faveur de l'environnement) : il s'agit d'un secteur à forte valeur ajoutée qui réclame de leur part des exigences élevées en matière de spécialisation des intervenants, avec comme corollaire une augmentation des budgets.

Professionnalisation de l'ingénierie-conseil spécialisée

Les maîtrises d'œuvre doivent faire un effort de formation, tant sur les plans technique que réglementaire, en embauchant des ingénieurs-conseil à profil adapté et envoyés en formation continue. Citons une récente formation (fin 2015) dispensée par le Centre de formation professionnelle de l'ingénierie, du conseil et du numérique (IPTIC), qui vise à donner les premières clés de la pratique de la maîtrise d'œuvre aux écologues. Citons également la forma-

tion de la pratique du droit à titre accessoire nécessaire à l'activité principale, permettant à une société d'ingénierie de répondre aux exigences de l'arrêté n°742 du 19/12/2000, modifié le 01/12/2003.

La structuration de l'ensemble des professionnels

Le développement de l'AGéBio et de ses activités est bien entendu une autre piste particulièrement intéressante, puisqu'il permet de mettre en contact de plus en plus de professionnels, décideurs, prestataires, scientifiques, formateurs... œuvrant ensemble dans la définition et l'amélioration des bonnes pratiques, définissant des cadres déontologique et éthique... pour l'ensemble de la filière.

La réglementation

Le référentiel technique d'application obligatoire pour les marchés publics de travaux (CCTG, fascicule 35) mérite d'être rapidement mis à jour. La réglementation relative à la qualité technologique de lots de semences pourrait également être élargie à d'autres espèces : mieux encadrées sur le plan de la qualité de leurs semences commercialisées, certaines espèces pourraient ainsi bénéficier d'un effet levier et voir leur production augmenter avec la demande des prescripteurs

La recherche

Remobiliser des équipes de recherche, par exemple, pour des tests variétaux en routine des espèces de grandes cultures, Irstea (à l'époque Cemagref). Par la voix de Françoise Dinger, spécialiste reconnue notamment pour le domaine montagnard, l'institut de recherche a élaboré il y a plus d'une vingtaine d'années une composition que l'on pourrait qualifier de « généraliste », et qui a été appliquée depuis tout ce temps à grande échelle sur l'immense domaine skiable des 3 Vallées en Savoie ; le mélange est d'ailleurs connu sous l'appellation mélange « 3 vallées ». Quelques dix années plus tard, de l'avis même du fournisseur qui fabrique plus d'une centaine de tonnes de ce mélange chaque année, il se borne (et c'est tout à fait normal) à remplacer les variétés

qui disparaissent progressivement du catalogue officiel français des espèces et variétés au profit de nouvelles variétés inscrites. La composition spécifique n'a donc pas évolué depuis tout ce temps et les nouvelles variétés qui composent le mélange n'ont fait l'objet d'aucun test en conditions de montagne. Pour mémoire, abordons également la question du coût d'achat et du coût d'usage. Si ce mélange est autant prisé par les utilisateurs-acheteurs, c'est qu'il est identifié comme « mélange spécialisé » et parmi les moins chers au kg, environ 2,7 €/kg en 2004. Mais à la dose préconisée (275 kg/ha), le coût d'usage atteint les 740 €/ha. De nombreuses compositions sont aujourd'hui bien plus adaptées que le mélange « 3 vallées » mais affichent des prix à l'achat largement supérieurs, par exemple 4,3 €/kg, toujours en 2004 pour un chantier à plus de 1900 mètres. Et pourtant à l'usage, compte tenu du dosage de 120 kg/ha, le coût est de moins de 520 €/ha, soit un peu plus de 30% moins cher que le mélange « 3 vallées »... de quoi envisager, tout de même, une réforme de ce mélange...

Aide au développement de la production

La disponibilité commerciale de lots de semences fait (presque) tout. Et on assiste depuis des années au serpent qui se mord la queue : engager et investir dans la production d'une nouvelle espèce est risqué si la demande n'est pas assurée... mais la demande circonstanciée ne peut vraiment porter que sur le disponible ! Dans ces conditions, l'interprofession AGéBio, le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB), les donneurs d'ordres, par exemple les membres du Club Infrastructures Linéaires et Biodiversité (CILB)... doivent s'unir pour promouvoir la diversification et l'augmentation des productions de semences en France.

Bibliographie

ADEME, 2007. Végétalisation des anciennes décharges et autres fonciers dégradés en Languedoc-Roussillon, cahier technique, 89 p.

AFNOR, 1998. Norme P98-798, Matériels de viabilité hivernale et d'entretien des dépendances routières – Hydrosemoirs, mai 1998, 12 p.

Crosaz, Y. 2015. La réhabilitation des espaces dégradés : réflexion sur les clés du succès... Supplément à la revue Mines & Carrières n° 113, mars 2005: 13-20.

Dinger, 1997. Végétalisation des espaces dégradés en altitude, Irstea, Paris.

Ouvrard, J.F. 2015. Les années sans croissance ont comprimé les marges des services de prestations intellectuelles, document de travail n° 52, septembre 2015, Coe-Rexecode, Paris.

SETRA, 1994. La végétalisation, Guide technique, 1994, Bagneux.

SNCF, 1996. Cahier des prescriptions communes applicables aux marchés et travaux d'infrastructures ferroviaires, Livret 5.12, Fascicule III, Végétalisation par ensemencement, février 1996, Paris, 53 p.

SNEEP, 2008. Erosion, Végétalisation, Environnement, Paris, 88 p.

UNEP, 2015. Règles professionnelles n° N.C.1-R0, Travaux de génie végétal, février 2015, Editions de Bionnay, Lyon, 30 p.

Adresse de l'auteur :

Géophyte, 64 rue des Ecrins,
38530 Pontcharra,
France (info@geophyte.fr)

Nr.1

Hydrosaat
St. Ursen
Tel. 026 322 45 25
www.hydrosaat.ch

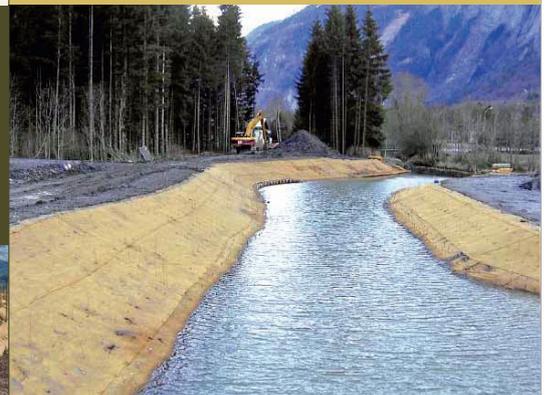
- **Ansaat**
von Strassen- und Bahnböschungen, Felspartien, Skipisten, Kies- und Schotterhalten und nichthumusierten Flächen
- **Dachbegrünungen**
mit Xeroflor®-Sedummatten für Dächer, Böschungen, Garten- und Rasenabschlüsse, Verkehrsinseln, Trottoirs
- **Ecotex®-Erosionsschutz**
mit Geotextilien, natürlich und biologisch abbaubar
- **Ingenieurbioologische Bauweisen**
Stützkonstruktionen zur Stabilisierung von Uferzonen und Böschungen



SOGEBIO
Géotextiles et paillages biodégradables

Géotextiles biodégradables Coco et Jute

LES GÉOTEXTILES
BIODÉGRADABLES
SOGEBIO,
UNE REPONSE
TECHNIQUE,
UN RESPECT DE
L'ENVIRONNEMENT



Les géotextiles biodégradables **coco**

Pour toute demande spécifique n'hésitez pas à nous contacter. En tant que fabricant nous pouvons vous proposer d'autres géotextiles avec des constructions et des poids au m² souhaités.

Votre contact :
Stéphane MARY

BP 345
73103 AIX-LES-BAINS
Tél. 06 08 34 51 55
Fax 04 79 61 64 52
sogebio@wanadoo.fr
www.sogebio.com

Composition

- 100 % naturel.
- 100 % biodégradable.
- 100 % Retted Fibre (bourres jeunes trempées dans des lagons entre 3 et 12 mois).
- Grande résistance à l'eau et à la traction.
- Pérennité de 5 à 10 ans, fort pouvoir de rétention d'eau.
- Isolation thermique.

Importance de la qualité des fibres de coco

Les fibres trempées (Retted Fibre) appelées aussi fibres blanches : fibres provenant de bourres jeunes de coco trempées dans des lagons durant une période de 3 à 10 mois avec alternance d'eau douce et d'eau saumée. Ce trempage va permettre le développement de bactéries qui vont nettoyer la fibre et lui donner une résistance supérieure à l'élongation, un meilleur pouvoir d'absorption d'eau et plus de souplesse. Le géotextile à base de fibres trempées aura une plus grande pérennité mis en œuvre en milieu humide.

Anjengo : Fibres longues, fibres longuement trempées, construction régulière, qualité supérieure.

Applications

- Protection des berges de cours d'eau en techniques végétales
- Aménagement de cours d'eau et de lacs (lits et berges) de pistes de ski, de talus routiers et ferroviaires, de plages.
- Protection contre l'érosion, réaménagement de décharges, revégétalisation, etc.

Aratory : Fibres longues, fibres trempées.
Vycome : Fibres moyennes, fibres trempées.

L'apport d'un programme de modélisation hydrodynamique bidimensionnel au travail de l'ingénieur

Klaus Peklo

spécialisé dans les techniques de l'ingénierie végétale pour le contrôle de l'érosion fluviale

Résumé

Le travail de conception et de suivi de travaux fluviaux par application de techniques de l'ingénierie végétale et de techniques mixtes nécessite un certain savoir-faire. Afin de dimensionner et de positionner au mieux les ouvrages d'ingénierie végétale sur un site dégradé, il est possible d'utiliser le logiciel TELEMAC 2D¹. Il s'agit d'un outil de modélisation hydrodynamique permettant d'analyser et de comparer les valeurs de comportement de l'écoulement du fleuve (vitesse, hauteur d'eau, le débit, le courant principal, la contrainte de cisaillement, la force d'arrachement etc.) pour chaque scénario d'intervention d'ingénierie végétale envisagé². L'ensemble de ces données permet de mettre en place, pour chaque section d'écoulement, un profil et des besoins spécifiques en fonction des différentes forces qui s'exercent contre celle-ci, sur une « zone de positionnement des ouvrages sur les berges ».

Le présent article vise à montrer l'apport d'un logiciel de modélisation 2D au travail de l'ingénieur spécialisé pour utiliser les techniques de l'ingénierie végétale aptes à gérer ces phénomènes naturels. Afin de déterminer la pertinence de l'utilisation de tels programmes, nous en présenterons dans un premier temps la méthodologie, puis nous illustrerons dans une seconde partie l'utilisation du logiciel à travers un cas pratique sur la Garonne.

Mots-clés

Choix des techniques à retenir ; zonage de résistance mécanique de berges, profil technique adapté ; méthodologie de planification ; conception intégrée

Beitrag zur Ingenieurarbeit im Bereich des Bauens mit Pflanzen durch ein Programm zur hydrodynamischen 2D Modellierung für die Kontrollierung der Sohl-erosion von Fließgewässern

Zusammenfassung

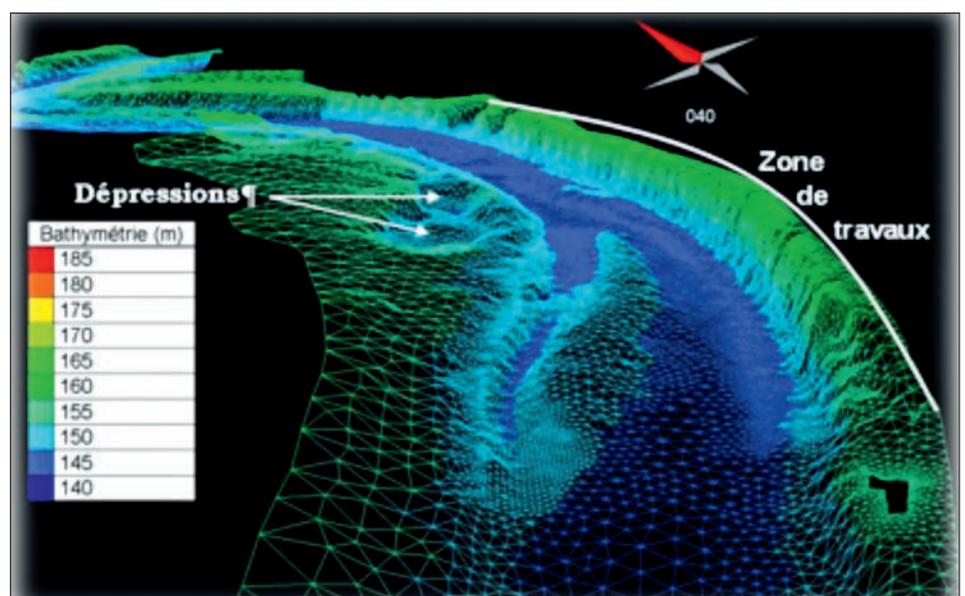
Der Entwurf und die Überwachung flussbaulicher Massnahmen mit pflanzenbaulichen und gemischten Techniken bedürfen eines guten Fachwissens. Um die natürlichen Bauelemente in einem Gebiet in schlechtem Zustand bestmöglich zu dimensionieren und zu platzieren, kann das Programm TELEMAC 2D1 angewendet werden. Es handelt sich um ein Werkzeug zur hydrodynamischen Modellierung, das es ermöglicht, flusshydraulische Kennzahlen (Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe, Abfluss, Hauptstrom, Sohlenschleppspannung, Angriffskraft, etc.) für jede denkbare Eingriffsvariante des Pflanzenbaus zu analysieren und zu vergleichen. Die Gesamtheit der Daten ermöglicht es, für

jeden Gerinneabschnitt auf einem «Positionierungsbereich auf den Ufern» ein Profil zu erstellen mit spezifischen Bedürfnissen in Abhängigkeit der verschiedenen Kräfte, die auf die Ufer wirken.

Dieser Artikel zeigt eine Bereicherung der Ingenieurarbeit im Bereich des Pflanzenbaus durch ein Programm zur hydrodynamischen 2D Modellierung auf, dass natürliche Phänomene reproduzieren kann. Um die Eignung des Programms festzustellen, präsentieren wir zuerst die Vorgehensweise, dann zeigen wir im zweiten Teil die Anwendung anhand eines Fallbeispiels an der Garonne.

Keywords

Wahl von relevanten Techniken; Einteilung der mechanischen Beständigkeit der Ufer; Profilanpassung;



MNT spécifique sur un tracé d'environ 3000m établi par le logiciel hydrodynamique TELEMAC 2D. Spezifisches digitales Geländemodell (DGM) eines etwa 3000 m langen Gerinneabschnitts, erstellt mit dem hydrodynamischen Programm TELEMAC 2D.

¹ TELEMAC-MASCARET, développé à l'origine par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la Direction des Recherches et Développements d'EDF, nécessite pour son application une formation en tant que hydraulicien.

² D'autres logiciels bi- et tridimensionnel existent sur le marché, p. ex. de DHI, HEC ; Bjørnsen etc...

L'apporto di un programma di modellizzazione idrodinamica bidimensionale al servizio dell'ingegnere specializzato nelle tecniche di ingegneria naturalistica per il controllo dell'erosione fluviale

Riassunto

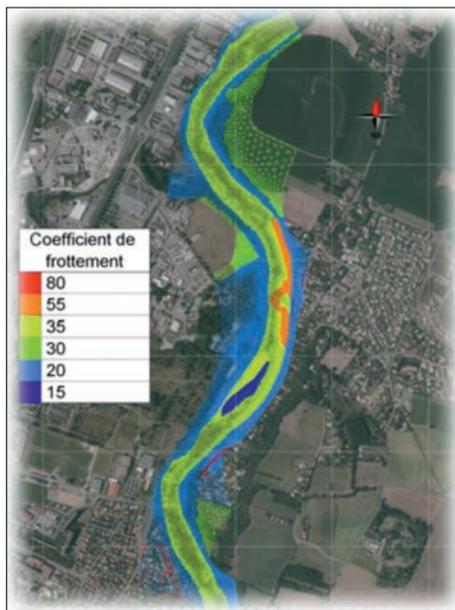
Il lavoro di concezione e di controllo delle opere di sistemazione fluviale attraverso l'applicazione di tecniche di ingegneria naturalistica e di tecniche miste, richiede una certa capacità. Per poter dimensionare e posizionare nel modo più appropriato le opere di ingegneria naturalistica sui siti danneggiati è possibile far ricorso al programma TELEMAC 2D1. Si tratta di un programma di modellizzazione idrodinamica che permette d'analizzare e di comparare i parametri relativi al comportamento del corso d'acqua (velocità, altezza d'acqua, portata, corrente principale, sforzo di taglio, superficie d'attacco etc.) per ogni scenario d'intervento d'ingegneria naturalistica proposto. L'insieme di questi dati fornisce, per ogni sezione del corso d'acqua, un profilo e i bisogni specifici in funzione delle diverse forze agenti su una "zona di posizionamento della struttura sulle sponde".

L'articolo di seguito proposto mira a mostrare il contributo apportato da un programma di modellizzazione 2D al lavoro dell'ingegnere naturalista specializzato nella realizzazione di opere ambientali che tengano conto degli eventi naturali.

Al fine di poter determinare la pertinenza dell'utilizzo di questo tipo di programmi, presenteremo innanzitutto la metodologia, per poi mostrare in un secondo tempo l'applicazione del programma ad un caso pratico lungo la Garonna.

Parole chiave

Scelta delle tecniche da considerare, zonizzazione della resistenza meccanica delle sponde, profilo tecnico adattato, metodologia di pianificazione, concetto integrato.



Coeffizient MS et calibration de l'emprise. Stricklerbeiwert und Kalibrierung des Einflusses.

1 Matériel utilisé et méthodologie appliquée

1.1 Matériel informatique employé

Le logiciel TELEMAC-2D permet de réaliser une simulation hydrodynamique d'un cours d'eau en résolvant les équations de Barré de Saint-Venant (1871) à deux dimensions d'espace horizontales. Les données principales qu'il calcule sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale. Les applications de TELEMAC-2D incluent

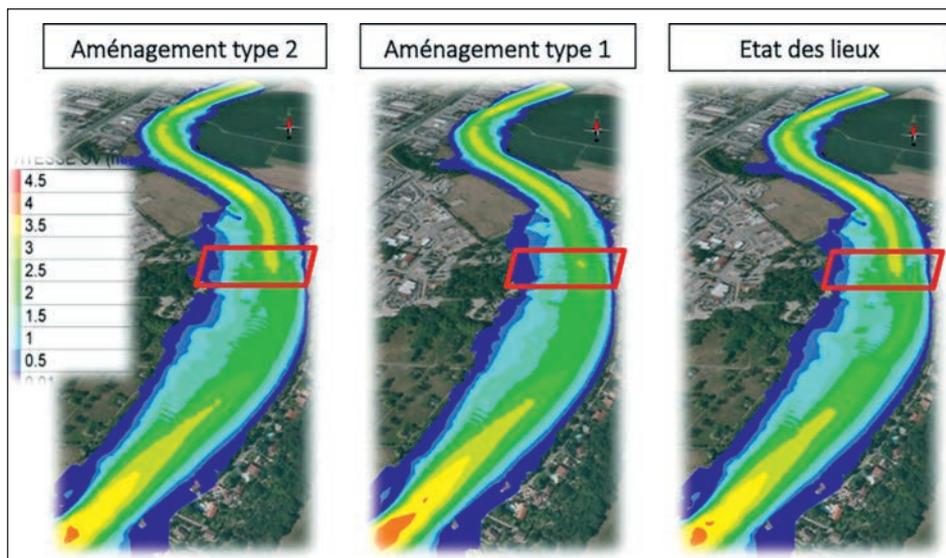
l'hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale. Selon les objectifs de la mission, qui peuvent varier, de nombreux phénomènes physiques peuvent être pris en compte dont entre autres :

- Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires
- Frottement sur le fond
- Influence de la force de Coriolis
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent
- Turbulence
- Ecoulements torrentiels et fluviaux
- Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines
- Zones sèches dans le domaine du calcul : bancs découvrant et plaines inondables
- Traitement de singularités : seuils, digues, buses
- Prise en compte des forces de traînée des structures verticales
- Prise en compte des phénomènes de porosité
- Couplage avec le transport sédimentaire

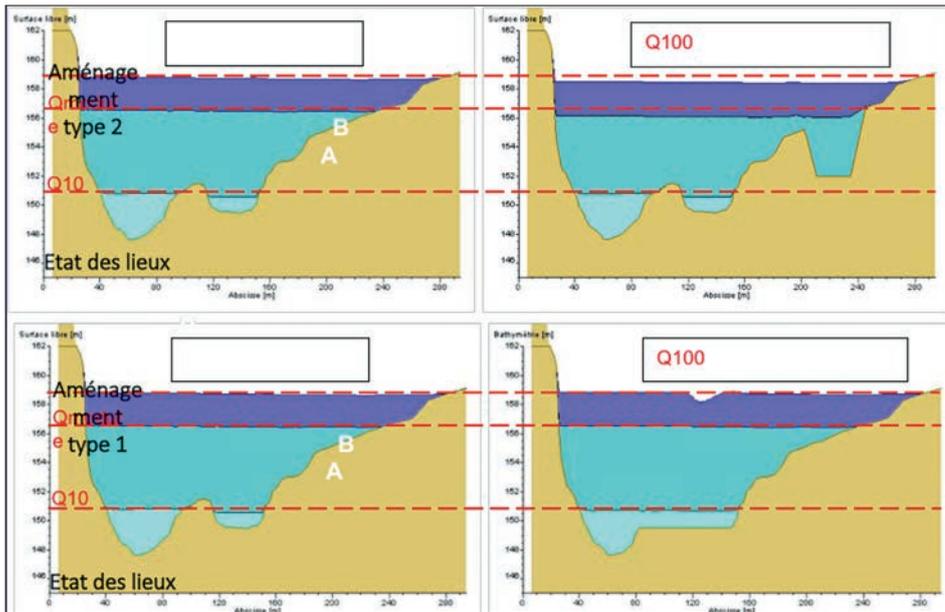
Les domaines d'application du logiciel sont donc nombreux.

1.2 Methodologie appliquée

Pour que le géomètre établisse un Modèle numérique de terrain (MNT), il faut établir un cahier des charges spécifique, et le cas échéant adapter le travail du géomètre aux spécificités



Exemple : répartition spatiale arithmétique 2D des vitesses en fonction des évènements de dimensionnement et des types d'aménagement. Beispiel: Räumliche arithmetische 2D Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Dimensionierungsergebnisse und der Bauvarianten.



Exemple : Analyse 1D des hauteurs d'eau en fonction des types d'aménagement.
 Beispiel: 1D Analyse der Wassertiefe in Abhängigkeit der Bauvarianten.

du terrain que nous avons relevées pendant son travail. Le MNT ainsi obtenu est alors saisi dans le logiciel bidimensionnel, qui calcule ensuite les valeurs d'écoulement pour les représenter sous forme de graphiques pertinents.

Afin de comparer et d'évaluer l'intérêt de chaque scénario de travaux d'aménagement envisagé, l'analyse des résultats se concentre sur les zones vulnérables de la plaine alluviale, sur le fond du lit et sur les berges. Les analyses couvrent également la zone inondable du lit majeur, en vue d'évaluer la hauteur de la ligne d'eau en fonction des différents événements.

Afin d'obtenir une appréciation fiable de l'écoulement au droit de l'emprise à reconstituer, d'autres recherches complémentaires sont nécessaires : des analyses cartographiques, diachroniques et géologiques.

Ces résultats supplémentaires aident à mieux comprendre l'évolution de

l'érosion sur les niveaux historiques et récents pour différents événements (par exemple de Q_2 , Q_{10} , et Q_{100}). Après l'établissement du « flexible mesh » par le logiciel TELEMAC (ou un « maillage flexible », une triangulation qui permet au programme de mieux s'adapter aux spécificités du site), ainsi que l'attribution des coefficients de frottement et de calibration, suivent les phases de modélisation des différents événements de crue, ses valeurs de cisaillement et de vitesse.

2 Type de résultat obtenu par l'application de la modélisation hydrodynamique

2.1 Exploitation des résultats d'analyses et diagnostic

Le programme, après calibration et vérification, nous indique visuellement la répartition spatiale de valeurs purement arithmétiques, par exemple la vitesse et les débits. D'autres paramètres, comme les angles d'attaque et les forces tractrices

en fonction des niveaux d'eau et des scénarios, peuvent être obtenus par la suite.

2.2 Etablissement d'un zonage sur la berge pour positionner les ouvrages

Pour rappel, le zonage est le résultat de l'établissement d'un profil des besoins spécifiques de chaque position sur la berge, de manière à adapter les techniques aux différentes contraintes qu'elle subit.

Les conditions et les valeurs érosives attendues sur le fond et sur la berge varient beaucoup en fonction des événements à considérer. Le choix, le dimensionnement et le positionnement des ouvrages exigent qu'ils soient adaptés à ces événements.

À l'aide de la numérisation hydrodynamique en surface libre, on obtient par exemple ce type de grille indiquant les différentes sollicitations érosives de la berge.

Les valeurs hydrodynamiques et les observations obtenues sur le site, en croisant avec les valeurs de résistances mécaniques maximales pour les différentes techniques végétales, permettent à l'ingénieur spécialisé de définir le choix et le positionnement définitif de l'édifice sur la berge.

2.3 La conception intégrée

En complément de la phase de zonage, une phase de réflexion et de prise de recul (une réflexion dite holistique, qui tente de voir le contexte de l'aménagement dans sa globalité), semble importante, afin d'essayer de mesurer tous les effets collatéraux possibles des travaux, et pour que la construction soit en cohérence avec son milieu. Cette phase est exprimée dans le document « Conception intégrée ». Ce dernier est établi par

Sections	Scénarios	Q2 (840m3/s)			Q10 (1720m3/s)			Q50 (2350m3/s)			Q100 (2780m3/s)		
		Vitesse (m/s)	Surface libre (m NGF)	Contrainte de cisaillement(N/m2)	Vitesse (m/s)	Surface libre (m NGF)	Contrainte de cisaillement(N/m2)	Vitesse (m/s)	Surface libre (m NGF)	Contrainte de cisaillement(N/m2)	Vitesse (m/s)	Surface libre (m NGF)	Contrainte de cisaillement(N/m2)
5	ORD	2,3	154,8	64	2,8	157,3	94	3,1	158,7	111	3,2	159,5	120
	REC				3,0	157,0	91	3,3	158,3	106	3,4	159,2	117
6	ORD	2,5	154,6	70	3,0	157,1	100	3,3	158,5	117	3,4	159,2	127
	REC				3,2	156,8	96	3,5	158,0	111	3,6	158,9	122
7	ORD	2,7	154,4	80	3,3	156,9	108	3,5	158,3	126	3,6	159,0	135
	REC				3,5	156,6	105	3,8	157,8	119	3,9	158,6	131
8	ORD	2,4	154,3	111	3,3	156,6	140	3,7	158,0	156	3,8	158,9	166
	REC				3,5	156,3	135	4,0	157,5	149	4,2	158,2	160
9	ORD	2,1	154,2	64	2,9	156,6	93	3,2	158,0	110	3,4	158,8	120
	REC				3,0	156,2	88	3,5	157,4	102	3,7	158,3	113

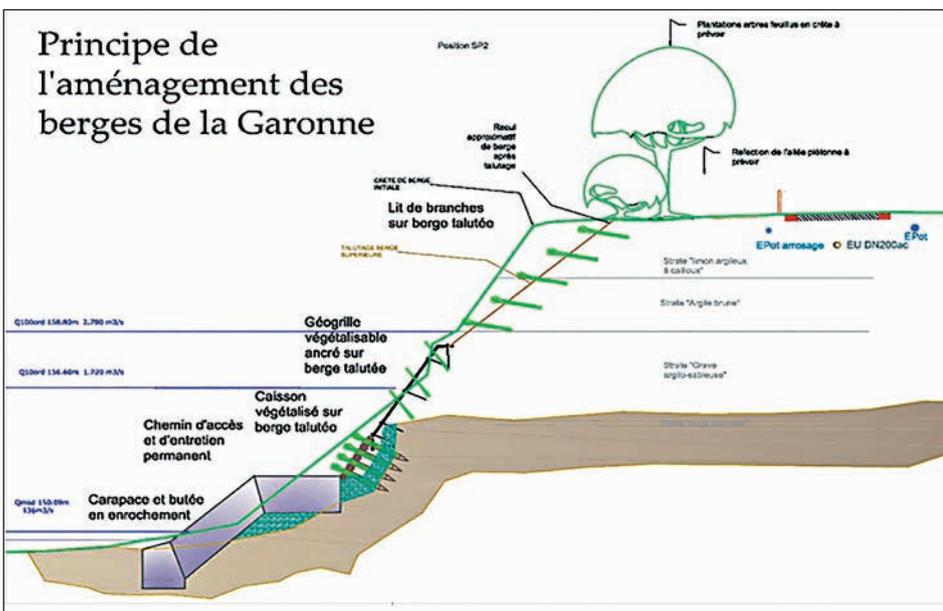
Exemple : Grille des sollicitations mécaniques de la berge selon profil et événement.
 Beispiel: Tabelle der mechanischen Uferbeanspruchungen, aufgeteilt nach Profil und Ereignis.



Images de berge érodée et zone d'habitation et espaces publics en crête.
 Bilder des Siedlungsgebiets mit öffentlichen Bereichen (oben) und des abgetragenen Ufers (unten).



A gauche, le fond du fleuve «lessivé», et à droite des falaises érodées à proximité immédiate des habitations.
 Links, das «ausgewaschene» Flussbett und rechts, abgetragene Felsen in unmittelbarer Nähe von Wohnhäusern.



Exemple: Zonage d'ouvrages en techniques mixtes et génie végétal
 – Choix après analyse hydrodynamique et reconnaissance du site –
 Beispiel: Einteilung von Elementen verschiedener und ingenieurbioologischer Techniken
 – Auswahl nach der hydrodynamischen Analyse und Standorterkennung –

le maître d'œuvre, et correspond à une réflexion qui intègre plusieurs disciplines et différents contextes, pour que l'ingénieur spécialisé choisisse au mieux la technique finale, aux niveaux:

- **techniques:** les conditions inhérentes du site, la ou les techniques à appliquer, la construction des ouvrages et la maintenance/vérification/entretien/fin de vie de l'ouvrage
- **économiques:** les coûts d'investissements et de maintenance/vérification et de démontage en fin de vie
- **environnementaux:** l'impact sur l'environnement naturel
- **sociaux:** les impacts sur l'environnement socio-économique

Bien que primordial, cet aspect ne sera pas plus approfondi dans le présent document pour ne pas alourdir le propos.

3 Contexte et présentation du cas de figure

3.1 Présentation du contexte

Il est important, lors de la planification de travaux utilisant des techniques de l'ingénierie végétale et des techniques mixtes sur les cours d'eau, de tenir compte des spécificités régionales: par exemple la Garonne a une ampleur de variation du niveau de l'eau très élevée, et peut aller jusqu'à 8/9 m. De plus, au printemps, la montée des eaux peut durer longtemps, parfois une dizaine de jour. La durée de ces crues est suffisamment longue pour affecter le bon développement de l'enracinement de la végétation plantée, et constitue donc un paramètre déterminant pour le choix et le positionnement des ouvrages d'ingénierie végétale. Les rives du fleuve Garonne sont très urbanisées. Sur ses berges de 10/15 m de hauteur, sont présentes des zones pavillonnaires, des zones artisanales et industrielles, un réseau routier et des espaces publics à proximité immédiate d'importantes loupes d'érosion. Depuis environ 50 ans, ce tronçon en bordure de la Garonne observe un recul des berges, et depuis dix ans ce phénomène s'accélère et menace la voirie, les espaces publics et les bâtiments à proximité. Le manque de substratum au fond, un déplacement latéral

du fleuve en direction des zones urbanisées, un sol et un sous-sol fragile et sous influence de nappes phréatiques très actives, produisent lentement mais sûrement une érosion des berges sur une dizaine de mètres de hauteur. Afin d'assurer un accès sécurisé aux quartiers pavillonnaires menacés, la commune a commandé une réhabilitation des berges.

3.2 Utilisation pratique du logiciel

L'objectif ici est l'application de techniques de l'ingénierie végétale et des techniques mixtes lors d'une mission de réhabilitation et de protection des berges.

Le cas présent de la zone urbanisée menacée par l'érosion latérale, impose un dimensionnement pour une crue centennale Q100. Cela demande, lors des phases de conception, de suivi des travaux et la phase de service des ouvrages, une considération des débits et des hauteurs d'eau entre Qmodule $\sim 150 \text{ m}^3$ jusqu'à Q100 $\sim 2800 \text{ m}^3$.

Nous souhaitons donc obtenir du logiciel des indications sur l'écoulement du fleuve pour établir un zonage de la berge nous permettant de vérifier et de choisir, les techniques d'une part (la résistance mécanique des ouvrages), et leur positionnement en fonction des événements définis d'autre part.

Le zonage sur la base des valeurs de la contrainte de cisaillement au sol peut nous indiquer trois cas de figure :

- L'utilisation des techniques du génie végétal est adaptée, car les valeurs obtenues de la contrainte de cisaillement à l'endroit ciblé sont inférieures à la capacité de résistance mécanique de l'ouvrage planifié.
- L'utilisation de techniques mixtes est plus adaptée car les valeurs obtenues de la contrainte de cisaillement à l'endroit ciblé demandent un renforcement de la résistance.
- L'utilisation des techniques du génie végétal n'est pas possible car les valeurs obtenues semblent dépasser la capacité mécanique des ouvrages, il faut alors préférer le génie civil.

L'exemple de zonage ci-dessus nous indique le positionnement du lit de branches en haut de la berge talutée, et en berge médiane l'application d'une technique mixte, composée d'une géo-grille et d'un caisson végétalisé. Concernant la berge inférieure, la végétalisation ne semble pas adaptée du fait d'une valeur de cisaillement trop élevée. Dans ce cas, la conception d'un enrochement de type carapace selon la norme EN 13383-1 s'impose sur le site.

Cependant, l'expérience et le recul des techniciens du génie végétal permettent d'adapter de mieux en mieux les ouvrages et supportent une valeur de contrainte de cisaillement de plus en plus élevée.

Afin de réaliser un ouvrage de qualité, répondant à la fois aux besoins exprimés et qui se conserve dans le temps, l'ingénieur spécialisé devra évidemment exploiter les paramètres, les valeurs et toutes les autres données préalablement collectés par le logiciel. Cependant des recherches complémentaires demeurent indispensables, comme les analyses diachroniques, un sondage auprès de la population locale, et la précieuse observation du contexte environnemental et sociétal du site à réhabiliter.

5 Conclusion

Le but de l'étude hydrodynamique est de connaître la configuration générale du futur aménagement. La technique du génie végétal est quant à elle destinée à assurer à la fois un meilleur écoulement des fleuves, et une réduction des forces érosives sur les berges urbanisées et menacées.

Afin de comparer et d'évaluer l'intérêt de chaque scénario des travaux d'aménagement envisagé, l'analyse des résultats doit se concentrer sur les zones à enjeux importants en matière de vulnérabilité du fond et des berges.

Un logiciel de modélisation numérique bidimensionnel à surface libre est un outil qui permet d'analyser et de comparer les valeurs de comportement de l'écoulement du fleuve pour chaque scénario souhaité, en vue de l'application des techniques de génie végétal. Pour le maître d'œuvre spécialisé, lors de la phase de conception des techniques

de l'ingénierie végétale, la modélisation 2D offre un instrument technique intéressant qui lui offre un bon appui.

A l'aide de la grille de sollicitations mécaniques des berges, obtenue par le logiciel, un zonage sur la base des valeurs de la contrainte de cisaillement de la berge est possible. Ce zonage indique à l'ingénieur spécialisé à quelle position de la berge la technique du génie végétal peut se réaliser ou pas.

Lors du choix des techniques de l'ingénierie végétale que l'on souhaite appliquer, la connaissance du site en question et l'expérience du bureau d'études et du maître d'œuvre restent primordiales. La méthodologie de ce dernier doit intégrer une approche holistique, qui ensuite doit apparaître clairement dans le document que le maître d'œuvre rédigera, soit le document appelé « Conception intégrée ».

Bibliographie

Adam, P., Debais, N. et al. 2008. Le génie végétal. La documentation française, Paris.

Directives Européennes pour le Génie Biologique. 2015. Fédération Européenne pour le Génie Biologique (EFIB).

DWA – Regelwerk. 2013. Merkblatt DWA-M 519, Entwurf: 31/10/2013, Technisch-biologische Ufersicherungen an grossen und schiffbaren Binnengewässern, DWA, Hennef.

Hansen, U. 1985. Wasserbausteine im Deckwerksbau, Bemessung und Konstruktion. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co, Heide.

Weblink to TELEMAT-MASCARET 2015/10/15: <http://www.hrwallingford.com/software/open-telemat-mascaret>.

Zeh, H. 2007. Génie Biologique, Manuel de construction. Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek, Zürich.

Adresse de l'auteur :

I.C.E, Lasmarios, 82160 Parisot, France
(ice.peklo@orange.fr)

Pour une meilleure production et utilisation du matériel végétal (semences, boutures, plants) dans les projets de génie végétal et d'ingénierie végétale

G. Huyghe, Y. Crosaz, P. Bourdige, F. Rey

Résumé

L'explosion du génie écologique (et plus particulièrement du génie végétal) ces dernières années et les demandes croissantes en végétaux, pour le génie végétal, la phytoépuration ou les chantiers à vocation paysagère, ont dopé les échanges commerciaux de matériel végétal et rendu complexe sa traçabilité. Les fournisseurs peinent à répondre à une demande qualitative croissante et les exemples de problèmes liés à des introductions en milieu naturel de végétaux non indigènes vont croissants. L'objectif de cet article est de dresser un bilan empirique de cette situation au regard du marché du génie végétal puis de donner des pistes d'une approche plus respectueuse de l'environnement à l'usage des concepteurs, fournisseurs et usagers du génie végétal, pour chaque type de végétaux utilisé (graines d'herbacées, boutures et ligneux en plants).

Mots-clés

Génie biologique, matériel végétal, indigénat, Origine, traçabilité

Für eine bessere Herstellung und Verwendung pflanzlicher Baumaterialien (Saatgut, Triebe, Pflanzen) in Projekten der Ingenieurbiologie und des Pflanzenbaus

Zusammenfassung

Die explosionsartige Entwicklung der Ingenieurbiologie (und insbesondere des Pflanzenbaus) der letzten Jahre und die steigende Nachfrage von Pflanzen durch den Pflanzenbau, von reinigenden Pflanzen oder von Arbeiten die der Landschaftsgestaltung dienen, haben den kommerziellen Austausch von Pflanzenmaterial vorangetrieben und seine Nachvollziehbarkeit komplex gemacht. Die Anbieter haben Schwierigkeiten die Nachfrage nach steigender Qualität zu

bedienen und Beispiele des Einsatzes von nicht einheimischen Pflanzen vermehren sich. Das Ziel dieses Artikels ist es, eine empirische Bilanz hinsichtlich des Marktes pflanzlicher Bauweisen zu ziehen und dann Richtungen aufzuzeigen, für eine respektvollere Herangehensweise an die Umwelt von Gestaltern, Lieferanten und Anwendern der Ingenieurbiologie für jeden angewendeten Pflanztyp (Grassamen, Triebe und Gehölze von Pflanzen).

Keywords

Ingenieurbiologie, Pflanzenmaterial, einheimisch, Ursprung, Nachvollziehbarkeit [Transparenz]

Per una migliore produzione e utilizzo del materiale vegetale (sementi, talee, piante) nei progetti di biotecnica naturalistica ed ingegneria naturalistica

Riassunto

L'esplosione della biotecnica naturalistica (e in particolar modo dell'ingegneria naturalistica) nel corso degli ultimi anni, insieme ad una domanda crescente in piante, per il genio naturalistico, la fitodepurazione o i cantieri a vocazione paesaggistica, hanno alterato gli scambi commerciali di materiale vegetale e reso difficile la loro tracciabilità. I fornitori fanno fatica a rispondere ad una domanda qualitativa crescente e gli esempi di problemi legati all'introduzione di piante non idonee nei luoghi d'intervento stanno aumentando. L'obiettivo di quest'articolo è di redigere un bilancio empirico riguardo la situazione del mercato del genio naturalistico, e fornire degli spunti utili ai progettisti, fornitori e utenti per un approccio più rispettoso dell'ambiente, indicando l'uso più appropriato per ciascuna pianta utilizzata (grani erbacei, talee e piante legnose) et.

Parole chiave

Genio bio-ambientale, materiale vegetale, indigeno, origine, tracciabilità

1 Introduction

Les techniques issues du génie végétal et les opérations de végétalisation lors de travaux de restauration écologique connaissent depuis quelques années un essor et une attention sans précédent. Les demandes et les réalisations se diversifient et se multiplient, notamment dans des secteurs urbains où la ressource en matériaux vivants fait souvent défaut (peu de zones de collecte disponibles). Les acteurs, au premier rang desquels on trouve les concepteurs et les entrepreneurs de travaux, se tournent alors naturellement vers les fournisseurs qui peinent parfois à pouvoir répondre à la demande en termes de quantité et/ou de qualité.

La répartition géographique des espèces végétales utilisées dans le domaine de la restauration écologique couvre souvent un large éventail de conditions climatiques (régions biogéographiques, altitude) et édaphiques (nature des sols, pH, etc.). Cette hétérogénéité d'habitats naturels issue de ces variations stationnelles et combinée avec la sélection naturelle, se traduit souvent par la formation de plusieurs formes (écotypes) génétiquement distincts d'une même espèce (donc interfertiles). Pour exemple, le Saule pourpre (*Salix purpurea*), présent dans presque toute la France de 0 à 1800 mètres d'altitude possède des populations de morphologie variable selon qu'il pousse au sein de fourrés hygrophile en bordure de cours d'eau de plaine ou d'altitude (port plus rabougri, feuilles plus fines...). L'intérêt d'utiliser ces écotypes pour une meilleure réussite de l'opération de restauration écologique (meilleure croissance des végétaux, résilience plus rapide

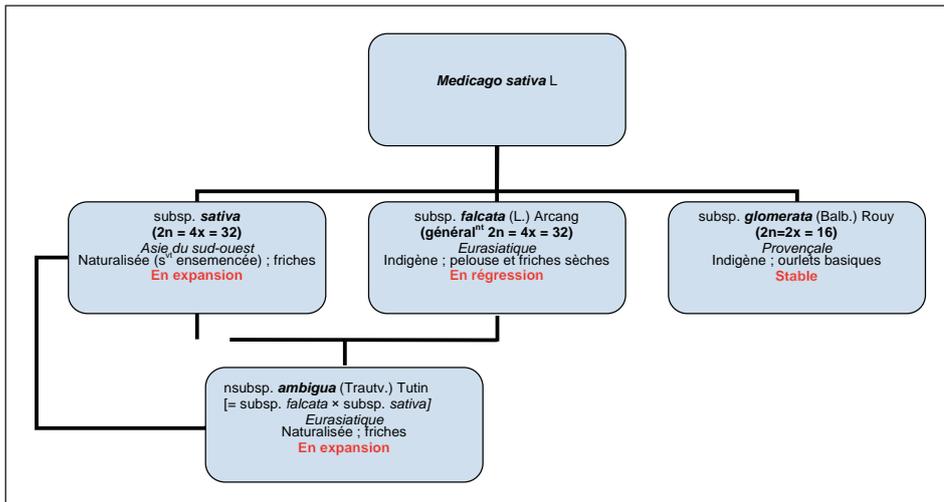


Figure 1 : Modèle de croisement de taxons au sein du groupe de *M. sativa* – source : Tison (2014, modifié).

Abbildung 1: Kreuzmodell der Effekte innerhalb der Gruppe *M. sativa* – Quelle: Tison (2014, modifiziert).

du milieu naturel, c'est-à-dire réapparition de fonctionnalités ou de propriétés disparues), n'est plus à démontrer, tant pour des raisons écologiques que techniques. L'enjeu que représente le choix d'espèces par le concepteur de tout projet de restauration devient ainsi primordial devant le risque d'introduire des écotypes mal adaptés, des taxons susceptibles de provoquer des perturbations (parfois génétiques donc quasi imperceptibles), ou même des organismes exogènes, pouvant devenir invasifs, au sein du site à restaurer. A ce titre, la compréhension des mécanismes régissant les flux de gènes intra-populations ou intra-spécifiques et la capacité d'adaptation des organismes à un nouvel environnement est à l'heure actuelle une des principales contraintes de l'écologie de la restauration. Face à cette difficulté de compréhension et d'intégration naissante de ces « nouvelles » disciplines, ainsi que de l'exigence croissante des partenaires de chaque projet, le concepteur faisant désormais face à des demandes de garanties techniques, réglementaires, écologiques, paysagères, cosmétiques ou décoratives..., l'un des enjeux majeurs pour les praticiens du génie végétal consiste aujourd'hui en une amélioration des spécifications biologiques du matériau végétal à utiliser, une amélioration des gammes mises à disposition chez les fournisseurs et un meilleur contrôle de la traçabilité.

2 Contexte et problématique

Plusieurs auteurs font état du problème de l'érosion de la diversité génétique, phénomène invisible à l'échelle humaine, que les opérations de plantations auraient tendance à amplifier à travers la modification et l'uniformisation des génomes (productions de cultivars standardisés et de géotypes non « locaux », hybridations), jouant ainsi sur la viabilité de l'espèce à long terme. Lambinon (1997), à travers un rapport au Conseil de l'Europe, fait état des impacts de l'introduction de géotypes « étrangers » (d'une même espèce) au sein d'une population, via des ensemencements ou des plantations, et les conséquences sur la productivité ou la résilience d'un écosystème. Si l'introduction par un écotype différent de géotypes

étrangers dans une population n'est pas forcément néfaste pour celle-ci, ceux-ci étant susceptibles d'accroître la diversité génétique et donc d'assurer potentiellement une plus grande viabilité de la population receveuse, elle peut a *contrario* faciliter la propagation de géotypes encore mieux adaptés au milieu colonisé pouvant devenir invasifs. Quelle que soit la réaction du système, on conviendra que le choix d'une plante par un concepteur n'est pas sans conséquence et que végétaliser un site au moyen de d'écotypes exogènes au territoire considéré (même s'ils appartiennent à la même espèce) revient la plupart du temps à jouer aux « apprentis sorciers ».

Lambinon évoquait lui-même l'idée qu'il semblait « préférable d'enregistrer dans une région déterminée l'introduction d'un xénophyte indéniable, que celle d'une souche allochtone d'une espèce indigène ». L'exemple bien connu du complexe *Medicago sativa* L., une espèce couramment utilisée dans les ensemencements à grande échelle via les travaux de végétalisation de talus le long d'infrastructures linéaires et souvent semée à des fins agricoles, est une illustration de ce phénomène (figure 1).

L'allogamie aidant, le taxon subsp. *falcata* est, selon plusieurs auteurs, en voie d'extinction dans une grande partie de l'Europe (Estonie, Belgique, France), absorbée par le taxon nsubsp. *x ambigua* par introgression.



Figure 2 : Développement de *Mimule* sur les abords du Tillet restauré au sein de la commune d'Aix-les-Bains (source : Biotec 2015).

Abbildung 2: Wachstum der Gauklerblume auf den Ufern des innerhalb der Gemeinde Aix-les-Bains renaturierten Baches Tillet (Quelle: Biotec, 2015).

Chez les héliophytes, utilisées en génie végétal pour la réhabilitation de pieds de berges dégradées ou de zones humides, voire pour des techniques de phytoremédiation, des problèmes de nature similaire existent. En Amérique du Nord, par exemple, existerait un phénomène similaire d'introggression (hybridation par introduction de caractéristiques héréditaires d'une espèce dans le génome d'une autre espèce) à celui qui habite le complexe *Medicago sativa*. Le roseau « local », *Phragmites australis* subsp. *americanus*, en forte régression, aurait pour principale cause de sa disparition outre la destruction de ses habitats, la résultante de son croisement par des individus plus « vigoureux » de *Phragmites australis* subsp. *australis*, vraisemblablement introduits d'Europe. Le même phénomène ne serait pas étonnant non plus dans le complexe des *Typha*. *Typha latifolia*, indigène en Amérique du Nord, est fortement concurrencée par *Typha angustifolia*, exogène et *Typha x glauca*, leur hybride. Il ne serait pas étonnant d'observer à l'avenir une perte de diversité propre au taxon *T. latifolia* du fait d'une introggression.

La méconnaissance de cette diversité cryptique (« cachée ») et du fonctionnement in vivo de certaines espèces, mais aussi la complexité d'une traçabilité (nécessitant souvent des études génétiques), rendent l'approche compliquée. Il est ainsi courant d'observer de forts différentiels de pureté des livraisons entre les fournisseurs (Voir ci-après). Chez les héliophytes toujours, la méconnaissance de certaines espèces qui se retrouvent alors mélangées lors des récoltes en milieu naturel ou en pépinière, ou la dispersion naturelle de certaines espèces au sein des bassins de culture qui se retrouvent au sein des mottes livrées, provoquent parfois des livraisons on désirées sur les chantiers. On citera pour exemple diverses hydrophytes comme *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc., souvent confondu avec d'autres espèces du genre, *Elodea* spp. une bryophyte *Marchantia* gr. *Polymorpha*, véhiculées en accompagnement d'autres plantes, puis des héliophytes comme le Mimule, *Erythranthe guttata* (Fisch. ex DC.)



Figure 3 : *Salix x holosericea* (<http://www.british-wild-flowers.co.uk>).
Abbildung 3: *Salix x holosericea* (<http://www.british-wild-flowers.co.uk>).

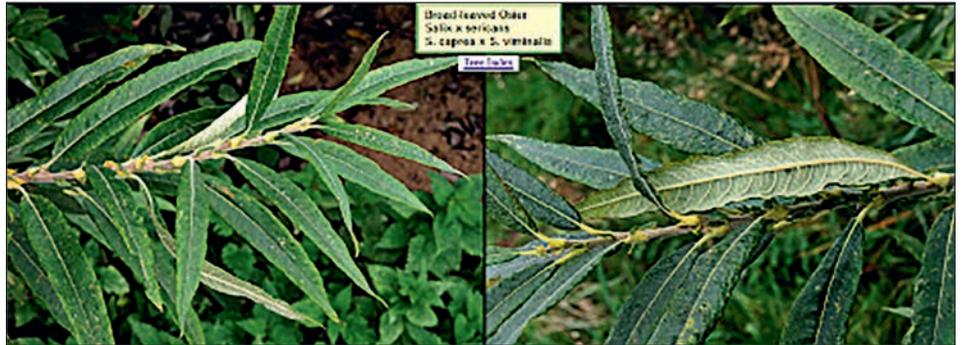


Figure 4 : *Salix x smithiana* (<http://www.british-wild-flowers.co.uk>).
Abbildung 4: *Salix x smithiana* (<http://www.british-wild-flowers.co.uk>).



Figure 5 : *Salix* Cf. *x dasyclados*, observé sur un chantier de génie végétal en Normandie (Biotec, 2015).
Abbildung 5: *Salix* Cf. *x dasyclados*, entdeckt auf einer ingenieurbioologischen Baustelle in der Normandie (Biotec, 2015).



Figure 6 : Image de gauche, *Salix schwerinii* E.L. Wolf (<http://www.plantarium.ru/>). Noter la convergence morphologique de ce saule Nord-asiatique avec le groupe de *S. eleagnos*; image de droite, *Salix eriocephala* (<http://www.biolib.cz>). Noter la convergence morphologique de ce saule Nord-américain avec le groupe de *S. triandra*.
Abbildung 6: Bild links, *Salix schwerinii* E.L. Wolf (<http://www.plantarium.ru/>). Beachtlich ist die morphologische Ähnlichkeit dieser Nordasiatischen Weide mit der Gruppe *S. eleagnos*; Bild rechts, *Salix eriocephala* (<http://www.biolib.cz>). Beachtlich ist die morphologische Ähnlichkeit dieser Nordamerikanischen Weide mit der Gruppe *S. triandra*.

Origine	Principaux défauts constatés	Principaux problèmes occasionnés
Saules issus de collecte	Erreurs d'identification, manque de spécification des origines et de leurs conditions stationnelles (plaine, altitude, substrat...)	Ecologique (Diversité inadaptée), Biologique (défaut de reprise)
Saules issus de culture	Erreurs d'étiquetage, croisements interspécifiques	Ecologique (Diversité inadaptée), Biologique (défaut de reprise), Technique (évolution incontrôlée)
Saules issus d'importation	Multi-hybrides souvent indifférentiables, écotypes inadaptés	Ecologique (Diversité inadaptée), Biologique (défaut de reprise), Technique (évolution incontrôlée, risque de dégradation rapide)

Tableau 1 : Synthèse des principaux problèmes que posent les fournitures de saules lors des chantiers de restauration en fonction de leur origine.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Hauptprobleme, die bei der Lieferung von Weiden für Renaturierungsarbeiten entstehen, in Abhängigkeit ihres Ursprungs.

G.L. Nesom, qui se dissémine par graines via les mottes cultivées dans certaines pépinières (figure 2).

Dans le domaine des semences, les puretés des mélanges grainiers apparaissent très variables. Il est ainsi courant d'observer des espèces résiduelles n'ayant pas toujours l'effet escompté, du moins les premières années suivant les travaux. Crosaz (2001) montre ainsi qu'un mélange composé de 14 espèces végétales herbacées peut contenir jusqu'à 150 autres espèces, dont certaines pourront ainsi être involontairement semées à des densités relativement importantes en fonction de la proportion relative du composant dont elles constituent l'impureté.

Le marché du génie végétal, désormais mûre, subit une pression concurrentielle telle que les fournisseurs s'efforcent d'optimiser leurs méthodes de production. Si certaines pépinières préfèrent la démarche de collecte dans le milieu naturel, celle-ci n'est pas toujours possible et pousse à la culture en pépinière, voire à l'importation, rendant de plus en plus complexe la traçabilité des plants. Ce dernier phénomène est particulièrement marquant chez les saules, où les successions de génération et les croisements interspécifiques, puis parfois les défauts d'étiquetage ou erreurs d'identification, rendent les modalités de suivi très difficile. Le genre *Salix* est un genre de distribution holarctique (au nord du tropique du cancer)

d'environ 400 espèces (figures 3, 4 et 5). Les hybrides naturels sont nombreux, mais restent normalement isolés au contact des parents, sauf quelques-uns plantés (*S. x rubens...*) et les hybrides du complexe de *Salix caprea* qui ont tendance à former localement un continuum entre les espèces parentes, voire à les absorber si le biotope est dégradé. En France la production de saules a trois origines possibles :

- une collecte locale via des prélèvements en milieu naturel,
- une production en pépinière généralement issue de collecte locale, parfois d'importation (boutures ou graines) mais aussi de sélection (*Salix xsmithiana* = *S. caprea* x *S. viminalis* *S. x holosericea* Willd. = *S. cinerea* x *S. viminalis*) ou de fourniture,
- un approvisionnement à l'étranger, via souvent des productions à grande échelle issues souvent de T(T)CR (Taillis à [très] courte rotation), production destinée au bois de chauffe ou à la phytoépuration, une technique qui nous vient des pays du Nord de l'Europe. Les deux principales espèces utilisées sont *S. viminalis* L. et *S. dasyclados* Wimm. s.l. (*S. caprea* x *S. cinerea* x *S. viminalis*), mais d'autres sont également utilisées comme: *S. schwerinii*, *S. triandra*, *S. caprea*, *S. daphnoïdes*, *S. cinerea*, etc. Les principaux objectifs de la sélection portent sur le rendement en matière sèche, la hauteur et le faible nombre de tiges par souche, la résistance aux

maladies (rouille chrysomèle, galle), l'appétibilité moindre pour les herbivores et l'aptitude à la récolte grâce à des branches bien droites. La capacité d'ancrage racinaire n'étant pas un critère de sélection variétale, pouvant rester négligée.

Une synthèse des principaux problèmes que posent les fournitures de saules lors des chantiers de restauration en fonction de leur origine est présentée dans le tableau 1.

3 Réalités de terrain vues par des praticiens du génie végétal

Parallèlement à ces préoccupations d'ordre génétique,, le marché français de commercialisation de matériel végétal progresse et se heurte désormais à plusieurs problématiques :

- Les études et retour d'expériences permettant de comprendre les mécanismes qui régissent le comportement des plantes semées ou plantées sont encore peu nombreuses ;
- Les pratiques de végétalisation, dans leurs aspects biologique, écologique et génétique, sont globalement méconnues par les concepteurs (volets paysagers et verdissement, voire biologique à travers l'utilisation des techniques végétales plus souvent mises en avant) et les préconisations de ces acteurs, notamment à travers les cahiers des charges de travaux, ne vont pas souvent en faveur d'une meilleure prise en compte de ces volets ;
- Le commerce des végétaux est contrôlé par des lois européennes transcrites en droit français qui laissent, reconnaissons-le, peu de marge de manœuvre (notamment pour les graines) du fait d'un contrôle au moyen d'un « catalogue officiel des espèces et variétés » qui fixe la liste des espèces qui ne peuvent être commercialisées que sous une forme variétale cultivée (donc non sauvage).

Exemple: Quoi de mieux que l'observation de la structure et du fonctionnement des milieux naturels pour la réalisation d'ouvrages de génie végétal ?

Cet adage sert également de base à la constitution des mélanges grainiers d'ensemencement dont la composition (diversité, pourcentages d'espèces...) tient en la réutilisation de ce qui pousse en contexte naturel similaire. De manière très simplifiée, la réalisation de relevés de végétation avec attribution de coefficients d'abondance/dominance par espèce est une manière usuelle de composer un mélange grainier. Voici l'exemple très parlant d'une prairie mésophile eutrophe pâturée, groupement végétal fréquent dans toutes les prairies de France et souvent utilisé comme base de revégétalisation: l'association phytosociologique du *Lolium perennis* – *Cynosuretum cristati*. Selon le tableau de synthèse de ce groupement, on retrouve classiquement 53 espèces dont 36% de graminées, 11% de légumineuses et 53% d'autres dicotylédones, le taux de recouvrement étant le plus souvent largement favorable aux graminées. L'usage de cette base comme mélange grainier de réensemencement, pour la seule famille des poacées (= graminées), la reviendrait à ensemercer dans le milieu naturel près de 63% d'espèces « certifiées » (c'est-à-dire vendue sous forme de variétés cultivées et brevetées), soient près de 2 espèces sur 3 d'origine non sauvage (ray gras des anglais, dactyle, etc.); ce qui est incompatible avec une revégétalisation au moyen d'écotypes locaux.

- Enfin le contrôle et le suivi des végétaux depuis la production jusqu'à la fourniture à pied d'oeuvre sont globalement (à quelques exceptions près) inexistantes. La traçabilité des espèces est souvent inexistante (quels sont les fournisseurs susceptibles de renseigner l'exacte origine des végétaux vendus), les laboratoires spécialisés dans le contrôle des espèces (notamment des graines) sont peu consultés et les maîtres d'œuvres font souvent peu l'effort de vérification (généralement par manque de connaissance botanique). Une évaluation est possible après végétalisation (dans le cadre des marchés ou la garantie de reprise des végétaux est appliquée), mais cette opération, complexe à mettre en œuvre, longue et onéreuse,

est bien souvent négligée par les acteurs (y compris les financeurs) et si les démarches et protocoles de suivis existent, ils sont issus d'initiatives locales et ne sont pas harmonisés ou normés. Par ailleurs, cette démarche a peu de valeur juridique lors d'un marché de travaux. Pour mémoire, le contrôle de la traçabilité peut s'effectuer dès le montage du dossier de consultation des entreprises (désignation de critères de sélection ou d'éviction d'entreprises de travaux au sein des cahiers des charges « travaux »), par la visite de pépinière préalablement à l'engagement des travaux, par la transmission par l'entreprise des demandes d'agrément puis bons de livraison, par la vérification des plants livrés par le maître d'œuvre et enfin à travers le contrôle et suivi des plantations jusqu'à trois ans après travaux (dans le cadre de la garantie de reprise), permettant de remplacer les plants en cas d'irrégularité.

Or, que ce soit au travers de nouvelles directives de l'Etat (Stratégie Nationale de la Biodiversité, Trame Verte et Bleue), de l'augmentation de la connaissance scientifique (voir notamment travaux de Cremieux et al. [2010], ... et de la sonnette d'alarme tirée par les acteurs de terrain, tous les voyants sont au rouge concernant la prise en compte de la biodiversité au sein des projets d'aménagement.

4 Les solutions existent

Aujourd'hui, grâce à quelques initiatives naissantes comme des labels de promotion de l'usage d'une flore d'origine locale, quelques opportunités de programmes de revegetalisation à grande échelle (pistes de ski, infrastructures linéaires, mesures compensatoires...) alliant moyens financiers et temporels suffisants, ou plus simplement les initiatives locales parfois anciennes de plus de 20 ans de collecteurs/producteurs, que ce soit au niveau de semences, des vivaces transplantées (mottes, rhizomes...) ou des ligneux, une prise en considération naissante existe.

Une démarche émergente se dessine, à travers les travaux de l'Association

française pour le génie biologique ou génie végétal (AGéBio), à savoir :

- **Un transfert de connaissances** intra-association (échanges, publications, visites de chantier ou de pépinières...) et auprès des acteurs de la filière, mené par les initiatives des adhérents (acceptation du projet dans son ensemble par le maître d'ouvrage au moyen d'explications didactiques, cahier des charges de travaux, colloques, formations, réunions publiques, organisation de visites de sites...) ou sous forme de publications internet, de lettres d'informations;
- **Un travail de formation** auprès de professionnels et d'étudiants par les professionnels adhérent à l'association;
- **Des discussions** et échanges entre praticiens permettent de préciser les cahiers des charges, d'organiser et d'affiner le suivi et la traçabilité des produits, puis la promotion d'un véritable métier de conception, celui d'ingénieur écologue, en amont de chaque projet;
- **La promotion** d'un approvisionnement de chantier au moyen de végétaux issus de collecte dans des conditions contrôlées (suivi du maître d'œuvre ou du maître d'ouvrage: vérification de la conformité, contrôle de la traçabilité,...);
- **La valorisation**, auprès d'acteurs de la filière, des fournisseurs qui, par leur engagement personnel s'attachent à combler les manques actuels observés, alors plus souvent conseillés ou contractualisés.

5 Conclusion

L'évolution des recherches en biologie moléculaire et génétique, mais également les retours d'expérience en écologie de la restauration, ont permis de mettre le doigt sur une problématique d'importance tant technique qu'écologique, à laquelle il convient de s'intéresser: celle d'un manque d'exigence de la part des concepteurs puis de difficultés de contrôle ou traçabilité propre à la production, la fourniture et l'utilisation du matériel végétal (semences, boutures, plants) dans les

projets de génie végétal et d'ingénierie végétale.

Face à un afflux de demande en matériel végétal pour les chantiers, un meilleur encadrement de la qualité des végétaux fournis s'avère primordial et passera par une communication grandissante, la valorisation d'initiatives existantes, mais surtout par une augmentation des exigences par l'ensemble des acteurs du domaine du génie végétal et des coûts correspondant.

In fine, un travail d'assouplissement de la réglementation commerciale européenne pour les des graines d'herbacées utilisées pour l'ensemencement (possibilité d'usage de graines d'origine sauvage pour végétaliser les berges, les talus, reconstituer des prairies autre que des variétés à gazon ou fourragères), ainsi, à contrario, d'un renforcement de la réglementation sur les espèces exotiques, représenteront les clés de la filière pour les années à venir.

6 Bibliographie

Crémieux, L., Bischoff, A., Steinger, T. & Müller-Schärer H., 2010 – Gene flow from foreign provenances into local plant populations: fitness consequences and implications for biodiversity restoration, *American Journal of Botany* 97: 94–100.

Crosaz, Y., 2001 – Végétalisation: la face cache d'un mélange, Colloque de restitution du programme national de recherche «Recréer la nature»23: réhabilitation, restauration et création d'écosystèmes, Grenoble 11–13 septembre 2001, poster.

Kaljund K. & Leht M., 2013 – Extensive introgressive hybridization between cultivated lucerne and the native sickle medic (*Medicago sativa* ssp. *falcata*) in Estonia, *Ann. Bot. Fennici* 50: 23–31.

Lambinon J., 1997 – Les introductions de plantes non indigènes dans l'environnement naturel, Conseil de

l'Europe, Sauvegarde de la nature n° 87, 30 p.

Selbo, S. M., & Snow, A. A., 2004. The potential for hybridization between *Typha angustifolia* and *Typha latifolia* in a constructed wetland. *Aquatic Botany*, 78 (4), 361–369.

Tison J.-M. & De Foucault B. (coords), 2014, *Flora gallica, flore de France*, Biotope, Mèze, 1196 pp.

Tüxen, R., 1937. *Die Pflanzengesellschaften in Nordwestdeutschland*. Mitt. Flor. Soz. Arbeitsgem. Niedersachsen, 3: 1–170. Tabl. p.101.

Adresse de l'auteur:

AGéBio, 2 rue de la Papèterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères cedex, France (developpement@agebio.org)

OHS

Otto
Hauenstein
Samen AG



Die Rasenberater –
Fachwissen vor Ort



Begrünungen
für alle Fälle!

Bahnhofstrasse 92
Postfach 138
8197 Rafz
Tel. 044 879 17 19
Fax 044 879 17 30

info@hauenstein.ch
www.hauenstein.ch

**IHR
VORTEIL:**

SIFOR®
natürlicher
Erosionsschutz
aus Jute und Kokos

Direktimport
aus dem Ursprungsland



Kurzfristige Lieferung dank
grossem Lagerbestand!

Fragen Sie uns an -
wir beraten Sie gerne!



Relianz AG
Packende Ideen

Stationsstrasse 43 · 8906 Bonstetten
Tel. +41 44 701 82 82 · Fax +41 44 701 82 99
www.geonatex.ch · reliantz@relianz.ch

Développement de géofiles biodégradables de qualité destinés à des opérations de génie végétal et écologique

Stéphane Mary, Yves Crosaz, Nicolas Debiais, Fabrice Dolci, Jean-Paul Ducol, Cyril Grand, Ghislain Huyghe, Christophe Lignier, Frédéric Roure, Freddy Rey

Résumé

Les géofiles biodégradables sont des produits 100% biodégradables ouverts et possédant une certaine résistance mécanique, dont la fonction est de limiter temporairement l'érosion superficielle des sols en favorisant la croissance des systèmes végétatifs. Ces derniers prendront ensuite le relai des géofiles au fur et à mesure de leur « biodégradabilité ». Les géofiles sont en coco ou en jute tissés, ou encore à base de chanvre ou biosourcés. Importateurs, producteurs et prescripteurs travaillent aujourd'hui ensemble pour créer des outils d'évaluation de leur qualité et d'aide à leur mise en œuvre. L'un des objectifs est de produire des documents de recommandations à mettre à disposition des acteurs de terrain, de façon à donner toutes les chances de succès à ces géofiles biodégradables.

Mots-clés

géofiles biodégradables, érosion, génie biologique, génie écologique, restauration écologique

Entwicklung biologisch abbaubarer Geotextile mit geeigneter Qualität für den Einsatz in der Ingenieurbiologie und -ökologie.

Zusammenfassung

Biologisch abbaubare Geotextile sind zu 100 % natürlich abbaubar und haben eine gewisse mechanische Widerstandsfähigkeit mit der Funktion der temporären Begrenzung der Oberflächenerosion von Böden und des gleichzeitigen Förderns des pflanzlichen Wachstums. Die Pflanzen übernehmen dann nach und nach mit dem Zersetzen des Geotextils seine Funktion. Die Geotextile sind aus Kokos oder Jutefasern, oder auch auf Hanfbasis oder anderen Pflanzenfasern. Importeure, Produzen-

ten und Anwender arbeiten heute zusammen um Werkzeuge für die Bewertung der Qualität und Einbauhilfe anzubieten. Eines der Ziele ist das Erstellen von Dokumenten mit Empfehlungen für die Akteure vor Ort, in einer Art und Weise, die die Erfolgsmöglichkeiten des biologisch abbaubaren Geotextils maximiert.

Keywords

Biologisch abbaubare Geotextile, Erosion, Ingenieurbiologie, Ingenieurökologie, ökologische Restaurierung [Renaturierung]

Sviluppo delle georeti biodegradabili di qualità destinate ad opere di biotecnica ed ingegneria naturalistica

Riassunto

Le georeti biodegradabili sono prodotti biodegradabili al 100% dotate di resistenza meccanica, la cui funzione è di limitare temporaneamente l'erosione superficiale del suolo favorendo la crescita di sistemi vegetativi. Quest'ultimi prendono il posto delle georeti in funzione della loro "biodegradabilità". Le georeti sono dei prodotti in cocco o in tessuto di iuta, o ancora a base di canapa o fibre naturali. Importatori, produttori e utilizzatori lavorano oggi insieme al fine di creare dei mezzi di valutazione della qualità dei prodotti e fornire suggerimenti per la loro messa in opera. Uno degli obiettivi è di creare un protocollo d'utilizzo da mettere a disposizione degli utenti, in modo da poter fornire la più alta garanzia di successo a queste georeti biodegradabili.

Parole chiave

georeti biodegradabili, erosione, biotecnica naturalistica, ingegneria naturalistica, rinnovamento ecologico

Development of quality biodegradable geotextiles for bio- and eco-engineering

Abstract

Biodegradable geotextiles are 100 % biodegradable products providing mechanical resistance, aiming at temporarily controlling soil surficial erosion by favoring vegetation development. These geotextiles are made of coco, jute or chanvre. Importing and producing companies, as well as experts recommending the use of these products, work together for creating tools for quality evaluation and good practices. One of the main objectives is to establish guidelines for practitioners, in order to favor the development and the successful of these biodegradable geotextiles.

Keywords

biodegradable geotextiles, erosion, bioengineering, eco-engineering, ecological restoration

1 Introduction

Les géofiles biodégradables sont des produits 100% biodégradables ouverts et possédant une certaine résistance mécanique, dont la fonction est de limiter temporairement l'érosion superficielle des sols en favorisant la croissance des systèmes végétatifs (Lachat, 1994 ; Adam et al., 2008). Ces derniers prendront ensuite le relai des géofiles au fur et à mesure de leur « biodégradabilité » (Rey et al., 2004). Les géofiles sont perméables et leurs propriétés principales sont une haute capacité d'absorption d'humidité, la flexibilité (ou drapabilité), une « biodégradabilité » rapide, la simplicité de mise en œuvre, le drainage, enfin une réduction de l'éventuelle implantation inégale de la végétation. Parmi leurs intérêts, on peut citer que ce sont des produits naturels 100% biodégradables, en un laps de temps réduit, en disponi-

bilité abondante et aux coûts inférieurs comparés aux géotextiles synthétiques. Il en existe deux familles principales : (1) les géofilets en coco tissés, mis en œuvre principalement dans les zones humides car la fibre de coco se dégrade plus lentement dans l'eau (par exemple lors de techniques de génie biologique sur berges); (2) les géofilets en jute tissés, mis en œuvre principalement dans les zones peu humides ou en accompagnement d'autres géotextiles, hauts de berges, talus secs, terrains montagneux... Par ailleurs, d'autres géofilets, à base de chanvre ou biosourcés, sont en cours de développement, notamment en France. Le développement des techniques de végétalisation, en particulier pour le contrôle de l'érosion et la stabilité des talus et des berges de rivières, passe par un contrôle rigoureux de la qualité intrinsèque des géofilets, ainsi qu'une meilleure maîtrise de leur mise en œuvre. Pour cela, plusieurs actions peuvent être définies, par une concertation entre distributeurs, fabricants de géofilets biodégradables et acteurs du génie biologique et du génie écologique.

2 Définition et caractéristiques principales des géofilets biodégradables

Pour la majorité des produits commercialisés en France, il s'agit de géofilets tissés à base de coco et de jute, auxquels s'ajoute une troisième famille en cours de développement.

2.1 Les géofilets coco

2.1.1 La fibre de coco

L'Inde est le pays leader de la production et de la commercialisation de la fibre de coco. Généralement, on pense que l'utilisation de la fibre de coco a débuté en Inde pendant la période Post-védique. Des références existent sur la noix de coco dans Raghuvamsa de Kalidasa et dans les littératures du Sangam, qui prouvent l'utilisation de la noix de coco en Inde dans une période antique. Marco Polo, le célèbre voyageur qui a visité l'Inde au 13^e siècle, a appelé

la noix de coco la « Noix indienne ». Les navigateurs indiens, qui ont navigué dans les mers de Malaisie, de Java, de Chine et dans le Golfe d'Arabie il y a des siècles, utilisaient la fibre de coco pour leurs cordages.

La fibre de coco est une fibre naturelle polyvalente extraite du mésocarpe, la cosse fibreuse du fruit de coco. Généralement, après nettoyage, la fibre a une couleur dorée, d'où son surnom de « fibre d'or ». Les cellules de fibres individuelles sont étroites et creuses, avec des cloisons épaisses faites de cellulose. Elles sont pâles quand elles sont immatures, mais deviennent plus tard dures et jaunes quand une couche de lignine est déposée sur leurs cloisons. Des fibres de coco brunes mûres contiennent plus de lignines. On distingue :

- les fibres brunes (fibres sèches) : les cosses fibreuses sont imbibées peu de temps dans des fosses ou dans un plan d'eau pour gonfler et adoucir légèrement les fibres avant d'être défibrées;
- les fibres blanches ou fibres trempées (retted fibers) : les cosses immatures sont suspendues dans une fosse fluviatile ou remplies d'eau pendant une période pouvant atteindre dix mois. Pendant ce temps, les micro-organismes démolissent les tissus végétaux entourant les fibres pour les desserrer, un processus connu sous le nom de « retting¹ ». Les segments de la cosse sont alors battus à la main pour se séparer des longues fibres, qui sont par la suite séchées et nettoyées. La fibre longue nettoyée, de qualité supérieure, est alors prête pour être filée.

La fibre de coco brune est utilisée pour les brosses, les essuie-pieds, les matelas, l'isolation, l'emballage et les géofilets coco de qualité inférieure. La fibre de coco blanche est utilisée dans la fabrication de cordes coco utilisées en mytiliculture (élevage des mollusques), de ficelles coco qui serviront soit au tissage des géofilets coco de bonne qualité, soit à envelopper un boudin coco.

2.1.2 Les géofilets biodégradables coco tissés

Un géofilet coco de qualité ne doit être tissé qu'avec des ficelles filées avec des fibres blanches. Le processus de rouissage donnant la fibre de coco blanche ne se fait qu'en Inde, et plus spécialement dans l'état du Kérala. Il est impératif, dans un but qualitatif, d'exiger d'un géofilet coco tissé avec ce type de ficelles et donc de s'assurer de sa provenance.

Il existe pour cela un cadre normatif créé par le Coir Board, institut dépendant du Ministère de l'Industrie Indien depuis le 7 juillet 1954, qui intervient dans le contrôle de la qualité et le respect de ce cadre normatif. Ce dernier classe un géofilet coco par rapport à son poids, sa construction, l'ouverture de ses mailles et le type de ficelles utilisées lors de son tissage. Par conséquent, un géofilet coco répond ou ne répond pas au cahier des charges de la norme. S'il y répond, le matériau sera classé (par exemple : « H2M5 »). Il est à noter que le cadre normatif énoncé précédemment est indien et qu'il ne peut être utilisé qu'à titre d'information en France.

Il est parfois demandé aux distributeurs de géofilets biodégradables les conditions sociales dans lesquelles travaillent les employés de ce secteur en Inde. A titre d'information, le taux d'alphabétisation de l'état du Kerala est égal à celui d'un pays comme la France. La scolarisation des enfants est générale et la protection sociale et médicale est la plus élevée d'Inde. C'est un élément supplémentaire que peuvent prendre en compte les utilisateurs français dans leur demande.

2.2 Les géofilets jute

2.2.1 La fibre de jute

Extrait de la tige de plantes appartenant aux espèces *Corchorus capsularis* et *C. olitorius* (famille des Malvaceae), le jute est une fibre naturelle très résistante. Il vient en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisations. La plante herbacée dont est extrait le jute abonde dans les régions humides, avec des températures

¹ Retting (rouissage) Procédé de rouissage biochimique employant l'action de micro-organismes de plantes fibreuses libériennes, en particulier le chanvre ou le coco, afin d'obtenir la dégradation des céments agrégeant les fibres dans les faisceaux et de permettre ainsi leur séparation physique pour leur utilisation en filature ou corderie en vue de la fabrication de fils ou mèches utilisables dans l'industrie textile ou paratextile, ou la corderie, caractérisé en ce qu'on traite les plantes fibreuses au moyen d'au moins une enzyme SPS ase.



Figure 1 : Plantules un mois après le semis sous un géofilet jute (Y. Crosaz).

Abbildung 1: Keimlinge einen Monat nach der Aussaat unter einem Geotextil aus Jute (Y. Crosaz).

comprises entre 24 et 38 degrés et des précipitations annuelles de 1000 mm au moins.

Le Bangladesh et le Bengale-Occidental sont les principaux producteurs mondiaux de jute, qui est produit par de petits paysans. En Inde et au Bangladesh, on estime que 4 millions environ de paysans vivent de cette culture, assurant la subsistance de 20 millions de personnes, et que des centaines de milliers de personnes travaillent dans le secteur manufacturier. Les paysans vendent leur production à des négociants ou bien sur le marché local. La fibre change ainsi plusieurs fois de mains et de catégorie avant d'arriver à l'usine ou d'être exportée.

Si la culture du jute est exigeante en main-d'œuvre, elle est peu gourmande en engrais et en pesticides. La fibre est le plus souvent récoltée manuellement, la mécanisation n'étant pas adaptée à la culture à petite échelle pratiquée dans ces pays. Les tiges sont fauchées et couchées sur le champ pour les débarasser des feuilles. Puis au bout de quelques jours, elles sont liées en faisceaux. On procède ensuite au rouissage, qui consiste à faire flotter les tiges sur un cours d'eau pour les libérer de la pectine et autres substances mucilagineuses qui les soudent. Le rouissage est terminé – il dure une à trois semaines – quand l'enveloppe de la tige, qui contient la fibre, se sépare facilement du cœur li-

gneux. Après avoir extrait la fibre, le plus souvent manuellement, on procède au lavage et au séchage.

2.2.2 Les géofilets biodégradables jute tissés

Le géofilet jute est un des produits diversifiés les plus importants de la production totale de jute avec une demande potentielle à grande échelle. Grâce à ses propriétés particulières (forte teneur en lignine et facilité de tissage de sa fibre), le fil de jute peut servir à la confection d'un géofilet biodégradable à maillage destiné à être mis en œuvre dans des zones peu humides

(figure 1). Sa complète « biodégradabilité » en fait un produit écologique et par la même occasion fertilisant (200 tonnes d'apport de matière organique par hectare en deux ans).

La demande de géofilet jute augmente dans diverses parties du monde. Cependant, l'absence de conscience adéquate et de normes semble affecter l'expansion possible du marché.

2.3 Les autres géofilets

Une entreprise française s'intéresse à la production de géofilets en fibres de chanvre. Des géofilets biosourcés, à base d'orties ou de lucerne, sont également en cours de développement et de mise au point industrielle en France. Ils apparaîtront bientôt sur le marché.

3 Emploi des géofilets biodégradables pour la lutte contre l'érosion superficielle

Les applications possibles des géofilets biodégradables sont nombreuses : support à la végétalisation, consolidation de la végétation, renfort et protection des berges, réhabilitation de carrières ou de décharges, végétalisation de pistes de ski... La lutte contre l'érosion superficielle en particulier représente l'un des principaux domaines d'application (Crosaz, 1995; Crosaz et Dinger, 1999; Dinger et Moiroud, 1999; Dinger et Magnin, 1999) (Figure 2). Plusieurs facteurs sont impliqués en matière d'érosion superficielle d'un



Figure 2 : Couche de matériaux retenus sous un géofilet (Y. Crosaz).

Abbildung 2: Schicht von Material, das unter einem Geotextil zurückgehalten wurde (Y. Crosaz).

terrain: érodabilité propre du sol (texture, teneur en matière organique...), érosivité dépendante des facteurs climatiques (pluie, ruissellement, gel/dégel...), topographie (pente, longueur du rampant...), couverture végétale. Pour lutter contre cette érosion superficielle, on peut avantageusement terrasser le terrain afin de réduire les pentes, et mettre en place une couverture végétale protectrice des sols. Pour cela, il existe plusieurs approches selon les facteurs érosifs et la nature du sol en place :

- si le sol est en place et les conditions climatiques sont favorables à la pousse d'une végétation spontanée, et lorsque l'absence d'enjeu le permet, la solution à préférer est de laisser faire ;
- si le sol est en place et les conditions climatiques sont favorables à la pousse d'une végétation, mais que les enjeux ou contraintes nécessitent la mise en place d'un système de protection provisoire, alors l'usage d'un géofilet (ou d'un paillis) est conseillé, le but étant de freiner les facteurs dynamiques hydrauliques ou éoliens ;
- dans des cas plus problématiques ou extrêmes, où les géofilets et le génie biologique ne suffisent plus, différentes techniques autres peuvent être développées, dont les géosynthétiques tridimensionnels, les géonattes, etc...

Les protections de surfaces sont ainsi assurées par des produits qui peuvent être soit synthétiques, soit d'origine végétale et biodégradables. La nature biodégradable des matériaux étant aujourd'hui plus porteuse en termes d'image, il existe également des matériaux associant des fibres synthétiques à des fibres biodégradables.

De par leur forte résistance à la traction, leur lente « biodégradabilité » en milieu humide et leur fort pouvoir de rétention, les géofilets biodégradables coco tissés sont les produits les mieux adaptés pour lutter contre l'érosion des berges. Six types de géofilets sont principalement utilisés pour ces travaux :

- trois géofilets coco tissés : norme H2M9 – 900 g/m², norme H2M5 – 740 g/m² et norme H2M6 – 400 g/m² ;
- un géofilet coco noué qui est utilisé pour l'enveloppe extérieure d'une

fascine lorsqu'elle est fabriquée sur chantier : norme NA1 – 205 g/m² ;

- une natte coco non tissée, aiguilletée, à 1150 g/m² (renforcée par un filet de jute ou latexée), qui est utilisée pour l'enveloppe intérieure d'une fascine lorsqu'elle est fabriquée sur chantier ;
- un géofilet coco bouclé qui est utilisé pour la protection des terrains lorsque l'érosion est importante : norme SPL L P-1200 g/m².

Les géofilets biodégradables jute tissés sont préférés dans les situations peu humides, telles que les hauts de berges, les talus secs, les terrains montagneux... Il existe trois types de produits correspondant à trois densités : 496 g/m², 732 g/m² et 1000 g/m².

4 Créer des outils d'évaluation de la qualité des géofilets et d'aide à leur mise en œuvre

4.1 Contrôle qualité et recherche

Il s'agit aujourd'hui de s'assurer de la qualité des produits par un contrôle rigoureux de leurs caractéristiques, afin de ne pas avoir de surprises, à la fois lors de leur mise en œuvre sur le terrain et dans le temps. Sur le terrain, le maître d'œuvre peut mener des vérifications simples pour valider la bonne qualité des produits fournis : taille de maille, bonne tenue des fibres, poids d'un échantillon...

Il n'existe aujourd'hui que le Coir Board du gouvernement Indien pour les caractériser. Il y a cependant matière à faire appel à la recherche et à réaliser des tests pour caractériser les produits directement en France. Il est possible, pour cela, de se référer à des normes existantes, notamment en géotextiles, avec des adaptations des modes opératoires en rapport avec les propriétés spécifiques de ces produits. Dans un premier temps, ces tests peuvent être effectués par des laboratoires nationaux (IFTH, Ecole des mines d'Alès...) ou des laboratoires privés. Un plan de travail doit être défini par un groupe spécialisé comprenant les spécialistes des géofilets ainsi que des experts de laboratoires. On pourra

aussi faire appel aux expériences des acteurs des géotextiles, notamment au Comité français des géotextiles (CFG) qui travaille sur ces sujets depuis près de 25 ans. Dans un deuxième temps, il serait souhaitable d'aller vers une certification (par exemple du type ASQUAL), qui certifiera les produits selon des tests normés. Dans ce cas, la notion de valeurs s'accompagnerait de tolérances pour chaque paramètre mesuré et assurerait la continuité des performances des produits au client final.

En plus des caractéristiques mécaniques, géométriques et hydrauliques, des tests sont aussi à développer sur la question de la durabilité. En effet, si les conditions d'installation de ces produits peuvent différer selon les zones d'application, les notions de durée de leur action et de « biodégradabilité » sont très importantes. Aussi, il y a lieu de l'apprécier par des tests à mettre au point. Compte tenu qu'il s'agit de fibres naturelles, donc de comportements différents des matériaux synthétiques, il faut mettre en place un plan de travail pour réaliser ces tests, en laboratoire d'une part et, probablement, en situation pratique d'autre part pour obtenir des corrélations et définir les tests définitifs efficaces.

4.2 Application et mise en œuvre des géofilets

Il existe actuellement des guides européens et français pour l'application des géofilets biodégradables (Lachat, 1994 ; VNF, 2003 ; Adam et al., 2008). Il serait cependant opportun aujourd'hui de produire, avec la coopération des différents acteurs du génie biologique et du génie écologique, des documents de recommandations à mettre à disposition des prescripteurs et des gestionnaires, afin de promouvoir à la fois la rédaction de préconisations techniques appropriées et de mises en œuvre efficaces, dans un objectif de développement durable des géofilets biodégradables.

5 Conclusions

La demande en géofilet progresse, mais le développement quantitatif de ce commerce a tendance à se faire au détriment de la qualité. Il est important pour la tenue des ouvrages exécutés que

ceux-ci soient réalisés avec des géofiles de qualité dans le respect de modes efficaces et approuvés de mise en place. A ce titre, les maîtres d'ouvrage tant privés que publics, ainsi que leurs maîtres d'œuvre, doivent être plus vigilants et plus exigeants sur la qualité et l'origine des produits mis en œuvre, et doivent étoffer leurs descriptifs concernant les géofiles biodégradables lors de la rédaction des Cahiers des clauses techniques particulières (CCTP).

6 Bibliographie

Adam P., Debiais N., Gerber F., Lachat B. (2008). Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. La documentation française, Paris.

Crosaz Y. (1995). Le matériel végétal : un outil pour la protection des sols. Bulletin du réseau Erosion 5, 449–460.

Crosaz Y, Dinger F. (1999). Mesure de l'érosion sur ravines élémentaires et essais de végétalisation. Bassin versant expérimental de Draix. Actes du séminaire « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne », Draix/Le Brusquet/Digne, 22–24 octobre 1997, 103–118.

Dinger F., Magnin V. (1999). Micro-climatologie du sol sous toile de jute : exemple d'un talus de route de montagne. Ingénieries EAT, n° spécial « Géosynthétiques, techniques et applications », 49–54.

Dinger F., Moiroud C. (1999). L'utilisation de toile de coco dans les ouvrages de protection des berges. Ingénieries EAT, n° spécial « Géosynthétiques, techniques et applications », 55–59.

Lachat B. (1994). Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales. Ministère de l'Environnement, Paris.

Rey F., Ballais J.L., Marre A., Rovéra G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. Comptes rendus géoscience 336, 991–998.

VNF (2003). Application des techniques végétales pour la protection des berges des voies navigables. Guide des techniques végétales, Paris.

Adresse de l'auteur :

AGéBio, 2 rue de la Papèterie, BP 76, 38402 St-Martin-d'Hères cedex, France (developpement@agebio.org)



Mehr als grüne Böschungen. Mit Sicherheit!

- Böschungsbegrünung
- Erosionsschutz
- Nasssaat
- Jute- und Kokosgewebe
- Hochlagenbegrünung
- Rohbodenbegrünung
- Wildblumenwiese

Unser Angebot für eine erfolgreiche Begrünung:

- Objektberatung
- Produkte ab Lager
- Ausführung und Einbau

Begrünungen Hunn

Pilatusstrasse 14, CH-5630 Muri AG
Tel. 056 664 22 25, Fax 056 664 29 25
info@begruenungen-hunn.ch, www.begruenungen-hunn.ch



schweizer

Begrünung für alle Lagen

Die Spezialisten von Schweizer sind in allen Begrünungsfragen für Sie da!

175 Jahre
1840–2015

Eric Schweizer AG, Postfach 150, CH-3602 Thun
Tel. +41 33 227 57 21, Fax +41 33 227 57 28
www.ericsschweizer.ch

Les matériaux synthétiques, alliés du génie végétal?

Jean-Paul Ducol, Marie Tankéré

Résumé

Si le génie végétal consiste à mettre en œuvre prioritairement des matériaux d'origine végétale, certains objectifs en matière d'anti-érosion durable, de contrôle de la stabilité des pentes et talus ou encore de restauration de milieux dégradés, semblent difficiles à atteindre si l'on restreint le champ des matériaux disponibles. Cet article montre, au travers d'exemples de réalisations concrètes, dont certaines ont plus de vingt ans dans des domaines d'application très variés, comment il est possible de réconcilier l'ingénierie végétale avec l'emploi judicieux de géosynthétiques à base de matériaux de synthèse. Ces derniers sont notamment utiles dans les zones pour lesquelles le confortement impose en particulier une longue durée de vie, une forte résistance aux intempéries et une dégradation aux ultra-violets. Des méthodes de caractérisation des géosynthétiques, qui pourraient être transférées aux matériaux utilisés pour le génie végétal, sont également décrites.

Mots-clés

Géotextiles synthétiques et de fibres naturelles, géofiliets, anti-érosion, protection

I materiali sintetici, alleati dell'ingegneria naturalistica?

Riassunto

La bioingegneria si affida principalmente all'uso di materiali di origine vegetale, ma quando si tratta di anti-erosione del suolo a lungo termine, di controllo della stabilità di sponde e scarpate, o di restauro di siti danneggiati, sembra ancora difficile non affidarsi ad altri tipi di materiali. Questo articolo mostra, attraverso degli esempi concreti, tra i quali

opere dalla durata più che ventennale in svariati campi d'applicazione, come sia possibile conciliare l'ingegneria naturalistica con l'impiego giudizioso di geotessili a base di materiali sintetici. Questi ultimi sono particolarmente utili in opere di lunga durata, in caso di una lunga esposizione a raggi UV o a condizioni meteorologiche estreme. Vengono anche descritti dei metodi di caratterizzazione dei geotessili, che potrebbero essere estesi al campo dei materiali utilizzati per il genio naturalistico.

Parole chiave

Geotessili sintetici ed in fibre naturali, georeti, anti-erosione, protezione

Synthetic materials, supplementary for bioengineering?

Summary

The bioengineering gives priority to the use of natural and bio-based materials. Nevertheless, in some cases the objectives in terms of long-lasting antierosion, slopes stabilization, or restoration of degraded sites, are difficult to reach without help of other materials. This article aims to show, using case histories from the last twenty years in various situations, how it makes sense to reconcile the use of synthetic materials with the bioengineering. Those materials should be used for a maximal efficiency where a long time effect is expected, for example in case of intense UV exposure or extreme weather conditions. Some testing methods used in the field of geosynthetics are also described and the interest of using them for the characterization of bio-based materials is discussed.

Keywords

Geotextiles made of synthetic and natural fibers, geonets, erosion prevention, protection

Sind Kunststoffe eine Ergänzung zum Bioengineering?

Zusammenfassung

Beim Bioengineering werden vorzugsweise Biomaterialien aufgrund ihrer Abbaubarkeit eingesetzt. Wegen eingeschränkter Biomaterialauswahl und in bestimmten Fällen wie Erosionsschutz, Befestigung von Böschungen und Steilhängen, Sanierung von Umweltschäden sind aber die festgelegten Ziele schwer zu erreichen.

Dieser Artikel zeigt anhand konkreter Beispiele von Anlagen, unter denen einige vor über 20 Jahren gebaut wurden und in unterschiedlichen Einsatzbereichen, wie es möglich ist, Bioengineering mit sinnvollem Einsatz von Kunststoffen zu kombinieren.

Diese Materialien sind insbesondere an Stellen, wo eine lange Lebensdauer, eine starke UV-Beständigkeit und ein langfristiger Schutz gegen rauhe klimatische Verhältnisse verlangt werden, erforderlich.

Keywords

Geotextilien aus synthetischen und Naturfasern, Erosionsschutz, Stabilisierung

Introduction

Le génie végétal désigne l'application de techniques ou systèmes utilisant des matériaux naturels qui, avec leurs propriétés spécifiques, sont aptes à maîtriser l'érosion des sols, à aider à la végétalisation ou à accélérer la remise en

¹ Géotextile : matériau polymère perméable qui peut être tissé, non-tissé ou tricoté, utilisé dans les applications de géotechnique et de génie civil.



Fig. 1 : Végétalisation de talus routier à l'aide d'un géofilet associant fibres synthétiques et naturelles.

Abbildung 1: Begrünung einer Strassenböschung mit Hilfe eines Geotextils kombiniert aus synthetischen und natürlichen Fasern.

état de zones ayant été polluées ou dégradées. Bien que le génie végétal consiste à mettre en œuvre prioritairement des matériaux d'origine naturelle, dont la dégradabilité à moyen ou long terme représente souvent un atout, certains objectifs en matière d'anti-érosion durable, de contrôle de la stabilité des pentes et talus ou encore de restauration de milieux dégradés, peuvent être parfois difficiles à atteindre si l'on restreint le champ des matériaux à utiliser.

La protection des talus d'ouvrages et de pentes naturelles contre l'érosion constitue un enjeu important : un défaut de protection peut mettre en péril leur stabilité et par là même menacer la sécurité des utilisateurs. Les solutions mettant en œuvre des géotextiles¹, associés à l'utilisation de végétaux, apportent une réponse au niveau de la sécurité et sur l'aspect environnemental de par l'esthétique finale de l'ouvrage équipé.

A travers des exemples de réalisations concrètes, dont certaines ont plus de 25 ans, on observe comment il est possible de réconcilier l'ingénierie végétale avec l'emploi judicieux de matériaux synthétiques. Ces derniers sont notamment utiles dans les zones pour lesquelles le confortement du site impose une longue durée de vie du matériau, en particulier une



Fig. 2 : Dispositif de protection et accroche-terre sur grande pente (couverture d'un centre de stockage de déchets).

Abbildung 2: Schutzschicht und Erdverankerungen bei grossem Gefälle (Bedeckung einer Mülldeponie).

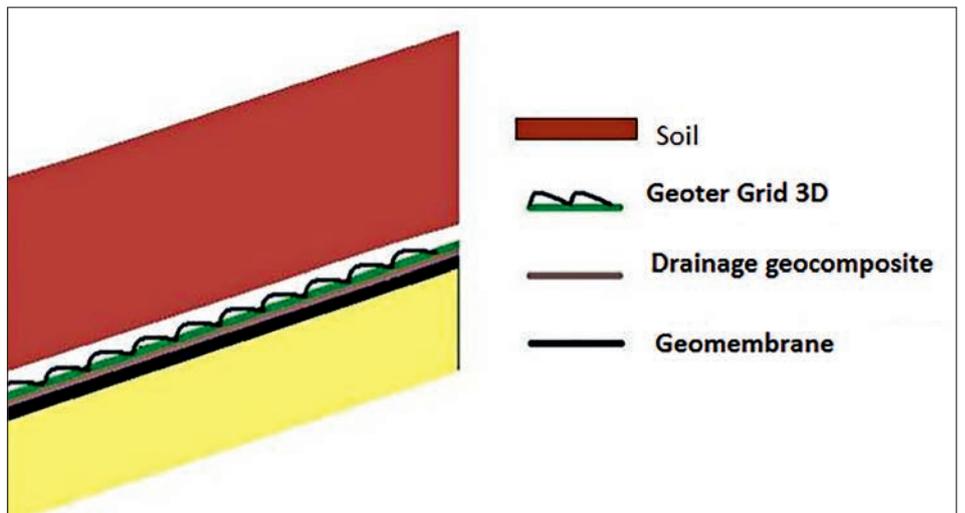


Fig. 3 : Structure du dispositif de protection, installation de stockage de déchets.

Abbildung 3: Struktur der Schutzschicht, Anbringung der Müllablagerungen.

forte résistance face aux intempéries et tenue aux rayons ultra-violet. De surcroît, l'utilisation de géotextiles de haute résistance permet fréquemment de réduire l'emprise des ouvrages puisqu'ils autorisent la création de pentes plus raides. Les définitions indiquées en notes proviennent du Comité Français des Géosynthétiques (Bibliographie : 5).

Par ailleurs, pour certaines applications, sont proposés des géotextiles ou géofilet² intégrant directement en fabrication deux ou trois matériaux différents, dont certains sont synthétiques et d'autres naturels, pour répondre à des fonctions en évolution durant le temps de l'utilisation. A titre d'exemple, il existe des géogrilles³ à base de polyéthylène comportant

² Géofilet: géotextile tricoté ou extrudé selon un motif régulier, dont l'ouverture de maille est supérieure à la taille des brins ou chaînettes qui le constituent, utilisé dans les applications de géotechnique ou de confinement.

³ Géogrille: Structure plane constituée par un réseau ouvert d'éléments résistant à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, utilisée dans les domaines de la géotechnique et du Génie Civil.

une trame biodégradable en coton, la végétalisation pouvant ainsi être facilitée par hydro-ensemencement dès la fin de pose de la grille. La végétation une fois en place, le coton disparaît et la grille en polyéthylène est masquée tout en assurant une fonction de maintien de la pente à long terme, en association avec le système racinaire.

Il s'agit donc bien d'une complémentarité d'application et non pas d'une concurrence avec les fibres végétales. Une telle association représente également une réponse économique très appréciable, puisque la fonction anti-érosion est assurée par le produit même qui permet la végétalisation.

Exemple d'application sur grands talus d'ouvrages en terre

Il s'agit d'un exemple de couverture d'un grand talus en vue de sa protection immédiate contre l'érosion et de l'aide à sa végétalisation pour intégrer l'ouvrage dans son environnement. On trouve cette situation sur des grandes pentes de talus ou en couverture de centres de stockage de déchets par exemple. Un des problèmes majeurs dans les couvertures de centres de stockage de déchets est la

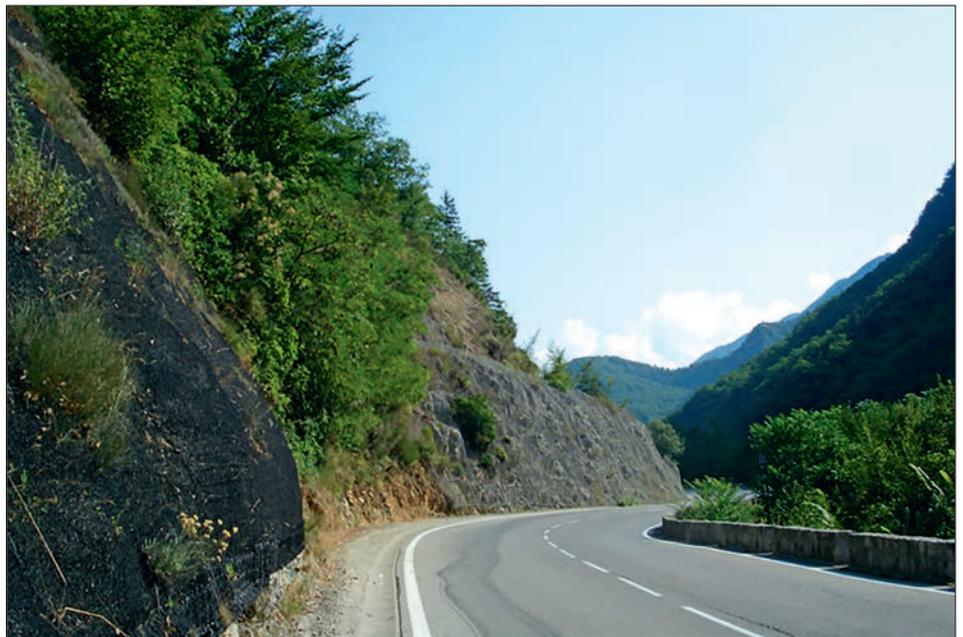


Fig. 5: Filet synthétique de retenue de talus exposé Sud, vallée de Vésubie (05).
Abbildung 5: Synthetisches Netz zum Schutz einer exponierten Strassenböschung, Vésubietaal (Departement 05).



Fig. 6: Exemples de végétalisation à travers le filet synthétique.
Abbildung 6: Beispiel der Begrünung entlang einer synthetischen Netzes.

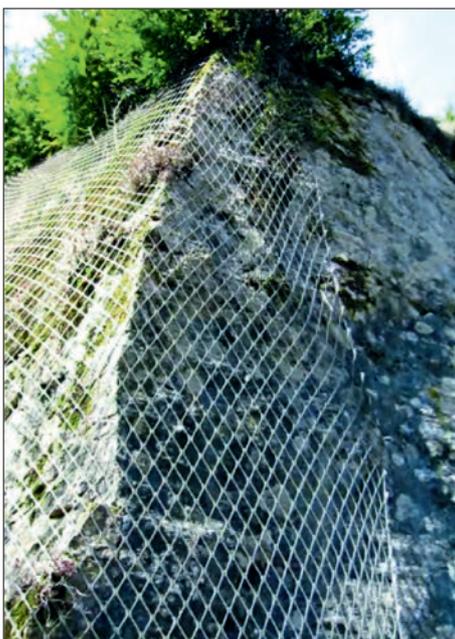


Fig. 4: Filet synthétique de retenue de pierres en site classé, RD Crémieu (38).
Abbildung 4: Synthetisches Netz zum Schutz vor Steinschlag, Departementsstraße des Crémieu (Departement 38).

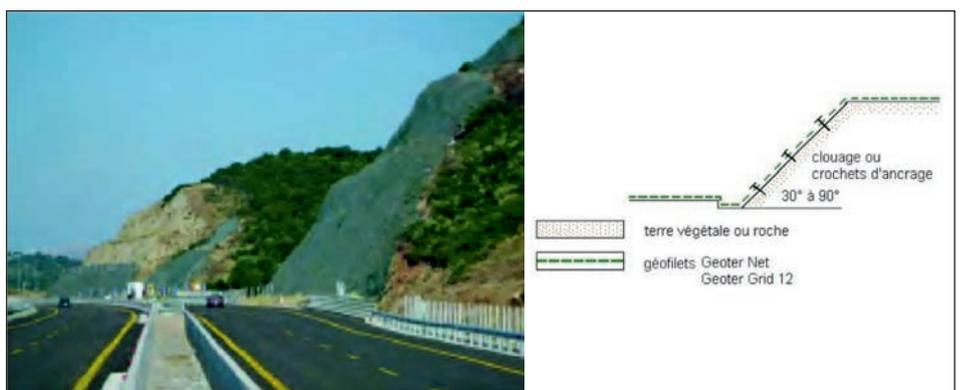


Fig. 7: Filet synthétique de maintien d'une pente forte, autoroute ionienne (Grèce) et schéma d'installation.
Abbildung 7: Synthetisches Stütznetz einer steilen Böschung, ionische Autobahn (Griechenland) und Einbauschema.

stabilité de la couche de terre végétale sur les talus à moyen et long terme et son érosion. Pour cela, l'utilisation d'un géosynthétique de renforcement pour reprendre les efforts transmis par la couche de surface aux couches sous ja-

centes est nécessaire. Son rôle consiste également à éviter autant que possible de solliciter les structures de drainage et d'étanchéité, et d'autre part lutter contre l'érosion de surface (Bibliographie: 2). Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir

un matériau qui permet de maintenir la terre végétale en position inclinée et de supporter la charge de celle-ci, qui peut atteindre jusqu'à plusieurs tonnes en pied de massif (3).

La fonction de départ est donc d'aider à l'accrochage de la terre végétale avec un certain relief, de résister aux efforts et d'assurer une certaine armature pendant une longue durée, notamment si le support ne présente qu'une couche de sol mince.

Exemple de stabilisation de pentes rocheuses avec filets anti-érosion et de confinement

Il est fréquent d'observer le long des routes ou voies ferrées des talus rocheux recouverts de grillages métalliques, dont la fonction est d'empêcher la chute de blocs rocheux sur les voies. Outre leur esthétique discutable, ces grillages présentent l'inconvénient d'être sensibles à la corrosion et d'absorber une énergie limitée, tant que les fils utilisés sont de faible section.

Les filets de retenue de pierres à base de matériaux synthétiques offrent une alternative intéressante, bien que trop peu exploitée encore, à ce type de protection. Conçus à base de polyéthylène haute densité traité anti-UV ou de polypropylène, associés éventuellement à des fibres naturelles, les grilles et filets assurent durablement une protection anti-érosion et une protection contre les chutes de pierres et les éboulis.

Leur conformabilité et leur résistance sont des atouts importants pour leur mise en œuvre et pour un fonctionnement optimal (Bibliographie: 1). Avec une absorption énergétique comparable à celle des grillages métalliques et une plus grande extension avant rupture, ils sont particulièrement efficaces pour les applications pare-éboulis. Légers et maniables, ils constituent une solution rentable pour des installations en zones montagneuses difficiles d'accès.

Une attention particulière ayant été apportée au choix des couleurs, ils s'intègrent parfaitement dans les sites qu'ils sécurisent. La végétalisation des pentes et des talus vient parfaire leur intégration. Ceci est notablement apprécié dans les sites classés.

Depuis plus de 25 ans, les filets anti-érosion et pare-pierres plaqués ont fait la preuve de leurs performances techniques et de leur longévité, attestées par l'expérience et les essais. Certains filets synthétiques font l'objet d'un suivi de plusieurs dizaines d'années d'exposition, en conditions d'exposition sévères, et de très faibles pertes de résistance ont pu être quantifiées après 15, 20 et 25 ans d'exposition (Bibliographie 4).

Outre la fonction de parer à la chute de pierres, il faut noter dans tous les sites équipés le fait de stabiliser et d'éviter la disparition du sol de surface. Ces filets favorisent au contraire le maintien du sol,

permettant à la végétation de s'ancrer, de reprendre vie et ainsi par l'enracinement, de limiter l'érosion et d'assurer une meilleure sécurité des ouvrages.

Exemple d'utilisation de matériaux synthétiques en complémentarité avec des matériaux biodégradables

Ce chantier est un exemple de complémentarité d'application d'un géotextile/géofilet synthétique et d'un géofilet de fibres naturelles. En effet, on comprend très bien dans ce cas la fonction de chacun, notamment la nécessité de résistance et durabilité du composant de maintien du complexe de protection, lequel est sollicité durement par le courant, et la fonction du géofilet de fibres naturelles devant intervenir comme protecteur d'érosion immédiate et de « catalyseur » de végétation, pour disparaître ensuite par biodégradabilité lorsqu'il a aidé la végétation à prendre sa place naturelle. Dans ce cas, la notion de couleur du géofilet synthétique est également importante pour l'intégration dans le site naturel.

Propriétés requises pour les fonctions anti-érosion et végétalisation sur pentes ou en cas de sollicitations mécaniques à long terme

Chaque chantier a ses particularités propres. Quel que soit le besoin, il est nécessaire de proposer à chaque fois le produit le mieux adapté, en tenant compte de ses caractéristiques mécaniques, des contraintes de mise en œuvre et des impératifs d'intégration dans le site. Dans les cas d'ouvrages sur pentes, pour lesquels une tenue mécanique à long terme est requise, du type de ceux qui ont été présentés ci-avant, il est impératif de poser la question de la caractérisation des produits proposés, afin d'assurer la pérennité de la fonction anti-érosion dans le temps.

Il convient au préalable de noter que, si le grammage ou poids au mètre carré peut représenter un critère d'appréciation de certains produits comme les géofilets d'origine naturelle à faible résistance, il n'en est pas de même pour les filets



Fig. 8 : Installation d'un filet anti-érosion de berges en polyéthylène associé à des éléments naturels – Vallée de la Bièvre.
Abbildung 8: Einbau eines Textils aus Polyethylen gegen Ufererosion in Verbindung mit natürlichen Elementen – Bièvretal.

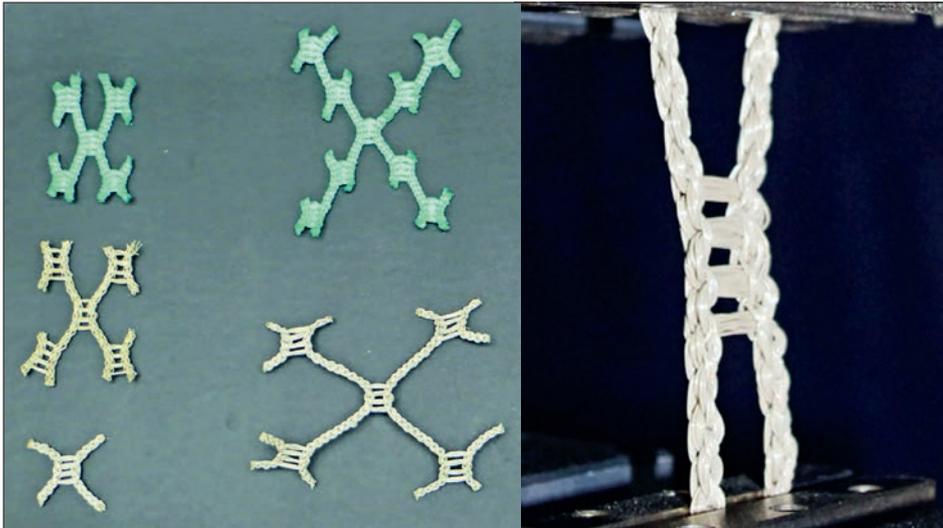


Fig. 9: Tests mécaniques de résistance des filets. a) Eprouvettes / b) Test de traction spécifique liaisons. *Abbildung 9: Mechanische Resistenztests der Textilie. a) Versuchselemente / b) Anschlusspezifischer Zugfähigkeitstest.*

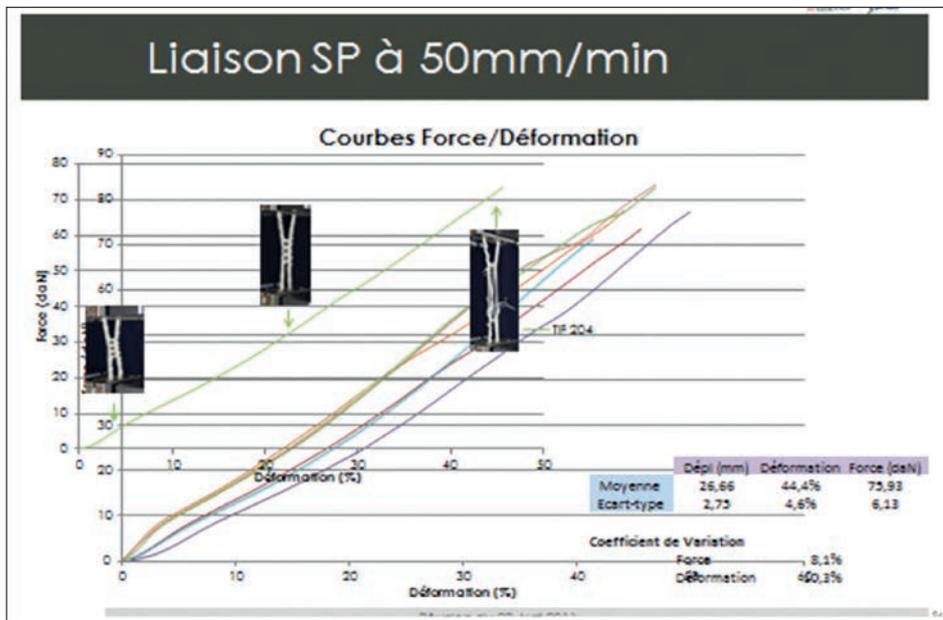


Fig. 10: Exemple de résultat de test de résistance mécanique. *Abbildung 10: Beispiel eines Testergebnisses der mechanischen Beständigkeit.*

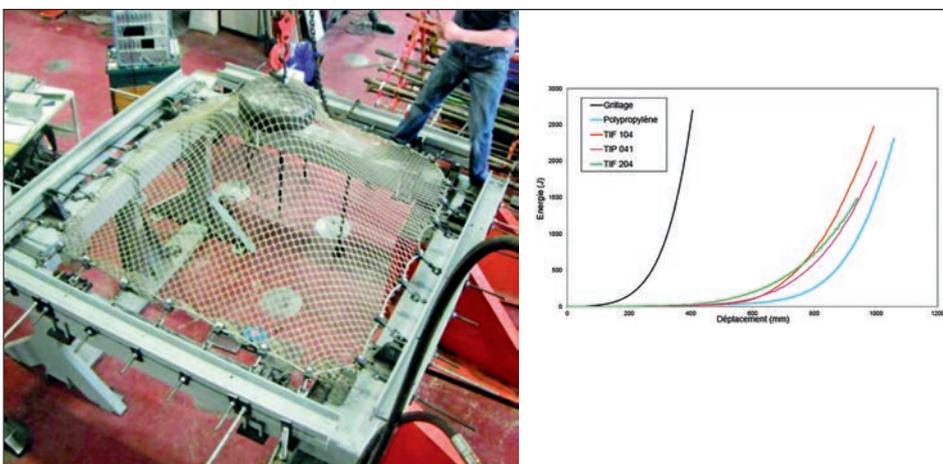


Fig. 11: Test d'absorption énergétique sur filets – Laboratoire LGCIE, INSA Lyon. a) Installation de test / b) Exemple de courbe énergie/déplacement comparatif avec grillage métallique. *Abbildung 11: Test der Energieabsorption der Netze – Labor LGCIE, INSA Lyon. a) Versuchsaufbau / b) Beispiel der Energiekurven / Vergleichskurven mit der Verschiebung eines Metallgitters.*

synthétiques. Pour ceux-ci, la résistance ou la tenue dans le temps ne sont, en aucune façon, proportionnelles à la quantité de matériau mise en œuvre : ce sont des filets à construction technique et propriétés mécaniques élevées, dont la légèreté représente au contraire un atout quant à leur mise en œuvre. Ils peuvent en effet être aisément transportés et déroulés en utilisant des moyens de manutention limités, ce qui représente un avantage non négligeable lorsque les sites naturels à protéger sont difficiles d'accès.

Les propriétés mécaniques des géofilets doivent être définies et garanties, non seulement à court terme mais, suivant les applications, aussi à long terme de façon à assurer la pérennité des ouvrages et la sécurité des utilisateurs. Les principales propriétés à garantir sont la durabilité, la résistance mécanique et la capacité d'absorption énergétique :

- Durabilité : réalisés en polyéthylène hautement stabilisé anti UV, insensibles à la corrosion, les géofilets à base de cette fibre de haute résistance assurent un confinement durable des sols. D'autres fibres comme le polypropylène peuvent être associées. Des tests en laboratoires spécialisés permettent d'indiquer leur tenue dans le temps. De nombreuses mesures effectuées par prélèvement sur des chantiers de 10, 15 et plus de 20 années d'exposition, ont permis d'établir de très bonnes corrélations avec les résultats de ces laboratoires.

Biblio: réf. (4)

- Résistance : elle est mesurée selon la norme NF EN ISO 10319 « Géotextiles – essai de traction des bandes larges » ou selon des méthodes dérivées, adaptées au cas des filets.

La technologie spécifique de fabrication permet de réaliser des géogrilles à forte résistance en traction (25 à 100 kN/m, voire plus) pour le renfort des fortes pentes. Pour un effet maximal, les grilles peuvent aussi être associées à des géotextiles de renforcement.



Fig. 12 : Dispositif d'essai plan incliné (IRSTEA).
Abbildung 12: Versuchseinrichtung für geneigte Flächen (IRSTEA).

- **Capacité d'absorption énergétique :**
Pour les géofiles de confinement et anti chutes de blocs, il est impératif de mesurer la capacité d'absorption énergétique, selon des tests intégrant à la fois la résistance et la déformation.

- **Caractérisation de l'interface :**
Dans le cas des grilles accroche-terre, plusieurs essais de caractérisation de l'interface avec le sol ont été développés (essais de traction in situ, essais au plan incliné).

D'autres tests spécifiques sont en cours de développement pour affiner la mesure d'autres caractéristiques et propriétés de ces matériaux.

Conclusion

Il est clair que les géotextiles et géofiles apportent des réponses techniques efficaces à de nombreuses situations d'ouvrages dans lesquels sont recherchées la protection ou la réhabilitation de l'environnement. Dans la mesure où l'on est capable de réaliser de très grands travaux d'aménagements routiers et d'infrastructures, se pose toujours la question de leur intégration dans l'environnement. La longue expérience de l'application de dispositifs anti-éro-

sion, d'aide à la végétalisation, et le renforcement de certaines zones au moyen des géotextiles et de géofiles à base de matériaux synthétiques, combinés à des matériaux d'origine naturelle, démontrent les possibilités de développement de solutions répondant aux besoins du génie végétal.

Les fonctions des géofiles à base de fibres naturelles biodégradables et celles des géofiles et géogrilles de fibres de synthèse à longue durée de vie, loin de s'opposer, permettent au contraire d'imaginer des solutions prenant en compte leur complémentarité. Compte tenu des exigences de sécurité, tant vis-à-vis des usagers que de l'environnement, il est impératif que les caractéristiques et propriétés des matériaux soient de plus en plus mesurées et certifiées, afin de ne pas engendrer de risques. De plus, une qualité mesurée selon des critères reconnus permettra de faire prendre en considération ces solutions innovantes par les prescripteurs et les maîtres d'ouvrage.

Bibliographie

- 1) Ministère de l'Équipement – BRGM (1988). Utilisation de filets souples pour la prévention de chutes de blocs-Protection des installations humaines en montagne. Rapport de recherche, novembre 1988.
- 2) Auray Germain, Arab Rabah (2011). Conception, caractérisation et réalisation d'un système de retenue de terre pour les talus de CSD: cas du CSD de Firminy, France. Rencontres 2011 du Comité Français des Géosynthétiques, Tours, 22 au 24 mars 2011.
- 3) Garcin Patrick, Allagnat Dominique, Guerpillon Yves (2011). Optimisation de la conception d'une couverture d'Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISD ND) à partir d'expérimentations simples. Rencontres 2011 du Comité Français des Géosynthétiques, Tours, 22 au 24 mars 2011.
- 4) Auray Germain, Limam Ali, Robit Philippe, Tankéré Marie (2012). Comportement mécanique et comportement à long terme de géofiles pour la protection des pentes. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Bordeaux, 4-6 juillet 2012.
- 5) Comité Français des Géosynthétiques : Journée technique 30/09/2015.

<http://www.cfg.asso.fr/evenements/journee-technique-geosynthetiques-et-leurs-applications-du-30-septembre-2015>

Adresse de l'auteur :

MDB Texinov, 56 route de Ferrossière,
BP 201, St Didier de la Tour,
38354 La-Tour-du-Pin, France
(jpdicol@texinov.fr)

Effet des plantes sur les processus érosifs: de la connaissance des traits fonctionnels aux applications d'ingénierie végétale et de génie végétal

Mélanie Burylo et Freddy Rey

Résumé

Dans de nombreux pays du monde et particulièrement en France dans les Alpes du Sud françaises, la lutte contre l'érosion est un objectif majeur dans les projets de restauration écologique des terrains dégradés, qui passe par le développement d'une couverture végétale efficace pour réduire l'érosion et piéger les sédiments en transit. L'effet des espèces végétales sur les processus érosifs et sédimentaires peut être étudié grâce à une approche par les traits fonctionnels. Les auteurs s'intéressent ici à l'identification des traits fonctionnels permettant d'expliquer et de prévoir les performances écologiques des plantes et à l'intérêt de ces résultats pour la restauration écologique des terrains érodés. Ils précisent que les connaissances sur ces traits et l'identification des espèces susceptibles d'être intéressantes pour assurer des fonctions efficaces de piégeage et de fixation de sédiments doivent contribuer à aider les compétences en ingénierie végétale et en génie végétal, en permettant de mieux: 1/ guider le choix des espèces à utiliser au sein des ouvrages de génie végétal; 2/ évaluer l'efficacité potentielle d'une couverture végétale spontanée pour le contrôle de l'érosion et de la sédimentation.

Mots-clés

Végétation, fixation des sols, piégeage des sédiments, restauration écologique, ingénierie écologique

Pflanzeneffekte auf Erosionsprozesse: vom Wissen der funktionalen Anwendung zur Anwendung im Pflanzenbau und in der Ingenieurbiologie

Zusammenfassung

In vielen Ländern der Erde und insbesondere in Frankreich, in den süd-

französischen Alpen, ist der Kampf gegen die Erosion ein Hauptziel von Renaturierungsprojekten in beeinträchtigten Bereichen, das durch eine effiziente Grünbedeckung zur Reduzierung der Erosion und für den Rückhalt von mobilem Sediment erreicht wird. Die Auswirkung von Pflanzenarten auf Erosionsprozesse und Sedimentverlagerungen können anhand einer Methode basierend auf funktionellen Merkmalen studiert werden. Die Autoren interessieren sich hier für die Identifizierung funktioneller Merkmale, die es erlaubt das ökologische Entwicklungspotential der Pflanzen im Voraus zu bewerten und im Interesse der Anwendung der Ergebnisse für Renaturierungsprojekte. Sie verdeutlichen, dass die Kenntnisse über die Funktionalität und die Identifikation relevanter Arten, die interessant sind für eine effiziente Funktion des Sedimentrückhalts und der Sedimentfixierung, im Kompetenzbereich der Ingenieurbiologie und des Pflanzenbaus mit eingebracht werden müssen um

folgende Aspekte besser umzusetzen: (1) Begleiten von Entscheidungsprozessen über Pflanzenarten, die Bauwerken der Ingenieurbiologie dienlich sind; (2) Auswerten des Effizienzpotentials einer spontanen Grünbedeckung um die Erosion und die Sedimentverlagerung zu kontrollieren.

Keywords

Vegetation, Bodenfixierung, Sedimentrückhalt, ökologische Restaurierung [Renaturierung], Ingenieurökologie

Effetto delle piante sui processi erosivi: dalla conoscenza degli elementi funzionali alle applicazioni d'ingegneria e di biotecnica naturalistica

Riassunto

In numerosi paesi del mondo ed in special modo nelle regioni delle sud-alpine della Francia, la lotta contro l'erosione è uno degli obiettivi di maggior interesse all'interno dei progetti di restaura-



Photo 1 : Un exemple de restauration écologique à l'échelle du bassin versant dans les terrains marneux érodés des Alpes du Sud (Bassin versant du Francon, Draix, Alpes-de-Haute-Provence).

Foto 1: Beispiel eines Renaturierungsprojekts im Umfangbereich eines Einzugsgebietes mit Erosion von Mergelgestein in den Südalpen (Einzugsgebiet des Francon, Draix, Seetalpen).

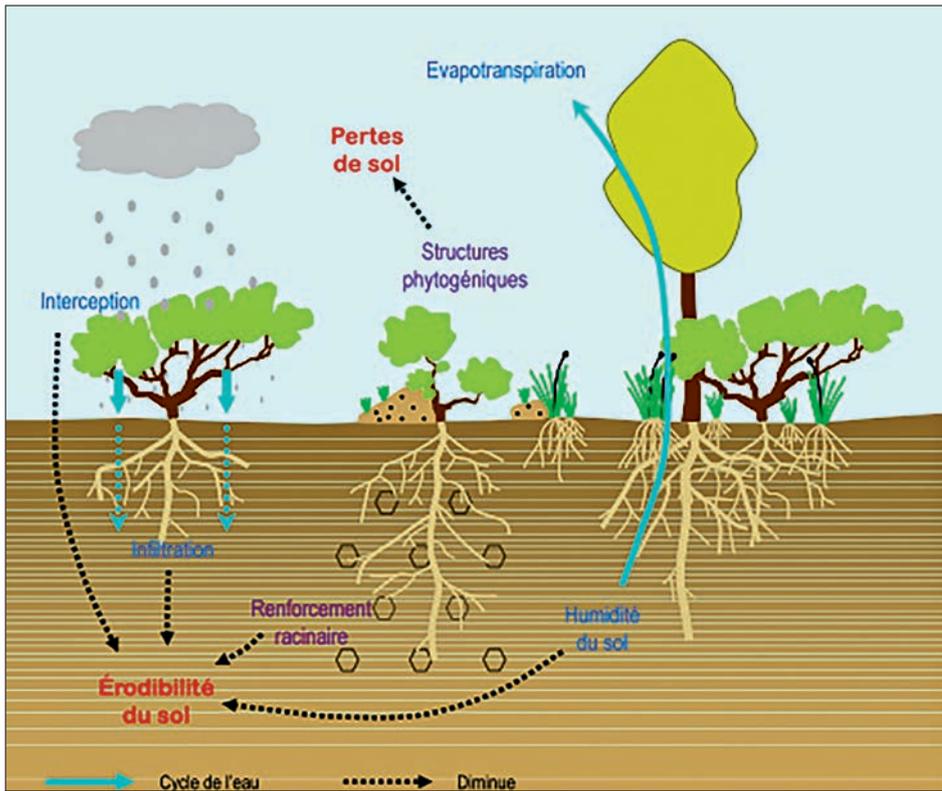


Figure 1: Influence des espèces végétales sur les processus érosifs. Les plantes protègent les sols de l'érosion par des processus hydrologiques (en bleu) et mécaniques (en violet) qui agissent sur l'érodibilité du sol et les pertes de sol.

Abbildung 1: Einfluss von Pflanzen auf Erosionsprozesse. Pflanzen schützen die Böden vor Erosion durch hydrologische (blau markiert) und mechanische (violett markiert) Prozesse, die die Bodenerosion und den Bodenverlust beeinflussen.

zione ecologica dei terreni degradati, che passa attraverso lo sviluppo di una copertura vegetale efficace per fermare l'erosione e bloccare i sedimenti in movimento. L'effetto delle specie vegetali sui processi erosivi e sedimentari può essere studiato grazie ad un approccio per elementi funzionali. Gli autori si sono qui impegnati nell'identificazione degli elementi funzionali che permettono di spiegare e prevedere le prestazioni ecologiche delle piante, evidenziando l'interesse di questi risultati al fine della restaurazione ecologica dei terreni erosi. Precisano che le conoscenze di questi elementi e l'identificazione delle specie vegetali in grado di assicurare l'arresto e la stabilizzazione del materiale in transito, devono contribuire ad ampliare le conoscenze in ambito dell'ingegneria naturalistica, permettendo di: 1/ guidare la scelta delle specie, 2/ valutare l'efficienza potenziale di una copertura vegetale spontanea per il controllo dell'erosione e della sedimentazione.

Parole chiave

Vegetazione, stabilizzazione del suolo, arresto dei sedimenti, rivitalizzazione ecologica, ingegneria bio-ambientale

1 Introduction

Le contrôle de l'érosion et la rétention de sédiments sont répertoriés parmi les 17 principaux services rendus par les écosystèmes contribuant au bien-être et au développement économique des sociétés humaines. Nombre de ces services écologiques se sont dégradés de manière significative au cours des soixante dernières années, en partie en raison des activités humaines. Ainsi, les taux d'érosion hydrique et les pertes de sol atteignent aujourd'hui des niveaux parfois élevés, ce qui peut avoir des conséquences sur la sécurité économique et physique des populations, à la fois dans les zones cultivées, dans les milieux naturels et dans les zones urbanisées (Pimentel et al., 1995; Boardman et Poesen [coord.], 2006).

Dans les Alpes du Sud françaises, le ravinement des terrains marneux conduit à la formation de paysages de badlands et est associé à des pertes de sol importantes (Cohen et al., 2013). Ces zones érodées font l'objet d'une gestion rigoureuse qui nécessite souvent le recours à des opérations de restauration écologique mettant en œuvre le rôle protecteur de la végétation (Rey et al., 2015a). Ainsi, des travaux faisant appel à l'ingénierie écologique (Chocat et al. [coord.], 2013) sont entrepris à l'échelle du bassin versant dans les Alpes-de-Haute-Provence (photo 1). Ils ont pour objectif de stabiliser les sols et de favoriser le développement d'une couverture végétale permettant de maîtriser durablement l'érosion et la sédimentation. Des ouvrages de génie végétal (Adam et al., 2008; Rey et al., 2015b; photo 1) sont installés dans le lit des ravines afin de piéger les matériaux en transit, stabiliser les sols et favoriser le développement de la végétation.

La couverture végétale est en effet déterminante afin de prévenir les risques liés à l'érosion hydrique (Thornes, 1990). Les effets de la végétation sur les processus érosifs sont importants et nombreux, les plantes modifiant les propriétés hydrologiques et mécaniques des sols (Stokes et al., 2008; figure 1). Les processus hydrologiques comprennent l'interception des précipitations par la canopée qui diminue la quantité et l'énergie des gouttes de pluie, l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol grâce aux racines et enfin l'évapotranspiration qui réduit l'humidité du sol et les risques d'apparition du ruissellement. Alors que les effets hydrologiques de la végétation sont relativement bien documentés, notre connaissance des effets mécaniques est plus limitée. Ces derniers consistent d'abord en un renforcement de la cohésion des sols par les racines des plantes permettant de réduire l'érodibilité des sols et les taux d'érosion; ces processus sont qualifiés de processus actifs. D'autre part, la végétation a également une action passive en piégeant les matériaux en transit et en favorisant la sédimentation à l'intérieur même du bassin versant. Cet effet protecteur de la végétation est

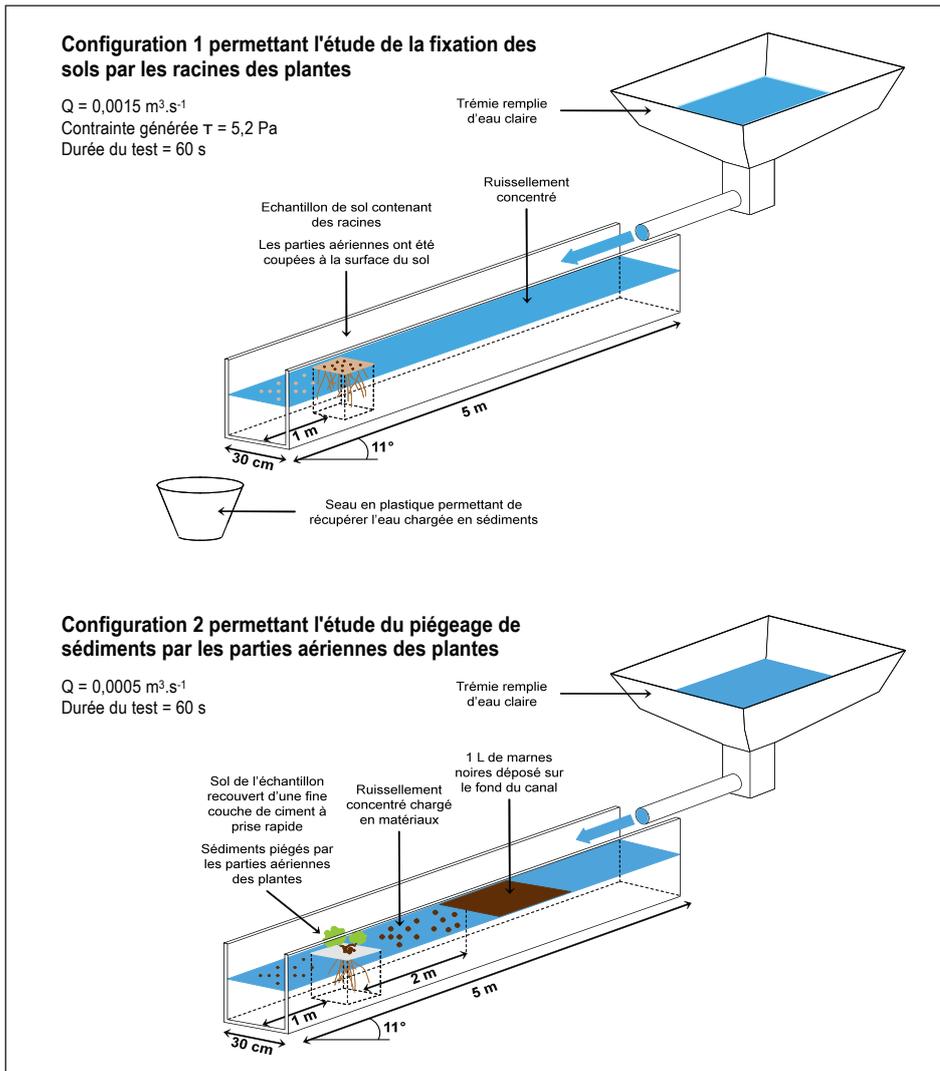


Figure 2: Schéma du dispositif expérimental. Un canal d'écoulement a été utilisé pour étudier le rôle des racines des plantes dans la fixation des sols face au ruissellement concentré (Configuration 1) et le rôle des parties aériennes des plantes dans le piégeage des sédiments en transit pendant les orages (Configuration 2).

Abbildung 2: Schema des Versuchsaufbaus. Ein Laborkanal wurde für das Erforschen der Rolle der Pflanzenwurzeln in der Bodenfixierung gegen Sammelströme (Konfiguration 1) und der Rolle der luftseitigen Teile in der Sedimentfixierung bei Strömungen während Gewittern (Konfiguration 2) eingesetzt.

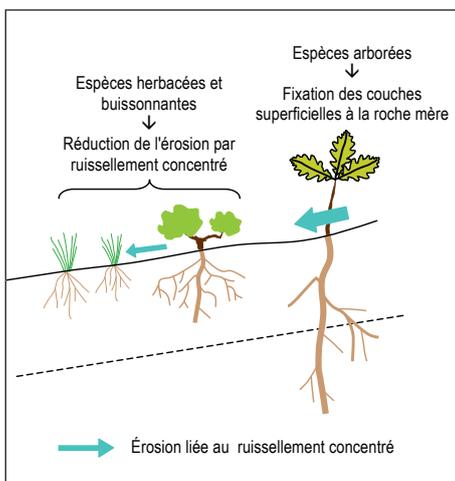


Figure 3: Efficacité relative des espèces, selon leur morphologie racinaire, pour la fixation des sols.

Abbildung 3: Relative Arteneffizienz für die Bodenfixierung, gemäss der Wurzelmorphologie.

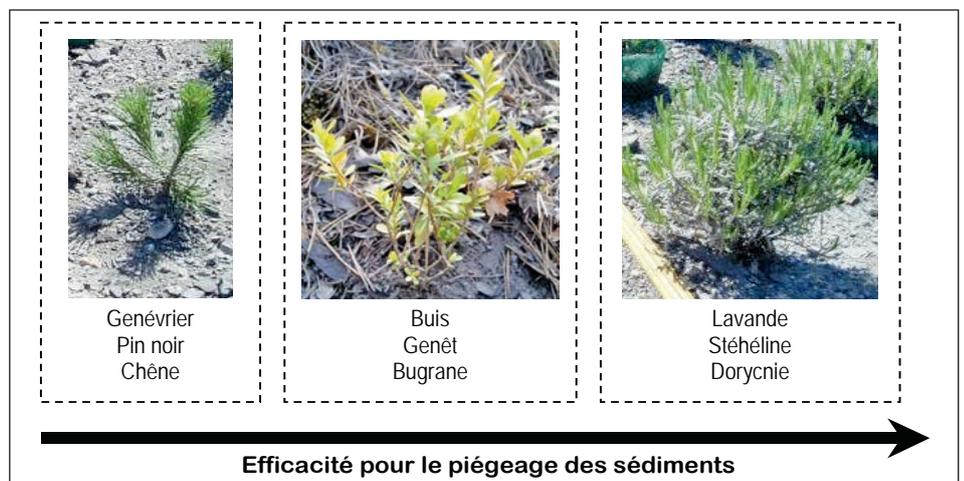


Figure 4: Efficacité relative des espèces pour le piégeage de sédiments.

Abbildung 4: Relative Arteneffizienz für die Sedimentfixierung.

généralement associé à l'importance de la couverture végétale sans tenir compte de la composition spécifique des communautés et des caractéristiques morphologiques (traits fonctionnels) des espèces qui la composent. Or, la communauté scientifique s'accorde aujourd'hui sur l'importance des traits fonctionnels des espèces dans le fonctionnement des écosystèmes et la provision de services écologiques. Cette approche fonctionnelle a été utilisée précédemment dans le contexte des terrains marneux érodés pour mieux connaître la réponse des plantes aux contraintes érosives (Burylo et Rey, 2009). Dans un contexte de restauration des milieux érodés et des services rendus par les écosystèmes, et en particulier sur les terrains marneux restaurés, identifier les traits fonctionnels influençant l'effet des plantes sur les processus érosifs est une question de recherche stimulante motivant de nombreuses études. L'une des principales questions est de savoir si la végétation, constituée de plantes à un stade juvénile qui se développent après les opérations de restauration, est capable de protéger efficacement les sols. Quelle est l'efficacité des espèces végétales en développement? Peut-on la prévoir?

Les travaux menés récemment par Burylo (2010) tentent d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Alors, les connaissances sur les traits et l'identification des espèces suscep-

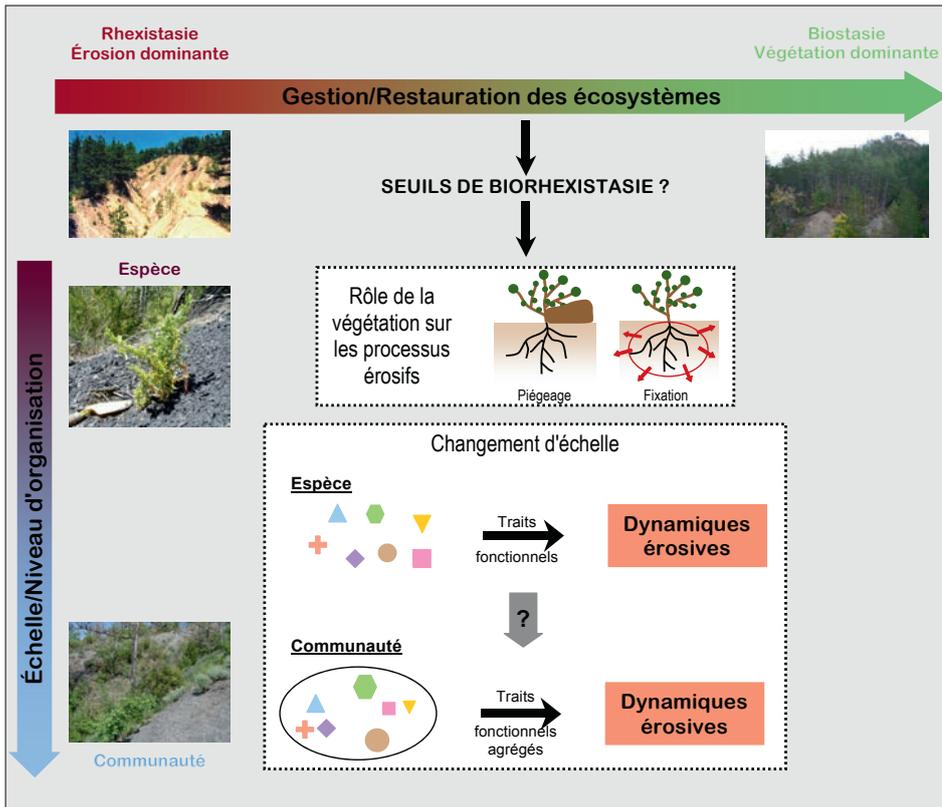


Figure 5 : Thématiques de recherche associées à la définition des seuils de biorhexistisie.
Abbildung 5: Forschungsthemen im Bezug zu der Definition von Kennwerten der Bodenentwicklung.

tibles d'être intéressantes pour assurer des fonctions efficaces de piégeage et de fixation de sédiments doivent contribuer à aider les compétences en ingénierie végétale et en génie végétal, en permettant de mieux : 1/ guider le choix des espèces à utiliser au sein des ouvrages de génie végétal ; 2/ évaluer l'efficacité potentielle d'une couverture végétale spontanée pour le contrôle de l'érosion et de la sédimentation.

2 Effet des espèces sur les processus érosifs

2.1 Objectifs de recherche et démarche expérimentale

Les travaux réalisés ont porté sur les fonctions de protection mécanique des plantes, à savoir le renforcement des sols par les systèmes racinaires et le piégeage des matériaux en transit par les parties aériennes. Une approche par les traits fonctionnels a été adoptée avec comme objectif de relier l'efficacité des espèces végétales dans les deux fonctions précédentes à leurs traits fonctionnels, et d'identifier un trait ou un ensemble de traits permettant d'évaluer et de prévoir

l'effet des espèces dans ces deux fonctions. La démarche expérimentale a donc consisté à coupler des mesures de la performance d'espèces à des mesures de traits fonctionnels. Un canal d'écoulement a été utilisé pour simuler un ruissellement concentré et étudier l'influence des espèces sur les processus érosifs. Ce canal a permis à la fois de simuler un écoulement exempt de matériaux pour l'étude de la fixation des sols par les racines et un écoulement chargé en matériaux pour l'étude du piégeage de sédiments en transit. Le dispositif expérimental est présenté de façon détaillée dans la figure 2.

2.2 Effet des traits fonctionnels sur le piégeage des sédiments

Les expérimentations ont porté sur quatre espèces ligneuses présentant des morphologies aériennes contrastées : deux espèces feuillues, le Buis (*Buxus sempervirens*) et la Lavande vraie (*Lavandula angustifolia*), et deux espèces de conifères, le Pin noir (*Pinus nigra*) et le Genévrier commun (*Juniperus communis*). Les deux conifères ont des aiguilles de tailles différentes, le Genévrier ayant des aiguilles

plus courtes (environ 1 cm) que le Pin noir (5–10 cm). Les deux espèces feuillues ont également des morphologies foliaires différentes, le Buis ayant des feuilles ovales et la Lavande des feuilles lancéolées. Vingt individus juvéniles de chaque espèce (issus de pépinière) ont été soumis à un ruissellement concentré chargé en sédiments (Tests en canal d'écoulement, configuration 2 – figure 2). Après chaque test, les sédiments déposés à l'amont des plantes ont été récoltés, séchés et pesés. Afin de comparer l'efficacité des espèces, le taux de piégeage relatif a été calculé en rapportant la masse de sédiments retenus au volume d'interception de la plante testée. Huit traits de la morphologie aérienne ont ensuite été mesurés en laboratoire.

Les quatre espèces testées ont toutes permis de retenir des sédiments mais avec des efficacités différentes (figure 4, Burylo, 2010). Les espèces feuillues (Lavande et Buis) ont montré les meilleurs taux de piégeage. Les quantités de sédiments piégés ont représenté jusqu'à 15% de la quantité totale de marnes charriées lors des tests. Une analyse en composantes principales a permis de mettre en évidence trois caractéristiques morphologiques des espèces influençant la quantité de sédiments retenus :

- la forme de la canopée, les individus ayant une forme allongée perpendiculairement à l'écoulement, et formant ainsi une barrière, étant plus efficaces ;
- la densité de la canopée définie en termes de biomasse ou de surface foliaire par unité de volume : plus l'écran formé par la végétation est dense et opaque plus il retient de sédiments ;
- la surface foliaire, les espèces ayant de larges feuilles retenant plus de sédiments que les autres.

2.3 Traits fonctionnels et stabilité des sols

Les expérimentations ont porté sur trois espèces herbacées et ligneuses : une espèce de graminée, la Bauche (*Achnatherum calamagrostis*), et deux espèces arborées, à savoir le Robinier faux acacia (*Robinia pseudo acacia*) et le Pin noir. Après germination en chambre de culture et multiplication végétative (éclats) pour la graminée, des individus juvéniles

les de ces trois espèces ont été plantés dans des pots remplis de marnes noires, à raison de 10 individus par pots. Les échantillons ont été placés 8 semaines en jardin expérimental afin d'obtenir une densité racinaire suffisante pour observer un effet significatif sur la cohésion du sol. Des tests en canal d'écoulement (Configuration 1 – figure 2) ont ensuite été réalisés sur 10 pots de chaque espèce ainsi que sur 10 pots témoin ne contenant pas de racines. Après chaque test, les sédiments récoltés ont été laissés à décanter, séchés et pesés. Afin de comparer la performance des espèces, des taux de détachement relatifs (RSD), correspondant au rapport entre la masse de sédiments détachés de l'échantillon testé sur la masse moyenne de sédiments détachés de l'échantillon témoin, ont été calculés. Neuf traits fonctionnels, décrivant la densité racinaire, la morphologie des racines et la proportion de racines fines ont ensuite été étudiés sur les échantillons testés. D'autre part, des tests de traction ont été réalisés parallèlement sur les racines des trois espèces testées. La résistance à la tension (MPa) a été calculée comme la force maximale au moment de la rupture des racines (N) par unité de surface (section moyenne de la racine testée en mm²).

Les résultats (Burylo, 2010) indiquent que les trois espèces permettent de réduire de façon importante les pertes de sol, et ce dès les premiers stades de leur développement, mais certaines espèces se sont révélées plus efficaces. Ainsi, le Robinier faux acacia a permis de réduire les taux d'érosion de plus de 95% par rapport aux échantillons témoins alors que pour le Pin noir, des réductions plus faibles ont été observées. Les trois espèces testées sont également différentes du point de vue de leur morphologie racinaire. Une analyse en composantes principales a permis de relier ces différences morphologiques aux taux d'érosion. Les résultats montrent que le taux d'érosion est positivement corrélé au diamètre des racines et négativement à la proportion de racines fines : plus il y a de racines fines dans l'échantillon (diamètre < 0,5 mm) et meilleur est le renforcement de la cohésion du sol.

Ces résultats confirment l'importance des racines fines et flexibles, dont la résistance à la tension est meilleure, dans l'augmentation de la résistance du sol à l'érosion (figure 3). Les systèmes racinaires des espèces herbacées et buissonnantes, présentant de nombreuses racines fines, permettent ainsi de réduire plus efficacement les taux d'érosion liés au ruissellement concentré. La présence de systèmes racinaires d'espèces arborées, poussant plus profondément, est cependant importante pour fixer les couches superficielles de sol à la roche mère.

2.4 De l'espèce à la communauté végétale : un nécessaire changement d'échelle

Les travaux présentés ici ont permis d'identifier, à l'échelle de l'espèce, les traits fonctionnels impliqués dans l'effet des espèces végétales sur les processus érosifs et sédimentaires. Cependant, les échelles de réflexion, en termes de fonctionnalité, de services écologiques rendus et de seuils d'efficacité de la végétation, et les échelles d'intervention sont celles de la communauté végétale ou de l'écosystème, et non celles de la population. Aussi, même si une étude à l'échelle de la plante est un pré-requis indispensable, un changement d'échelle reste nécessaire.

Les traits fonctionnels ont été utilisés dans nos expérimentations comme un outil permettant de décrire, expliquer et prévoir la performance des espèces dans l'écosystème mais ils sont également un outil intéressant pour faire le lien entre les différents niveaux d'organisation (figure 5). En particulier, les dernières avancées scientifiques indiquent que le fonctionnement des communautés et des écosystèmes peut être en grande partie déterminé par les traits fonctionnels des espèces qui les composent, agrégés à l'échelle de la communauté.

Ainsi, de nouvelles questions de recherche peuvent être formulées : par exemple, à partir de quelle(s) valeur(s) de trait(s) de la communauté végétale d'une ravine, cette dernière est-elle en situation de stabilisation ? L'utilisation des traits fonctionnels à l'échelle de la communauté végétale ou de l'écosystème

est aujourd'hui un sujet de recherche majeur et prometteur (Erktan, 2013).

3 Contribution au développement des compétences en ingénierie végétale et en génie végétal

Ces travaux de recherche relevant de l'écologie de la restauration ont notamment pour objectifs d'apporter des éléments de réponse théoriques et conceptuels pour faciliter les prises de décision des gestionnaires, de mieux définir les objectifs de restauration ou encore de prévoir les résultats des opérations de restauration. Les études présentées sont fortement ancrées dans une problématique de terrain qui est la restauration et la gestion des milieux marneux érodés de montagne. Les résultats obtenus, bien qu'ils présentent un certain nombre de limites avant de pouvoir être appliqués aux problématiques de terrain, ont donc nécessairement une portée opérationnelle et contribuent au développement des compétences en ingénierie végétale et en génie végétal.

3.1 Guider le choix des espèces à utiliser au sein des ouvrages de génie végétal

Les connaissances sur les traits fonctionnels et l'identification des espèces susceptibles d'être intéressantes pour assurer des fonctions efficaces de piégeage et de fixation de sédiments permettent de mieux guider le choix des espèces à utiliser au sein des ouvrages de génie végétal sur terrains marneux dans les Alpes du sud françaises.

Ainsi, comme indiqué dans le chapitre précédent, parmi les espèces étudiées, celles feuillues en général et plus particulièrement la Lavande et le Buis ont montré les meilleurs taux de piégeage de sédiments. Plus globalement, pour piéger les sédiments, mieux vaut mettre à contribution des végétaux ayant une forme allongée perpendiculairement à l'écoulement, une canopée dense et opaque, enfin de larges feuilles. En réalisant une recherche bibliographique sur la morphologie des espèces se développant spontanément sur les terrains concernés par l'étude et présentant de telles caractéristiques, on trouve que la

Bauche, l'Aphyllanthe de Montpellier (*Aphyllantes monspeliensis*), la Bugrane (*Ononis fruticosa*) et l'Argousier (*Hippophae rhamnoides*) présentent de telles caractéristiques.

Les résultats des recherches ont également montré que parmi les trois espèces étudiées pour leur capacité à fixer les sédiments, le Robinier faux acacia était celui le plus à même de stabiliser les sols dès les premiers stades de son développement. Mais son caractère invasif rend aujourd'hui réhilitaire une nouvelle utilisation pour végétaliser les terrains érodés. Pour choisir d'autres espèces, on peut se référer aux résultats de nos études qui, comme indiqué précédemment, ont montré que plus il y a de racines fines et flexibles chez l'espèce utilisée (diamètre <0,5 mm), plus la cohésion du sol s'en trouve renforcée. Ainsi, la présence d'espèces herbacées et buissonnantes, qui présentent de nombreuses racines fines, se révèle plus efficace pour diminuer les taux d'érosion liés au ruissellement concentré. Dès lors, le Buis, le Genévrier, la Bugrane, la Lavande et l'Argousier peuvent prétendre à jouer un rôle efficace.

Au final, on note que la Bugrane, le Buis et l'Argousier représentent potentiellement les meilleurs candidats pour assurer une fonction à la fois de piégeage et de fixation des sédiments. Si leur utilisation sous forme de boutures n'est pas des plus aisées (Rey et Della Torre, 2005), elles peuvent être sérieusement envisagées en plantation de versant lorsque celle-ci est préconisée en complément des ouvrages installés dans les lits.

3.2 Evaluer l'efficacité potentielle d'une couverture végétale spontanée pour le contrôle de l'érosion et de la sédimentation

Les connaissances nouvelles permettent de mieux évaluer l'efficacité potentielle d'une couverture végétale spontanée pour le contrôle de l'érosion et de la sédimentation. En effet, un objectif fort est de pouvoir préciser les seuils de biorhexistatie afin d'affiner le diagnostic de la vulnérabilité des milieux face à l'érosion et d'améliorer la sélection des zones d'intervention pour la restaura-

tion écologique. La notion de biorhexistatie décrit la balance entre un état où l'érosion est dominante et empêche la végétation de s'installer et de se développer de façon durable, la rhexistatie, et un état opposé où la végétation domine les dynamiques érosives, la biostatie. Gérer les milieux dégradés et établir un diagnostic de leur vulnérabilité face aux contraintes érosives nécessite de savoir où l'on se situe entre ces deux extrêmes. Ceci passe par une connaissance pointue de la dynamique des communautés végétales et des interactions entre végétation et processus érosifs (figure 5). Les recherches menées à Irstea, Centre de Grenoble, au cours des dix dernières années, se sont penchées sur la définition de ces seuils de biorhexistatie pour les milieux marneux érodés des Alpes du Sud (Rey, 2002). Ainsi, ces seuils sont définis notamment par la couverture végétale et sa répartition spatiale dans les ravines et sont actuellement utilisés pour sélectionner les ravines à restaurer à l'aide du génie végétal. Les résultats présentés ici ont montré que certaines espèces sont beaucoup plus efficaces que d'autres dans la protection des sols contre l'érosion et ainsi que la composition spécifique des communautés végétales pouvait également avoir une influence non négligeable sur les taux d'érosion et les pertes de sol. Les recherches menées sont ainsi encourageantes et prouvent qu'il est sans doute encore possible de préciser ces seuils de biorhexistatie.

4 Conclusion

L'utilisation des traits fonctionnels à des fins de gestion et de restauration des milieux et des services écosystémiques est une approche relativement nouvelle qui offre de nombreuses perspectives de recherche et d'application. Les résultats des travaux menés récemment suggèrent en effet que les traits fonctionnels peuvent être des outils prometteurs pour décrire, expliquer et prévoir les fonctions des espèces et des communautés végétales qu'elles forment. Il est donc important de poursuivre les recherches sur l'identification des traits fonctionnels impliqués dans l'effet des espèces végétales sur les processus érosifs afin de mieux diagnostiquer la vulnérabilité des

milieux et de pouvoir prévoir l'efficacité des opérations de restauration. Plus globalement, les données quantifiées sur le piégeage de sédiments par la végétation et les ouvrages de génie végétal devraient permettre de mieux choisir et dimensionner les ouvrages de génie végétal, en se basant notamment sur le calcul de rapports coûts-bénéfices.

5 Bibliographie

Adam, P., Debais, N., Gerber, F., Lachat, B. 2008. Le génie végétal: un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. La documentation française, 290 p.

Boardman, J., Poesen, J. (Coord.). 2006. Soil erosion in Europe. Wiley, 850 p.

Burylo, M. 2010. Relations entre les traits fonctionnels des espèces végétales et leurs fonctions de protection contre l'érosion dans les milieux marneux restaurés de montagne. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Irstea, centre de Grenoble.

Burylo, M., Rey, F. 2009. Connaître la réponse des plantes aux contraintes érosives: intérêt pour la restauration écologique des terrains érodés. Ingénieries EAT, n° spécial «Écologie de la restauration et ingénierie écologique: enjeux, convergences, applications»: 111-120.

Cohen, M., Rey, F., Ubeda, X., Vila-Subiros, J. 2013. Paysages et érosion dans les montagnes méditerranéennes. Une comparaison entre France, Espagne et Italie. In Y. Luginbül et D. Terrason (Eds.), Paysage et développement durable. Quae, Paris, pp. 49-59.

Erktan, A. 2013. Interactions entre composition fonctionnelle de communautés végétales et formation des sols dans des lits de ravines en cours de restauration écologique. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Irstea, centre de Grenoble.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science 267, 1117-1123.

Rey, F. 2002. Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du Sud. Thèse de doctorat, Université Grenoble I, Irstea, centre de Grenoble.

Rey, F., Della Torre, S. 2005. Cuttings regeneration of various species on eroded marly catchments under a mountainous and Mediterranean climate (Southern Alps, France). Geophysical Research Abstracts, vol. 7, CD-ROM. 1 p.

Rey, F., Labonne, S., Breton, V., Louis, S., Talaska, N., Erktan, A., Dumas, A., Burylo, M., Dangla, L., Lavandier, G. 2015a. Utilisation innovante du génie végétal pour le contrôle de l'érosion et de la sédimentation à l'échelle du territoire de la Durance. Sciences, eaux et territoires, n° spécial «L'ingénierie écologique au service de l'aménagement du territoire», pp. 28–35.

Rey, F., Crosaz, Y., De Matos, M., Cassoiti, F. 2015. Génie végétal, génie biologique et génie écologique: concepts d'hier et d'aujourd'hui. Sciences, eaux et territoires, n° spécial «L'ingénierie écologique au service de l'aménagement du territoire», pp. 4–9.

Stokes, A., Norris, J.E., van Beek, L.P.H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S.B., Jenner, A., Di Iorio, A., Fourcaud, T. 2008. How vegetation reinforces soil on slopes. In Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B.C., Achim, A.: Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions, Springer, Dordrecht, 65–118.

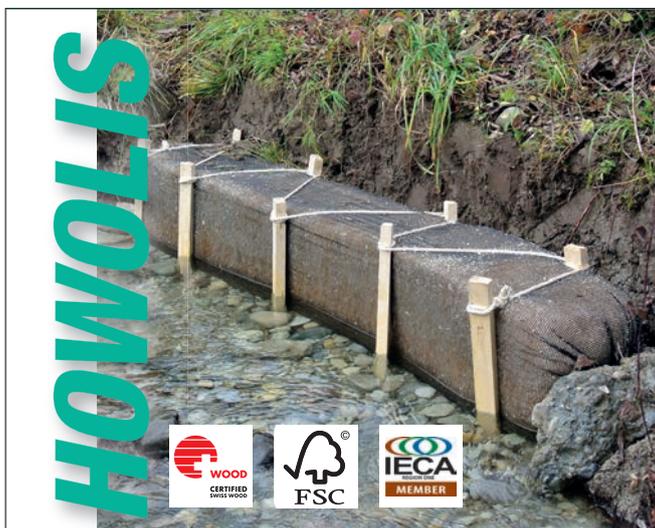
Thornes, J.B. (Coord.). 1990. Vegetation and erosion. Processes and environments. Wiley, 518 p.

Adresse de l'auteur:

Freddy Rey

Irstea, UR Écosystèmes montagnards EMGR, 2, rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
Fax: +33 4 76 51 38 03

freddy.rey@irstea.fr



HOWOLIS



Q - Faschinen

Renaturieren mit Schweizer Holz.

Q - Fascines

Renaturer avec du bois suisse.

produziert von | produit par:



Lindner Suisse GmbH | Bleikenstrasse 98 | CH-9630 Wattwil
Phone +41 (0) 71 987 61 51 | Fax +41 (0) 71 987 61 59
holzwohle@lindner.ch | www.lindner.ch



UFA ^{50 Jahre} **PROFI GRÜN**
SAMEN | SEMENCES ESPACES VERTS

UFA-Samen für eine erfolgreiche Begrünung

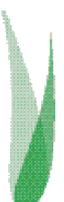
- Qualitäts-Saatgutmischungen
- Erosionsschutz
- Organische Bodenverbesserer
- Spezialdünger
- Beratung

Erhältlich in Ihrer LANDI
fenaco | UFA-Samen PROFI GRÜN
8401 Winterthur | Telefon 058 433 76 76 | www.ufasamen.ch



Auf die Wurzeln kommt es an...

Samen und Pflanzen für die Hangsicherung
zusammengestellt nach Wurzelprofilen und
Erosionsschutzwirkung.
Objektbesichtigung kostenlos
Lieferung ganze Schweiz und EU

schutzfilisur 
100 Jahre Samen Pflanzen AG

Schutz Filisur, Samen u. Pflanzen AG, CH-7477 Filisur
Tel. 081 410 40 00, Fax. 081 410 40 77
samenpflanzen@schutzfilisur.ch

Renewing dangerous highway slopes in Portugal

Carlo Bifulco, Anabela Marcos Pereira, Vera Calado Ferreira, Ana Pinto Mota, Lara Rodrigues Martins and Francisco Castro Rego

Abstract

Malveira junction of A21 highway was constructed in 2008. Estradas de Portugal, now Infraestructuras de Portugal, assumed A21 management in 2011, and had to face the problem of a slope 40 m high and 250 m wide, showing broad deep gully erosions, two large landslides, imminent risk of falling rocks on the road, and without vegetation.

To solve this dangerous situation, a slope stabilization and landscape integration project was designed in 2013 and implemented in 2014. The soil bioengineering techniques were accompanied by a slope reshaping, the bare surface of the new configuration having no humus available. The used plant species and mode of revegetation were chosen based on tests carried out on mainland Portugal flora. Due to administrative constraints, soil bioengineering works were carried out in May, June, and July, the most unsuitable period for this kind of work.

Seeds sown in straw mulch and mat, which were never irrigated, were able to produce seedlings in July, and gave rise to a dense herbaceous cover after autumn rains. Cuttings installed in gabions and wooden weirs, irrigated with drip watering until September, rooted with a great success. Hedge brush layers, also irrigated until September, created dense shrub vegetation barriers. Other techniques had functional results but less satisfying.

The old, eroded and instable slope is now renewed. The new management company of highway, using soil bioengineering, has achieved for the junction a new, green, safe and functional slope and landscape.

Keywords

Renewing landscapes, sliding slopes, soil bioengineering

Erneuerung gefährlicher Autobahn-Hänge in Portugal

Zusammenfassung

Ein Hangsicherungs- und Landschaftsintegrationsprojekt wurde im Jahr 2014 bei der Malveira-Kreuzung der A21-Autobahn in Portugal umgesetzt. Zwei Erdbeben und tiefe, durch Erosion entstandene Furchen kennzeichneten den Hang, der 40 m hoch und 250 m lang, in drei Teile unterteilt und vegetationslos war.

Nachdem die Geometrie des Hanges mithilfe von Erde ohne Humus, die aus den Ausgrabungen gewonnen wurde, neu konfiguriert worden war, wurden verschiedene ingenieurbioologische Techniken implementiert. Die angewandten Techniken und die im Projekt verwendeten Pflanzenarten wurden aufgrund von Tests ausgewählt, die von der Flora des portugiesischen Festlandes durchgeführt wurden. Die ingenieurbioologischen Bodenarbeiten fanden im Mai, Juni und Juli statt, die ungünstigste Zeit für diese Art von Arbeiten.

Die Aussaat wurde mit Strohmulch gedeckt und nicht bewässert, sodass die ersten Setzlinge bereits im Juli entstehen konnten. Die Stecklinge, welche in Gabionen und Holzsperrern gesetzt und bis September tropfenweise bewässert wurden, konnten im Herbst gut Wurzeln schlagen. Auch bei der Treppenanlage, die von Juli bis September bewässert wurde, konnte eine dichte Strauchvegetation entstehen.

Der alte, erodierte und instabile Hang mit akuter Steinschlaggefahr wurde durch einen neuen ersetzt. Durch den Bau der Autobahnkreuzung im Jahr 2008 entstand eine ungleichförmige Landschaft, die die neuen Autobahn-Manager in eine neue, grüne und funktionelle Landschaft verwandelt haben.

Keywords

Erneuerung der Landschaft, Rutschhänge, Ingenieurbioologie

Renouvellement de talus autoroutiers dangereux au Portugal

Résumé

L'échangeur de Malveira, de l'autoroute A21 a été construit en 2008. Estradas de Portugal, devenu depuis Infraestructuras de Portugal, a été chargé de l'aménagement de l'A21 en 2011, ayant à faire face avec un talus routier de 250 m de base et 40 m de hauteur, caractérisé par de profonds ravinelements et deux grands glissements de terrain, avec des rochers en surplomb de la route, et sans aucune végétation.

Pour résoudre cette situation dangereuse pour la circulation, il a été préparé en 2013 et réalisé en 2014 un projet de stabilisation et intégration paysagère du versant. L'implémentation des techniques de génie végétale a été accompagnée par la reconfiguration de la géométrie du talus, et donc sur un sol dépourvu de matière organique. Les espèces végétales ont été choisies sur la base de tests effectués sur la flore du Portugal continental. Diverses contraintes administratives nous ont conduit à réaliser les travaux de génie végétale en mai, juin et juillet, la période moins adaptée pour ce type de projet.

La végétalisation s'est basée sur plusieurs techniques. Le semis d'herbacées sur paillis de paille, non irrigué, a produit les premières plantules dès juillet. Des boutures de saules et tamaris placés dans des gabions et à la base de barrages en bois et pierres, irriguées avec un système goutte à goutte jusqu'en septembre, se sont enracinées avec succès. Les lits de plants et plançons, irrigués à partir de fin juillet à septembre, ont créé des haies denses. Les autres techniques ont donné des résultats variables et globalement moins probants.

Auparavant les talus étaient érodés et instables, et des rochers situés en surplomb de la route représentaient des risques importants pour la circulation

routière. Depuis les travaux les gestionnaires considèrent que le site offre des conditions satisfaisantes aussi bien au niveau paysager qu'en termes de sécurité.

Mots-clés

Aménagement paysager, talus instables, génie végétal

Rinnovo delle scarpate autostradali pericolose in portogallo

Riassunto

Lo svincolo di Malveira dell'autostrada A21 é stato costruito nel 2008. Estradas de Portugal, ora Infraestruturas de Portugal, ha ricevuto l'incarico per la gestione dell'A21 nel 2011, e ha dovuto affrontare la situazione di una scarpata alta 40 m e larga piú di 250 m, caratterizzata da profondi solchi, da due grandi frane e da una parete in roccia a strapiombo sulla carreggiata e dall'assenza di vegetazione. Per risolvere questa situazione pericolosa per la circolazione, nel 2013 é stato elaborato un progetto di stabilizzazione e integrazione paesaggistica dei pendii del versante, realizzato poi nel 2014. I lavori di ingegneria naturalistica sono stati accompagnati dalla riconfigurazione della geometria delle scarpate, e quindi su una superficie privo di materiale organico. Le specie

vegetali utilizzate sono state scelte in base ai test realizzati sulla flora del Portogallo continentale. In seguito a questioni amministrative, i lavori di ingegneria naturalistica sono stati eseguiti in maggio, giugno e luglio, nel periodo meno adatto per questo tipo di progetti. La vegetazione è stata basata su diverse tecniche. Le semine effettuate con coltre protettiva di paglia, non irrigate, hanno prodotto già in luglio le prime piantine. Le talee di salice e tamerici inserite nei gabbioni e alla base delle briglie in legname e pietrame, irrigate con un sistema goccia a goccia fino a settembre, hanno radicato con successo. Le gradonate, anche queste irrigate da fine luglio a settembre, hanno creato siepi dense. Le altre tecniche implementate hanno presentato risultati funzionali, ma meno entusiasmanti. Prima le scarpate erano erose e instabili, e le rocce situate a strapiombo sulla strada rappresentavano dei rischi importante per la circolazione stradale. I gestori reputano che il posto ora, dopo i lavori, offra delle condizioni soddisfacenti sia a livello paesaggistico che di sicurezza.

Parole chiave

Sistemazione del paesaggio, pendii instabili, ingegneria naturalistica

1 Introduction

The A21 highway in Portugal was funded, and built between 2005 and 2008 by a local public company (Mafratlântico – Municipality of Mafra). The highway is 21 km long and links Lisbon to the Atlantic coast of Extremadura. In 2011 the A21 highway management and administration were transferred to Estradas de Portugal. Slopes of Malveira junction were in a bad condition because the erosion due to rain and groundwater circulation caused: broad deep gullies, the deposit of fine clay on road surface, large landslides on the slopes, and detachment of rock blocks (fig. 1, 2). To solve the dangerous situation, Estradas de Portugal S.A. (EP), now Infraestruturas de Portugal S.A. (IP), involved Centro de Ecologia Aplicada Prof. Baeta Neves (CEABN) of University of Lisbon in the Malveira slope stabilization project, to associate and integrate geotechnics and soil bioengineering practices, and to experiment technologies which are more ecological and economic than concrete structures.

2 Site Characteristics

The region presents the thermomediterranean climate of the Luso-Andalusian coast (Rivas-Martinez et al., 2004). In the Tapada Nacional de Mafra forest, 5.5 km from Malveira junction, the average annual rainfall varies between 850 and 950 mm, and the driest months are



Figure 1: Gully erosions over the entire slope and sliding down ripraps, 2013.
Abbildung 1: Erosionsrinnen entlang des gesamten Hanges und abrutschende Blöcke, 2013.



Figure 2: Deposit of fine clay on road surface from silted surface drainage system, 2013.
Abbildung 2: Ablagerung von feinem Ton auf der Strassenoberfläche aus einem verschlammten Entwässerungssystem, 2013.

June, July and August, with only about 3% of annual precipitation. The annual temperature average varies between 13 and 15 °C and the relative humidity varies between 75 and 80% (Catry *et al.*, 2007). The soil is a Cretaceous Inferior sedimentary soil of marine origin, locally represented by interstratified layers of arenites, with rocky or sub-rocky characteristic, coexisting with frequent interbedded sandy-loamy clays.

Because of the variation of the granulometric composition of Cretaceous formation, its hydrological behavior is differentiated: in the case of softer formations the porosity allows permeability, whereas with the heavier layers permeability is often associated with percolation of water through the discontinuities.

Because of the lithological changes, suspended water levels are often present. The intercalation of arenite layers with clay, much less permeable, when intercepted with excavations results in the occurrence of water springing up from the slopes.

The steep slope, with a 45% gradient, was without plant cover, and it was possible to identify an old water runoff, crossing the road direction.

The various geomechanical characteristics and permeability of soil associated with the different layers and geometry of the slope, favored the occurrence of differential erosion phenomena. Random surface runoff lines and deep gully erosions were present over the entire slope. The surface drainage system was silted

or disrupted and collapsed. Mobilization of considerable volumes of material followed episodes of intense rainfall. Rotational landslides were in the upper slope, corresponding to earthy and sub-rocky formations. Probability of new landslides was strongly evident when sub-rocky arenites were without basis.

3 Materials and Methods

The project combined usual geotechnical solutions, such as superficial drainage with riprap and slope reshaping, with soil bioengineering methods (Schiechl, 1973), to achieve a new slope configuration covered by new vegetation, to avoid rocks falling on the road and future erosion. The implementation of soil bioengineering techniques, some of which had not yet tested in Portugal, was innovative to the project and occurred on a new geometric slope configuration with a bare soil without available humus. Different techniques were planned and implemented in order to: (i) protect slopes from superficial erosion, (ii) stabilize slopes, (iii) consolidate slopes, and (iv) protect temporary water runoffs from erosion.

In the following table 1 are summarized some characteristics of performed techniques of soil bioengineering.

Plants, cuttings and herbaceous species defined in the project plan were chosen based on tests conducted by CEABN on plants of mainland Portugal flora (Bifulco and Rego, 2013).

The used seed mixture included gramineous species, 40% of total weight (*Bromus catharticus* Vahl; *Festuca arundinacea* Schreb.; *Cynodon dactylon* (L.) Pers.; *Lolium multiflorum* Lam.; *Lolium perenne* L.), and leguminous species, 60% of total weight (*Medicago polymorpha* L.; *M. truncatula* Gaertn.; *M. rugosa* Desr.; *Trifolium incarnatum* L.; *T. michelianum* Savi; *T. subterraneum* L.; *Lupinus angustifolius* L.; *Onobrychys viciifolia* Scop.; *Vicia villosa* Roth; *V. sativa* L.). We used cuttings, with a diameter greater than 5 cm of *Salix atrocinerea* Brot., *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Tamarix spp.*, and with a diameter less than 2 cm of *Dittrichia viscosa* (L.) Greuter. We installed with buried stems shrub plants with root-ball of *Coronilla glauca* L., *Viburnum tinus* L., *Rosmarinus officinalis* L., *Tamarix spp.*, *Teucrium fruticans* L., *Crataegus monogyna* Jacq., and *Phillyrea angustifolia* L.

The Standardized Precipitation Index accumulated over a three months period (SPI3) (McKee *et al.*, 1993) of the Western Rivers Basin (IPMA, 2015), the basin that includes the project area, was used to describe precipitation occurrences in the working and monitoring period. Positive SPI values indicate a wetter than typical period, i.e. accumulated precipitation greater than the median, while negative SPI values indicate a dryer period with less precipitation than normal (McKee *et al.*, 1993; Guttman, 1999). A value of zero corresponds to the median accumulated precipitation. The magnitude of



Figure 3: Panoramic view on the project right side, November 2014, and on left side, January 2015.
Abbildung 3: Panoramaansicht des Projekts, rechts im November 2014 und links, im Januar 2015.

SB techniques	Slope angle	Problem to solve	Plant used
Sowings with Straw Mat	35°	to protect slope surface, with no vegetation cover, from superficial erosion	gramineous and leguminous annual species
Hydroseedings	35°	to protect slope surface, with no vegetation cover, from superficial erosion	gramineous and leguminous annual species
Hydroseedings on Geogrid	35° and 45°	to protect slope surface, with no vegetation cover, on the interface between arenites and clay	gramineous and leguminous annual species
Hedge Brush Layers	45°	to stabilize slope, with no vegetation, on clay slope of 45°	cuttings of <i>Dittrichia</i> and shrub plants with root-ball installed sub-horizontally with buried stems
Shrub Planting (associate to Sowings with Straw Mulch)	<25°	to protect slope surface, with no vegetation, from superficial erosion	shrub plants with root-ball, gramineous and leguminous annual species
Vegetated Gabions	35° and 45°	to consolidate the slope and to protect water runoff from intense erosion flows, to anchor gabions and to disguise the white structure	cutting of <i>Salix</i> and <i>Tamarix</i>
Vegetated Wooden Weirs	<35°	to consolidate the slope and to protect water runoff from intense flows	cutting of <i>Salix</i> and <i>Tamarix</i>
Living Combs	<25°	to protect slope from intense water flows erosion	cutting of <i>Salix</i> <i>Alnus</i> and <i>Tamarix</i>
Vegetated Gabions Mats	<25°	to protect water runoff from intense flows	cutting of <i>Salix</i> <i>Alnus</i> and <i>Tamarix</i>

Tab. 1: SB techniques used in the Malveira junction project.
Tabelle 1: Ingenieurbiologische Techniken für Bodenarbeiten, die für das Projekt der Malveira-spange angewendet wurden.

the departure from zero is a probabilistic measure of the severity of a wet or dry event that can be used for drought and flood risk assessment. If SPI reaches a value of -1 or less a drought is said to have occurred. SPI3 is related to short/medium-term conditions of precipitation (Guttman, 1999; Zargar *et al.*, 2011).

4 Results

The project, prepared in 2013 by a joint team EP-CEABN, was carried out in 2014 by a private company. EP and CEABN worked together on the project management during its execution; afterwards CEABN was in charge of its monitoring. During the project execution, the site was visited several times by Italian graduates from Architecture Department of Palermo University, participating in an international master about soil bioengineering, developed in collaboration with CEABN and the Portuguese and Sicilian associations of soil bioengineering. The project, developed in an area with Mediterranean climate, and implementing techniques never used in Portugal, was also an occasion to improve skills on theoretical subjects and field experiences on soil bioengineering of Portuguese and

Sicilian technicians. After the November 2014 the slope, before without vegetation, four months after the project conclusion revealed its new green aspect (fig. 3) and the it was possible to appreciate ecological benefits of soil bioengineering with the presence of wild rabbits, grass snakes, and woodpigeons observed in the summer 2015.

Project implementation was planned to start in September 2013 in order to have a better period for the soil bioengineering constraints. However the effective start was in February 2014, due to administrative matters, whereby the project work plan had to be redefined considering this delay. The slope reshaping works lasted from February until May and the soil bioengineering techniques had to be implemented from May to July, in the most unsuitable period of the year for this kind of work. Previous experience in soil bioengineering projects implemented in June in the Vesuvius national, Italy, helped the plan redefinition (Bifulco, 2001). Final project cost was the 30% of a reclamation project using only usual techniques, as estimated as first hypothesis. This amount includes civil engineering, geotechnical engineering and soil bio-

engineering. Soil bioengineering project cost was the 40% of the total final project cost.

4.1 Weather conditions along the project

In figure 4 is presented the SPI3 of the Western Rivers Basin, along the period February 2014 – June 2015. From that diagram we can deduce that the period from September to November 2014 was very rainy and precipitations from February to June 2015 were weak, and showed a drought period in the climatic conditions of the Western Rivers Basin area. We can also appreciate the difference between rains of 2014 spring and 2015 spring.

4.2 Redefining work plan

Sowings with straw mat, and vegetated gabion mats, were made between June and July, and were never irrigated. Sowings with straw mulch, hydroseedings and hydroseedings on geogrids were postponed to the fall and were implemented in October and repeated in December 2014. Cuttings were installed between May and July. It was decided to irrigate the cuttings with drip watering,

Tab.2 SB techniques success and grievances in the Malveira junction project

SB techniques	Success	Reason of dissatisfaction
Sowings with Straw Mat	☺☺	local concentrated erosion by torrential rains before plant growth
Hydroseedings	☺☹	erosion of surface to process between slope reshaping and hydroseeding due to project delay; scattered cover of only gramineous
Hydroseedings on Geogrid	☺☹	erosion of surface to process between slope reshaping and hydroseeding due to project delay; scattered cover of only gramineous
Hedge Brush Layers	☺☺	
Shrub Planting (associate to Sowings with Straw Mulch)	☺☺	
Vegetated Gabions	☺☺☹	most cuttings installed on the external side of gabions in late July dried out (cuttings installed within the gabions rooted with a great success)
Vegetated Wooden Weirs	☺☺	
Living Combs	☹	most cuttings installed in late July dried out
Vegetated Gabions Mats	☺☹	some cuttings installed in late July dried out

Tab. 2: SB techniques success and grievances in the Malveira junction project.
Tabelle 2: Erfolgs- und Misserfolgsbewertung ingenieurbiologischer Techniken für Bodenarbeiten des Projekts der Malveira-spange.

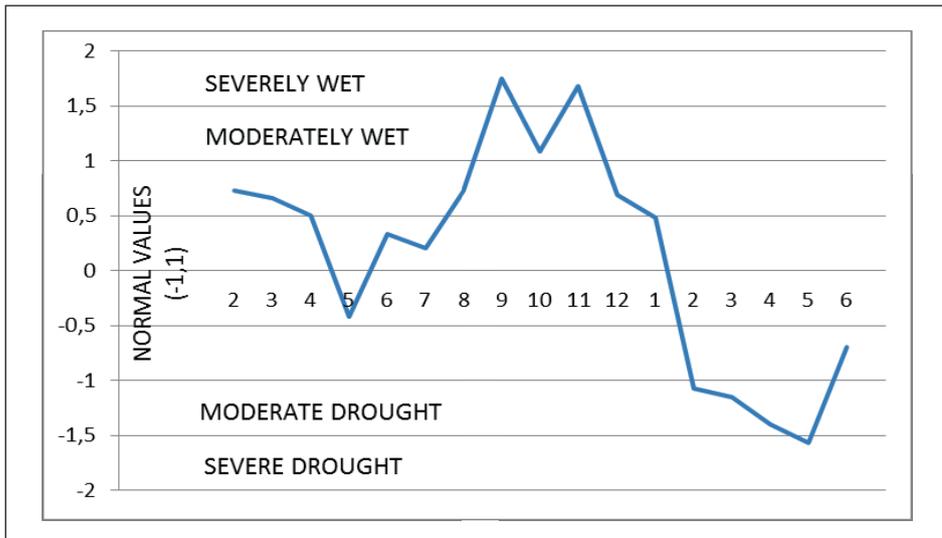


Figure 4: 3 months STANDARD PRECIPITATION INDEX (SPI3) of Western Rivers Basin, from February 2014 to June 2015 (elaborated on data from IPMA, 2015).

Abbildung 4: Entwicklung des «3-Month Standard Precipitation Index (SPI3)» des «Western Rivers Basin», von Februar 2014 bis Juni 2015 (erstellt mit Daten des IPMA, 2015).

until September, to avoid drying out. Also the hedge brush layers, implemented in July (fig. 5), had drip watering until September. Within this layer we used cuttings of *Dittrichia viscosa* (L.) Greuter, and small shrub plants with root-ball, installed with buried stems. Hydroseeding, implemented in December 2014, was the last soil bioengineering work performed. Installing sowings and cuttings during the months that have lowest rain average, and the conditions created by the severe rains in September and November had a impact on the soil bioengineering implementations, different for each type of technique applied.

4.3 First year evolution of implemented work

In the table 2 are summarized success and reasons of less satisfaction about performed techniques which will be analyzed with more details in the following paragraphs.

4.3.1 Sowings with straw mat

Sowing with straw mats, despite the delay, was able to produce seedlings in July. Watered by fall rains, sowing with straw mats produced a dense herbaceous cover on the most part of the slope, reaching its best green aspect in the period between November 2014 and May 2015 (fig. 6). Plant cover was

not homogeneous because of: (i) different time of implementation, (ii) different conditions of soil moisture, (iii) late initial development of plants that did not reach seed production, and (iv), in a limited area, the erosion of the superficial ground even under the mat, by the exceptional rains of September. These problems produced scattered colonization of prevalent gramineous species on 40% of the processed surface area. The other 60% were areas covered by very dense vegetation composed both by leguminous and gramineous species.

4.3.2 Hydroseedings and Hydroseedings on Geogrid

In the period between the slope reshaping (April and May) and hydroseeding (December), autumn rains eroded the slope surface without protection. The first hydroseeding, in October 2014, was not successful as subsequent rains carried away support fibers and seeds. The second hydroseeding, performed in December 2014, produced from March a significant herbaceous cover (fig. 6), composed only by gramineous species, even if the seed mixture was composed by 60% of leguminous species. We speculate that used fibers and adhesive compound both were not able to keep on the slope leguminous seeds.

4.3.3 Hedge brush layers

Cuttings of *Dittrichia viscosa* (L.) Greuter and shrub plants with a root-ball, installed with their stems buried, were



Figure 5: Hedge brush layers implementation in July 2014, and a detail, in March 2015, showing difference with the unprocessed slope on its end.

Abbildung 5: Einbau von Reihen von Buschhecken im Juli 2014 und rechts, Detailansicht des Unterschieds zum unbearbeiteten Hangbereich im März 2015.



Figure 6: On the left sowings with straw mat, April 2015. On the right herbaceous cover on the slope steps processed with hydroseeding, May 2015; in the right picture slope surfaces not green are rocky arenites, intentionally not processed with hydroseeding.
 Abbildung 6: Links, Saaten mit Strohmatte, April 2015. Rechts, krautartige Bedeckung der Hangabschnitte, die mit Hydrosaaten behandelt wurden, Mai 2015; die Hangflächen, die auf dem rechten Bild nicht grün sind, sind Sandsteinfelsen, die absichtlich nicht behandelt wurden.

planted in the hedge brush layers, and created dense shrub vegetation barriers. Hydroseeding was also performed between the hedge brush layers. Seeds that did not remain pasted to the soil got trapped in the hedge brush layers and contributed in this way to create denser green barriers (fig. 5). The application of this technique has been very satisfactory. The installation, made in July, in a soil devoid of humus, has proven its effectiveness and its capacity to recycle the seeds of hydroseedings between the layers, which did not stick to the ground. This is one of the best results of the project.

4.3.4 Shrub Planting (associate to sowings with straw mulch)

In the upper areas over the slope, that have less gradient, reconstitution of the vegetation cover by planting shrubs and sowing with straw mulch has been successful (fig. 7). Dense grasses and shrubs, grazed by wild rabbits, are now framing the slope. Looking at the status of grass we speculate that "pruning" done by rabbits stimulate the production of more roots and sprouts; the rabbit excrements contribute also to the improvement of the soil with additional quantities of organic matter. This is one of the best results of the project.

4.3.5 Vegetated gabions

Gabions stability is mainly based on the weight of the structure. Greening the



Figure 7: Shrub planting and sowing with straw mulch, May 2015; in this area the presence of wild rabbits is frequent.
 Abbildung 7: Buschbepflanzung und Saat mit Strohecke, Mai 2015; in diesem Gebiet sind Wildkaninchen in grosser Zahl vorhanden.

gabions aimed at disguising the white consolidation structure. Cutting roots are useful also to consolidate the soil behind the gabions and to anchor the gabions to the ground in a distributed way. Rooting of cuttings installed in May and June in the gabions had a great success (fig. 8). However cuttings installed in the soil on the lateral sides of gabions at the end of July died (95%), even if all those cuttings were drip watered.

4.3.6 Vegetated wooden weirs

Installed in July in the weir base and on the side of the downstream vegetated gabion mats, cuttings rooted and greened the structures (fig. 9), contributing to their consolidation and to the consolidation of the flow channel.



Figure 8: Erosion and mobilization of rocks, 2013; upper vegetated gabions June 2015.

Abbildung 8: Erosion und Mobilisierung von Felsen, 2013; Gabionen mit Bewuchs im oberen Bereich, Juni 2015.



Figure 9: Vegetated wooden weirs after the construction July 2014, and in June 2015.

Abbildung 9: Bewachsene Geschiebesperren nach dem Erbau im Juli 2014 und im Juni 2015.

4.3.7 Living combs and vegetated gabion mats

In the bed of temporary water runoffs, stone mats were installed with cuttings on its sides. Cuttings were also set to realize several living combs on a small slope on the side of a water runoff. These implementations occurred in the end of July; as the cuttings in the soil on the lateral sides of the gabions, even if drip watered until September most part of these died. Only few cuttings did not die and were alive at the end of the growing season, those

placed in areas with stable soil moisture due to the geomorphological conditions creating underground water accumulation (fig. 10).

4.4 First year maintenance work program

The delay in the start of the soil bioengineering project and the meteorological condition at implementation time and in the subsequent months, impacted mainly on cuttings planted in late July and on

sowings and hydroseedings made out of the good period.

To solve the shown problems we proposed a maintenance work program to be carried out in the 2015–2016 winter; two main actions are planned:

- Cuttings installed at the end of July, which did not survive, must be replaced the next winter, the best period to install cuttings.
- Sowings with straw mat produced plants since July, but these plants did not have a good development in the



Figure 10: Temporary water runoffs treated with vegetated gabion mats and living combs, June 2015.
Abbildung 10: Zeitweise aktive Flussgerinne, ausgelegt mit bewachsenen Gabionen und Grünkämmen.

following months. Torrential rains in the autumn created some erosion even below the straw mat. Areas processed by hydroseeding are dominated by gramineous species. As a result, in the following February, it is necessary to reinforce the cover of those areas where the grass is scattered, with manual sowings of leguminous species.

5 Conclusions

Even if the project delay resulted in soil bioengineering to be performed in the most unsuitable season, in general the project outcomes can be considered positive, satisfactory, and definitive. Namely hedge brush layers, shrub planting associated to sowings with straw mulch, and cuttings in vegetated gabions and in vegetated wooden weirs had a great success.

Proposed solutions to remedy the less satisfactory results, substitution of died cuttings and reinforcement of sowings with leguminous species, are easy to apply and require manual work and materials easy to handle.

If the project had been carried out in the correct season, it would have had an even better success.

Results obtained in adverse meteorological conditions must be considered positive one more time, bearing in mind that seeds, cuttings and plants were planted in a mineral terrain, obtained from deep

excavations and without any humus, harsh conditions to rooting and development of any type of plant.

The project was also an occasion to improve skills of technicians and students and to demonstrate soil bioengineering immediate benefits on the ecology and landscape of the site. Four guided visits of the site were organized, until now, by Portuguese association for soil bioengineering to show to the students from Portuguese high schools and universities that real project of soil bioengineering. Even under difficult meteorological conditions, positive technical outcomes results in economic savings and better landscapes. We hope that this is just a first application of techniques that will be used on a large-scale in Portugal.

References

- Bifulco, C. 2001. Interventi di ingegneria naturalistica nel parco nazionale del Vesuvio, PNV, San Sebastiano al Vesuvio, Napoli.
- Bifulco, C., Rego, F. 2013. Seleção de espécies lenhosas adequadas às técnicas de engenharia natural. *Silva Lusitana*. 2012 Vol. 20 (1/2), 15–38.
- Catry, F., Bugalho, M., Silva, J. 2007. Recuperação da floresta após o fogo. O caso da tapada nacional de Mafra. CEABN-ISA, Lisboa.
- Guttman, N.B. 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calcula-

tion algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35 (2), 311–322.

IPMA. 2015. Monitorização da Seca – Índice SPI – Evolução.

<http://www.ipma.pt/pt/oclima/observatorio.secas/spi/monitorizacao/evolucao/> (consulted 30/07/2015).

McKee, T.B., Doeskin, N.J., Kieist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proc. 8th Conf. on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston. 179–184.

Rivas-Martínez, S., Penas, A., Díaz, T.E. 2004. Bioclimatic Map of Europe – Bioclimates. Cartographic Service University of León. Spain. <http://www.globalbioclimatics.org/form/maps.htm> (consulted 02/01/2014).

Schiechtl, H. 1973. *Bioingegneria forestale – basi – materiali da costruzione vivi – metodi* (1985). Edizioni Castaldi, Feltre.

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., Khan, F.I. 2011. A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19, 333–349.

Corresponding author

Carlo Bifulco, CEABN-ISA Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, carlobifulco@isa.ulisboa.pt

Les zones tampons humides artificielles : pour quoi et pour qui ?

Tournebize J., Chaumont C., Kchouk S., Bouarfa S., Pulou J., Passeport E., Fesneau C., Gramaglia C.

Résumé

Dans le cadre de la pollution diffuse par les nitrates et les pesticides, les zones tampons, définies comme des interfaces du paysage entre les parcelles agricoles et les milieux aquatiques, ont un potentiel de rétention de ces contaminants. Se basant sur l'analyse et l'interprétation de quatre sites expérimentaux menés par Irstea, les résultats sur la réduction entrée/sortie des ZTHA montrent une réduction moyenne de 50% sur les paramètres nitrate et pesticides. Une large variabilité des efficacités a été observée corrélée à la saison et signal hydrologique. Le rôle du végétal dans les processus de rétention de polluant est analysé conduisant à un effet indirect sur le contrôle hydraulique et sur la phytostimulation. En parallèle des aspects techniques, une démarche sociologique a été menée, basée sur l'observation des échanges entre les acteurs durant la mise en œuvre de ZTHA. Cette approche conclut à la nécessité d'un processus de co-construction avec les acteurs du territoire pour une meilleure appropriation des enjeux et faciliter l'adhésion des acteurs au projet de ZTHA. Ces éléments ont été rassemblés dans un guide technique sur l'implantation des zones tampons (www.zonestampons.onema.fr) qu'est décrit dans une troisième partie. Ce guide s'adresse aux gestionnaires de l'eau et aux bureaux d'étude dans le but de les accompagner dans la co-construction des projets de ZTHA. Enfin il est important de préciser que même si une efficacité des ZTHA dans la rétention des polluants est avérée, les ZTHA ne constituent pas un permis de polluer, mais bien une action complémentaire de celles qui, à la source, visent à en réduire l'usage.

Mots-clés

Pollution diffuse, nitrate, pesticides, zone tampon humide artificielle, écologie, sociologie

Künstliche Pufferzonen von Feuchtgebieten (KPF): Für was und für wen?

Zusammenfassung

Pufferzonen, d.h. der Übergangsbereich zwischen landwirtschaftlich genutzten und aquatischen Bereichen, haben ein grosses Rückhaltepotenzial von Verunreinigungen wie Nitraten und Pestiziden. Die Ergebnisse einer Analyse mit Auswertung von vier Feldversuchen des Irstea, weisen einen Rückgang zwischen KPF Ein- und Austrag von durchschnittlich 50 % der Nitrate und Pestizide auf. Eine grosse Variabilität der Effizienz wurde beobachtet in Korrelation mit der Jahreszeit und mit hydraulischen Werten. Die hier vorgestellte Verfahrensweise fasst die Notwendigkeit der Zusammenarbeit zwischen Akteuren vor Ort auf, um eine gesteigerte Wertschätzung des Einsatzes und um die Klärung von Zuständigkeiten der KPF Beteiligten zu vereinfachen. Die Elemente wurden in einem technischen Leitfaden für die Implementierung von Pufferzonen zusammengefasst (www.zonestampons.onema.fr [auf Französisch]). Der Leitfaden wendet sich an Verantwortliche des Gewässerbereichs und Ingenieurbüros mit dem Ziel den gemeinsamen Aufbau von KPF zu begünstigen. Schliesslich ist es wichtig hervorzuheben, dass KPF keine Rechtfertigung für Verschmutzung darstellen, auch wenn das effiziente Funktionieren von KPF erreicht ist. Vielmehr sind KPF eine zusätzliche Massnahme für die Reduktion von Verschmutzungen.

Keywords

Verunreinigungsausbreitung, Nitrat, Pestizide, Künstliche Pufferzonen von Feuchtgebieten, Ökologie, Soziologie

Le zone tampone umide artificiali : perché e per chi ?

Riassunto

Nel quadro di un inquinamento diffuso di nitrati e pesticidi, le zone tampone, definite come le interfacce del paesaggio tra le parcelle agricole e gli ambienti acquatici, hanno un potenziale di ritenzione di questi inquinanti. Sulla base dell'analisi di quattro siti sperimentali gestiti dell'Irstea, i risultati riguardo il rapporto entrata/uscita di ZTHA mostrano una riduzione media del 50% sui parametri di nitrati e pesticidi. Una grande variabilità dell'efficacia è stata riscontrata in correlazione alla stagione e all'apporto d'acqua. Il ruolo delle piante nei processi di ritenzione degli inquinanti è analizzato in relazione ad un effetto indiretto sul controllo idraulico e sulla fitostimolazione. A lato degli aspetti tecnici, è stato condotto uno studio sociologico basato sull'osservazione degli scambi avvenuti tra gli attori durante la messa in opera delle ZTHA. Da questo studio ne è nata la necessità di un processo di cooperazione con gli attori del territorio per una migliore aggregazione e per facilitare l'adesione degli stessi al progetto ZTHA. Questi elementi sono stati raccolti all'interno di una guida tecnica sulla creazione delle zone tampone (www.zonestampons.onema.fr) che è descritta nella terza parte. La guida è indirizzata ai gestori dei mezzi acquiferi e agli studi di progettazione, allo scopo di guidarli nella realizzazione dei progetti di ZTHA. Infine, è importante precisare che, sebbene l'efficacia delle ZTHA nella ritenzione degli inquinanti sia stata dimostrata, questo non costituisce un permesso ad inquinare, ma bensì un'azione complementare a quella alla fonte, che mira a risolvere il problema.

Parole chiave

Inquinamento diffuso, nitrati, pesticidi, zone umide tampone artificiali, ecologia, sociologia

Description / Site	Anciennes Cressonnières	Bassin de rétention	Zone Tampon Humide Artificielle	Zone tampon humide artificielle
Localisation	Maise (91)	Aulnoy (77)	Rampillon (77)	Villedomain (37)
Origine de l'eau	Résurgence de la nappe de Beauce	Eaux de drainage agricole (35ha)	Eaux de drainage agricole (355ha)	Eaux de drainage agricole (46ha)
Exutoire	Rivière Essonne	Ru de Bourgogne	Zone d'engouffrement	Ru du Calais
Dimension (L*I*H)	50*(3m*30m*0.1m)	70m*50m*3m	100m*50m*0.8m	100m*22*0.6m
Végétation	Fortes biodiversités (cf § 2.2)	Minimale (<10% de macrophytes)	Intermédiaire (carex, juncus, typha, phragmites)	Totale (Glyceria, phragmites australis, typha latifolia)
Période du suivi	2008 – 2011	2005 - 2014	2012 - ...	2007-2011
Suivi métrologique	Ponctuel entrée / sortie (Débit, Nitrate)	Continu entrée / sortie (Débit, Nitrate, pesticides)	Continu entrée / sortie (Débit, Nitrate, pesticides)	Continu entrée / sortie (Débit, pesticides)
Expérimentation complémentaire	Suivi de la végétation Quantification du N dans la biomasse Caractérisation du carbone disponible		Cinétique in situ de dénitrification	Suivi du devenir de Pesticides en laboratoire
Questions scientifiques	Relation trajectoire écologique après abandon de la culture cressicole et rétention de l'azote	Effet d'une configuration de type grand volume et grande profondeur sur la rétention annuelle en polluants agricoles (nitrate et pesticides)	Evaluation de la restauration d'une zone humide sur la rétention des polluants agricoles (nitrate et pesticides)	Evaluation de la création d'une zone tampon humide artificielle sur la rétention des polluants agricoles (nitrate et pesticides)
Références	Pulou 2011	Tournebize et al., 2013 Tournebize et al., 2015	Tournebize et al., 2012	Passeport et al., 2013

Tableau 1 : Résumé des caractéristiques des quatre sites expérimentaux.
Tabelle 1: Zusammenfassung der Charakteristika der vier Feldversuche.

Introduction

La gestion de la pollution diffuse d'origine agricole pour atteindre les objectifs de bon état écologique des masses d'eau (Directive cadre sur l'Eau) nécessite la mise en place de programmes d'action, visant à 1/ réduire la pression polluante à l'échelle des parcelles agricoles (adaptation des pratiques agricoles), 2/ réduire les transferts entre la parcelle et les masses d'eau. Cette dernière option nécessite de recréer, dans les bassins versants agricoles, les services écosystémiques que les aménagements anthropiques tels le réaménagement foncier agricole, les opérations d'assainissement agricole dans les années 1980, ont détruits. La principale fonction écosystémique considérée ici est celle de régulation des flux, notamment de polluants d'origine agricole (nitrate et pesticides) provenant des eaux issues des parcelles agrico-

les. Le développement de l'ingénierie écologique au service de la qualité des milieux aquatiques est un nouveau challenge aussi bien pour les scientifiques que pour les gestionnaires de la ressource en eau. Par opposition aux solutions curatives (usines de traitement de l'eau potable), l'ingénierie écologique vise à développer des solutions plutôt naturelles de traitement des eaux agricoles, que nous pourrions qualifier de semi-curatives. Il s'agit d'optimiser des processus naturels de rétention des polluants en amont des centres de consommation de l'eau. En effet, dans le cadre de la production d'eau potable, l'eau qui contribue à la recharge des masses d'eau de surface ou souterraines provient de bassins versants parfois éloignés de la zone de consommation. Cette situation particulière entre la zone contributive de recharge, appelée Aire d'alimentation et de captage (AAC), et

la zone de consommation est à l'origine de la difficulté des gestionnaires de la ressource en eau à mobiliser tous les acteurs impliqués dans une problématique plutôt urbaine que rurale. Ainsi tous les outils de gestion, guides techniques ou non techniques issus du transfert de la connaissance scientifique vers ces acteurs, sont fortement souhaités par les ministères de l'écologie et de l'agriculture. Piloté par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), un Groupe technique zone tampon (GTZT) a été créé en 2010, avec pour vocation d'encadrer les réflexions menées sur les zones tampons, en réunissant autour d'une thématique commune un large panel d'experts (22 membres) et de compétences, qu'elles soient scientifiques, opérationnelles ou décisionnelles, et ce dans de nombreuses disciplines (agronomie, sciences environnementales, sciences humaines et sociales). De par son organisation, le GTZT constitue un lieu d'échange privilégié entre les acteurs de la recherche et les gestionnaires de bassin, confrontés au quotidien à la problématique de construction de plans d'actions réalistes et efficaces. Ces échanges permettent d'apporter différents éclairages – scientifiques et opérationnels – et aident à mieux cibler le développement des outils méthodologiques pour leur application concrète sur le terrain à court et moyen termes. Dans le cadre du GTZT, un guide technique sur la mise œuvre des zones tampons humides artificielles (ZTHA) a été rédigé en 2015 (http://zonestampons.onema.fr/system/files/tournebize_et_al_2015.pdf). Ce guide propose des éléments d'aide à l'implantation et à la construction de ZTHA pour intercepter et traiter les eaux issues du drainage de terres agricoles. Les eaux de drainage agricole entraînent des polluants d'origine agricole (nitrate et pesticides) par lixiviation (entraînement de polluants par infiltration sous racinaire), puis rejoignent les eaux superficielles du réseau hydrographique, voire souterraines dans des cas particuliers d'engouffrement karstique, contaminant ainsi les eaux de surface et les nappes phréatiques. Une ZTHA en milieu ag-

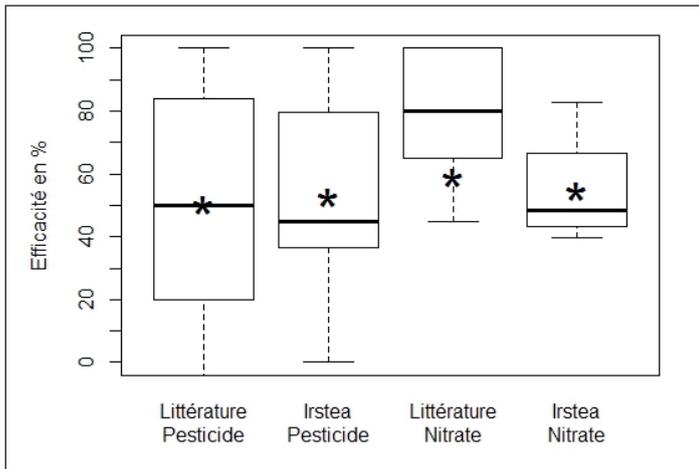


Figure 1 : Efficacité comparée (de type boîte noire entrée/sortie) à partir des sites expérimentaux d'Irstea (4 sites), 29 références traitant des pesticides et 17 références nitrate. L'étoile et la barre en gras indiquent respectivement la moyenne et la médiane des résultats.

Abbildung 1: Vergleich der Effizienz (Typ Blackbox mit Ein- und Ausgang) basierend auf den Feldversuchen des Irstea (4 Versuchsstände), 29 Referenzpunkte bezüglich Pestiziden und 17 Referenzpunkte bezüglich Nitrat. Der Stern und der breite Balken geben den Mittelwert, bzw. den Median der Ergebnisse an.

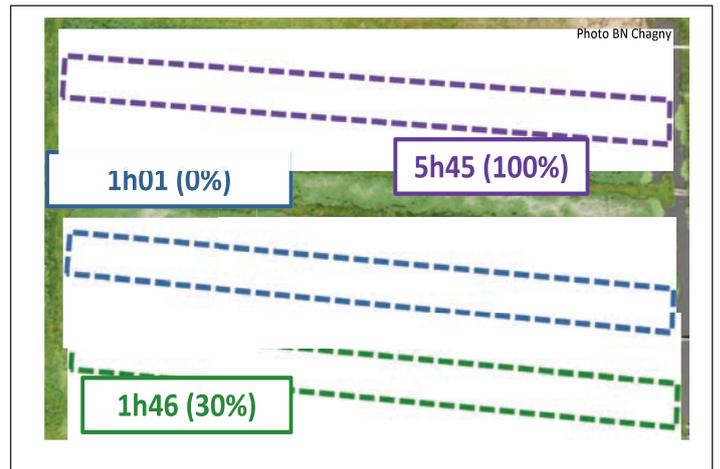


Figure 2 : Expérimentation de traçage chimique pour déterminer l'influence du taux de couverture végétale (le 0% végétation correspond au temps de référence, entre parenthèse) sur le temps de résidence hydraulique (adapté de Poulou, 2011, site des anciennes cressonnières de l'Essonne, Maise 91).

Abbildung 2: Versuche mit chemischer Nachverfolgung um den Einfluss der Pflanzendecke zu bestimmen (0 % Begrünung entsprechen der Referenzzeit in Klammern) mittels die hydraulischen Verweilzeit (übernommen von Poulou, 2011, Seite der ehemaligen Brunnenkressestätten der Essonne, Maise, Departement 91)

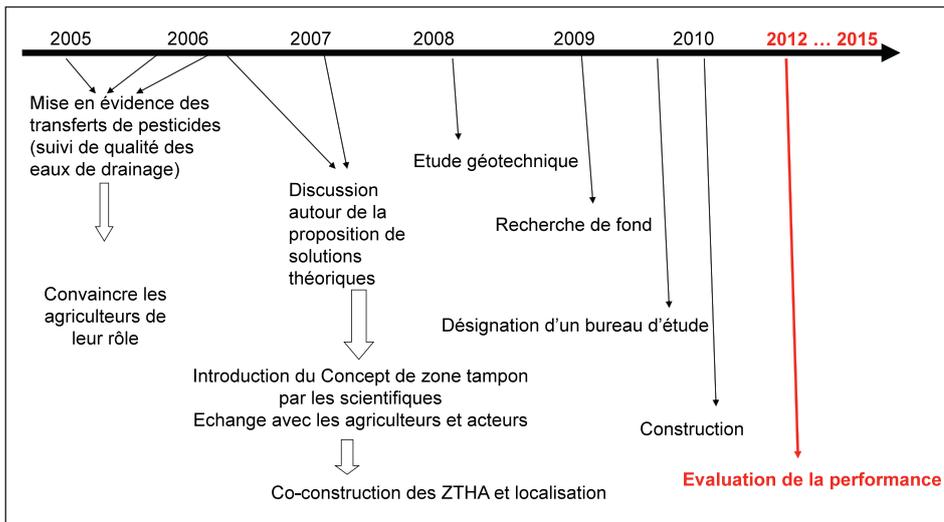


Figure 3 : Frise temporelle des étapes de la co-construction de l'expérimentation de Rampillon (adapté de Tournebize et al., 2012).

Abbildung 3: Zeitstrahl mit den Etappen des gleichzeitigen Erbau des Versuchsstands von Rampillon (übernommen von Tournebize et al., 2012).

ricole est un bassin de rétention, une mare existante, de profondeur et de hauteur d'eau variables, végétalisés ou pas. Nous incluons dans ces systèmes les zones tampons sans végétation s'approchant du lagunage, ou avec une végétation se rapprochant de systèmes plus naturels comme les zones humides. A l'image de la zone humide naturelle, la ZTHA est nécessairement en position particulière lui permettant d'exercer un effet tampon hydrologique. Ainsi la connexion hydrologique de la zone tampon

est un critère indispensable: l'eau doit être interceptée puis retourner au cours d'eau après un séjour dans la ZTHA. L'objectif de cet article est de présenter les aspects techniques (évaluation de l'efficacité, hiérarchisation des processus) mais aussi sociologiques (processus d'acceptabilité par les acteurs) à partir des retours d'expérience. Ces éléments de compréhension ont conduit à la réalisation du guide technique sur les ZTHA en contexte de drainage agricole, en mettant en évidence les aspects scien-

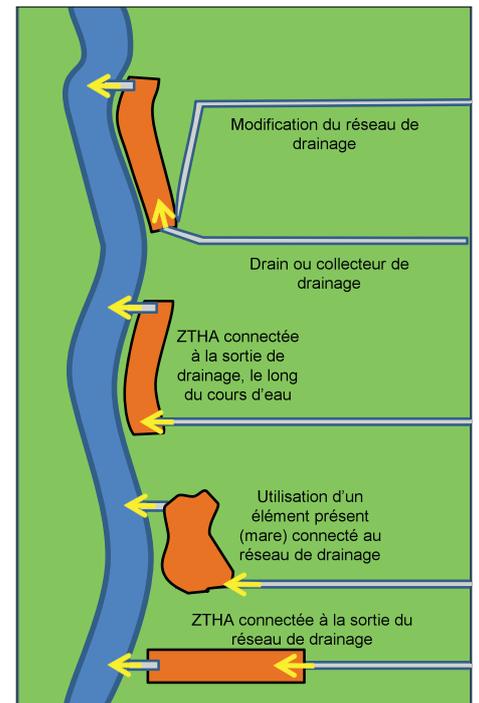


Figure 4 : Exemples de connexion au réseau de drainage.

Abbildung 4: Beispiel der Anbindung an Entwässerungsnetze.

ifiques pouvant servir de support aux gestionnaires ou opérationnels de la qualité de l'eau.

1 Matériel et méthodes

Les méthodes se déclinent en deux parties distinctes techniques et non techniques. La partie technique s'appuie

sur l'acquisition de données issues d'expérimentation et à leur interprétation. La partie non technique est basée sur l'analyse sociologique issue de la mise en œuvre réelle de ZTHA.

1) Le suivi métrologique : la base de l'évaluation technique

Comparer des évaluations de performance de différents systèmes ZTHA nécessite d'avoir des protocoles similaires. Quatre sites expérimentaux sont pilotés par Irstea et sont décrits dans le tableau 1. Ils comprennent un site dit des « anciennes cressonnières de l'Essonne » (91), sur lequel les relations entre trajectoires écologiques (succession végétale chronologique) après abandon de la culture cressicole et le potentiel de dénitrification ont été analysés. Ces systèmes agricoles cressicoles sont positionnés idéalement en position tampon en amont de la rivière Essonne. Le deuxième site dit de « Aulnoy » (77) correspond à l'opportunité de suivre l'impact sur la qualité de l'eau d'un bassin de stockage d'eau issue du drainage agricole à usage d'irrigation. Les deux autres sites de Villedomain (37) et de Rampillon (77) correspondent à la re-création de ZTHA dans deux bassins versants agricoles drainés de superficies différentes (46 et 355 ha). Sur l'ensemble des quatre sites, les protocoles de suivi et d'évaluation sont basés sur le suivi des flux entre l'entrée et la sortie des aménagements. La stratégie d'échantillonnage a été calée sur les prélèvements composites pilotés par le volume d'eau écoulé, soit à l'entrée, soit à la sortie à la fréquence hebdomadaire. Cette méthode présente l'avantage de quantifier les flux transférés pour un nombre minimum d'échantillon prélevés. La description complète des sites expérimentaux est disponible dans les travaux de Pulou (2011), Passeport et al. (2013), Tournebize et al. (2012 et 2015). Des expérimentations complémentaires ont été menées afin de caractériser les processus de rétention : pour le cas du nitrate, comparaison de l'adsorption par la végétation (mesure in situ) et de la dénitrification benthique (expérimentation de laboratoire, Pulou et al., 2012); pour le cas des pesticides, l'adsorption sur les substrats (végétation, sédiment), la dé-



Figure 5: Photo intégration d'une ZTHA en coin de parcelle (site expérimental de Villedomain).
Abbildung 5: Foto der Integration einer KPF am Rande eines Flurstücks (Versuchsstand von Villedomain).

gradation microbienne par expérimentation en laboratoire (Passeport et al., 2011a, 2011b). Ces expérimentations permettent de hiérarchiser les processus et de mettre en évidence le comportement des polluants nitrate et pesticides dans les systèmes tampons.

Dans un deuxième temps, le calcul des volumes – décrit dans le guide technique – s'appuie sur la simulation hydrologique des débits de drainage sur une période de 50 ans. La règle de dimensionnement comprend une étude hydrologique d'une interception des flux d'eau drainée, un stockage pendant une durée de sept jours, temps minimal pour assurer une rétention des polluants et une surverse, en cas d'évènement hydrologique peu fréquent de 20% maximum. Le stockage de ce volume sur 80 cm de colonne d'eau permet de calculer la surface unitaire de ZTHA par hectare drainé à l'amont du versant.

2) Acquisition des données pour interpréter les relations sociologiques entre les acteurs

Les données sociologiques s'organisent en deux sources : les entretiens semi-directifs individuels avec les acteurs et l'observation sociologique passive des échanges entre acteurs pendant les phases d'implantation de ZTHA. Les entre-

tiens individuels ont été menés auprès d'acteurs répartis aux différents échelons de la sphère agro-environnementale. Ces acteurs appartiennent à trois types que l'on peut définir comme suit 1) des associations environnementales; 2) un service déconcentré de l'état représenté par la police de l'eau, un conseil général, une agence de l'eau, une direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie et une mairie; les organismes agricoles. La grille de cet entretien a été construite autour de quatre axes principaux orientés graduellement de la question générale de la qualité de l'eau et des moyens à mettre en œuvre pour améliorer sa qualité, à une critique de l'expérience, à titre d'exemple, de Rampillon.

L'observation sociologique passive s'appuie sur une participation en tant qu'observateur externe aux différentes étapes de conception d'une ZTHA lors de l'expérimentation de Rampillon. Elle s'est étalée dans le temps entre 2005, début de la réflexion entre les acteurs et 2012, inauguration officielle de la ZTHA à Rampillon. A la différence des trois autres sites, qui n'impliquaient qu'un seul interlocuteur agricole, l'expérimentation de Rampillon, sur un bassin versant de 355 ha, rassemble de nombreux acteurs (collectivités, service de l'état, agriculteurs, chercheurs, association d'utilisateur AQUI'Brie porteur de la démarche ini-

tiale). Sans intervenir dans les débats, les observateurs ont caractérisés les forces en présence, les points de blocage et les arguments facilitateurs dans la conduite du projet à titre expérimental.

3) La rédaction du guide technique d'implantation des ZTHA en contexte drainé

Commandé par le GTZT et l'ONEMA, les enseignements sur les retours des expérimentations concrètes de terrain ont été synthétisés dans un guide technique à destination des gestionnaires et acteurs opérationnels de la ressource en eau. Ce guide s'appuie sur les résultats des quatre sites, et détaille les étapes de construction de ZTHA à partir du cas de l'expérimentation de Rampillon. La relecture et la validation du guide ont été assurées par les membres du GTZT, ainsi que techniciens de Chambres d'Agriculture, de syndicats de rivière et de bureaux d'étude.

2 Résultats

1) La ZTHA, une solution pour favoriser la rétention de polluants

Les résultats des suivis sur les quatre sites montrent que le potentiel de rétention est bien réel, mais qu'il varie énormément pendant les saisons et les années. La figure 1 présente la comparaison des résultats des expériences menées par Irstea au regard des résultats de la littérature scientifique. Que ce soit sur les paramètres nitrate ou pesticide, les moyennes de deux séries (données littéraires et Irstea) sont relativement proches, aux environs de 50%. Pour le paramètre nitrate, il semblerait que les résultats des expérimentations d'Irstea soient moins optimistes que ceux de la littérature. Les écart-types sont très importants pour les paramètres pesticides du fait des nombreuses molécules étudiées. L'efficacité sur la rétention des pesticides dépend des propriétés physico-chimiques des molécules et de leur période d'application. Les données d'efficacité sur les trois sites expérimentaux Aulnoy, Villedomain, Rampillon montrent une cohérence dans les résultats. En se basant sur le site de Rampillon et les 60 molécules analysées,

nous proposons un classement selon la rétention évaluée in situ :

- avec une réduction de moins de 10%: 2.4-mcpa, Clopyralid, Ethofumesate, Fluroxypyr, Imazamox, Métamitron, Pendiméthaline, Quinmércac ;
- avec une réduction de 10 à 30%: Azoxystrobine, Chlortoluron, Nicosulfuron ;
- avec une réduction entre 30 et 50%, Clomazone, S-metolachlore ;
- et enfin avec une réduction >50%: Atrazine, Dimetachlore, Imidaclopr, Metazachlor, Aclonifen, Bénéoxacor, Bentazone, Boscalid, Chloridazone, Cyproconazole, Epoxiconazole, Glyphosate, Lenacile, Tébuconazole, Triflurosulfuron-méthyl.

Ce classement n'a pas pour objectif de dénoncer certaines des molécules qui ont leur intérêt agronomique, mais plutôt de contribuer à la réflexion sur les démarches de réduction et d'encadrement des usages des pesticides.

Dans tous les cas, malgré un potentiel sur la rétention, il est illusoire d'attribuer aux ZTHA un pouvoir épurateur à 100% efficace. Inhérente à tout système naturel, la variabilité de l'efficacité est un facteur à prendre en compte dans la réflexion et l'approche systémique des ZTHA.

2) Hiérarchisation des processus de rétention

Les études complémentaires ont pour objectif la compréhension, la caractérisation et la hiérarchisation des processus au sein des ZTHA. Ces études spécifiques ont permis d'identifier le rôle des différents compartiments d'une ZTHA dans la rétention. La dénitrification est un processus microbien qui réduit l'ion nitrate en forme gazeuse. Les conditions favorables sont l'absence d'oxygène et la présence de carbone disponible. L'étude de Pulou 2011 a conclu que la dénitrification représentait plus de 85% de la rétention de nitrate, les 15% restant ont été prélevés par la végétation en place. Cependant la qualité du carbone disponible est un paramètre clé de la dénitrification. Le carbone libéré par la décomposition des espèces comme

le cresson est plus facilement assimilable par les microorganismes que celui libéré par la décomposition des roseaux, les formes lignines et cutines étant plus abondantes dans ce dernier (Pulou et al., 2012). Cependant le carbone issu de la dégradation des roseaux est libéré sur une plus longue période incluant les saisons plus froides (automne et hiver). En effet la température joue un rôle sur la vitesse des réactions biochimiques. Plus la température est élevée, plus les réactions sont rapides. Concernant la rétention des pesticides, les deux processus principaux sont l'adsorption et la dégradation microbiologique. L'adsorption est rapide, en quelques heures, permet le piégeage des molécules de pesticides aussi bien sur les matières en suspension que sur les biofilms et le carbone de la végétation (Passeport et al., 2011b). Dans un deuxième temps, certains microorganismes peuvent alors s'organiser pour dégrader les molécules de pesticide en métabolite. Ces réactions prennent cependant du temps. Dans le cas de l'epoxiconazole (Passeport et al., 2011a), si 60% de la molécule initiale n'est plus disponibles après 170 jours d'expérimentation, seulement 3% de la quantité initiale a été réduite en éléments simples C, H, O, N. Cette durée de dégradation microbienne n'est pas cependant compatible avec l'hydrologie des ZTHA. En effet, le signal hydrologique à l'entrée de la ZTHA influence le temps de séjour hydraulique. L'adsorption, temps caractéristique horaire, est favorisée par une vitesse d'écoulement lente (<0,1m/s). La végétation y contribue en ralentissant et en homogénéisant les écoulements, augmentant ainsi le temps de rétention de l'eau (par augmentation de la rugosité de surface) et favorisant la sédimentation des particules. La figure 2 montre l'importance de la densité végétale, à débit équivalent, sur le temps de résidence hydraulique. La dégradation, temps caractéristique journalier est nécessite un dimensionnement de la ZTHA en fonction de l'analyse hydrologique du bassin versant (cf §5).

Ces facteurs nature du substrat, disponibilité du carbone, temps de séjour hydraulique lié au signal hydrologique

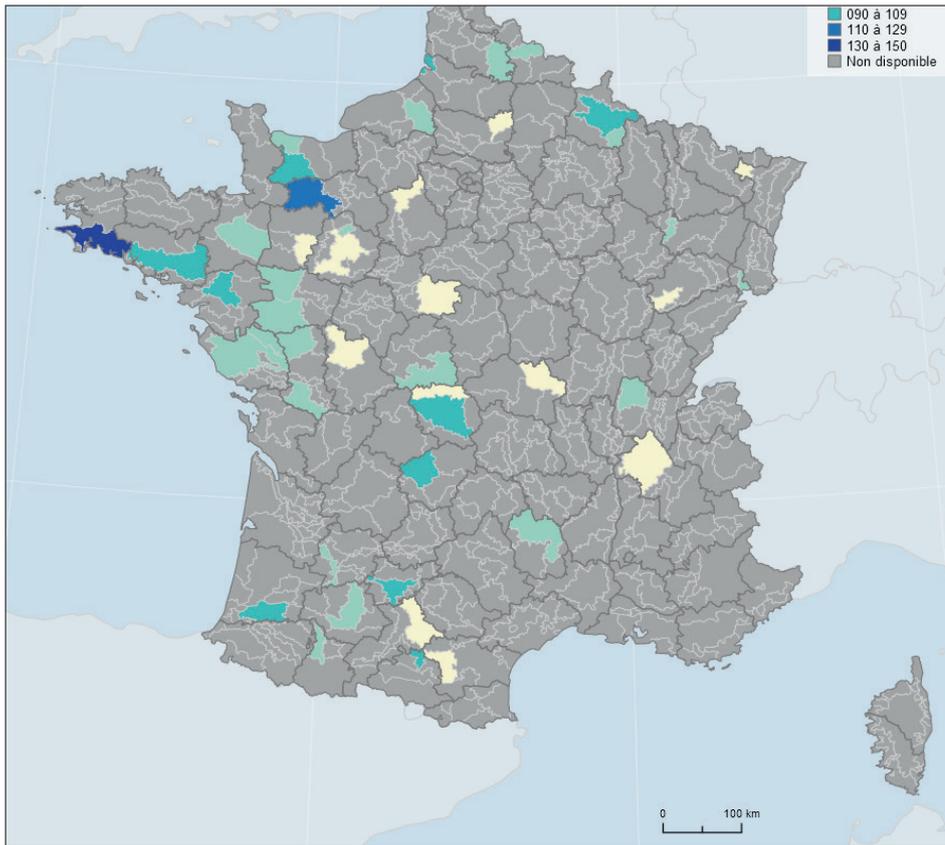


Figure 6 : Cartographie des volumes en m³ de ZTHA calculés à partir des données pédologiques des secteurs de référence drainage, extrapolés aux petites régions agricoles associées.

Abbildung 6: Karte der KPF Volumina in m³, berechnet auf der Basis bodenkundlicher Daten von Referenzentwässerungsbereichen, extrapoliert auf die entsprechenden kleinen landwirtschaftlichen Gebiete.

et la température expliquent la large variabilité de l'efficacité de rétention.

3) La ZTHA, une solution de bon sens

Le suivi des échanges sociologiques entre les différents acteurs sur le bassin versant de Rampillon, la première en France à cette échelle, avait pour but de tester l'efficacité de ce système dans les conditions de la région de la Brie. Toutefois, comme le décrivent Tournebize et al. (2012), ces dispositifs pourtant forts de résultats basés sur la littérature, ont fait l'objet d'une forte réticence par les acteurs agricoles. Consciente du bien-fondé d'aménager des ZTHA, mais démunie à l'époque d'instruments incitatifs forts, l'association environnementale s'est engagée dans un processus de co-construction de ces ZTHA pilotes, associant les acteurs du bassin versant de Rampillon. Dans un contexte de forte pression foncière, Tournebize et al. (2012) ont décrit ce processus

de co-construction, depuis la première réunion avec les agriculteurs jusqu'aux ouvrages finalement réalisés. Un processus d'implantation de ZTHA dans un bassin versant rassemblant plusieurs acteurs est long et nécessite de suivre plusieurs étapes (figure 3) : depuis la prise de conscience des transferts réels de pesticides (la qualité de l'eau n'est pas un paramètre qui se visualise, contrairement à d'autres problèmes environnementaux comme la gestion des excès d'eau d'inondation), l'introduction de la solution de ZTHA parmi d'autres, les études préliminaires géotechniques, topographiques, la recherche de financement et d'autorisation, puis enfin la construction proprement dite. Nous insistons sur une étape préliminaire qui nous semble crucial : le diagnostic qui décrit l'état initial. Ce diagnostic comprend les analyses du territoire, mais surtout un diagnostic hydrologique qui vise d'une part à déterminer les chemins de l'eau comme le préconise le CORPEN

(2001, 2003), d'autre part à quantifier les flux d'eau selon les saisons et leurs origines (ruissellement et/ou drainage). La mise en œuvre de ce diagnostic nécessite de mettre en place dès le début de la réflexion un suivi des écoulements (généralement par suivi de ligne d'eau) sur le bassin versant même. Pendant les longues étapes préliminaires décisionnelles et d'animation, ce suivi métrologique permettra d'acquérir les données nécessaires à la compréhension locale du régime hydrologique. Un bon diagnostic initial compris et approprié par tous les acteurs facilitera les discussions sur les solutions à retenir pour réduire les transferts.

A l'issue de ce dialogue sur le diagnostic, il apparaît que les solutions théoriques doivent être adaptées aux contextes socio-économiques. Des compromis socio-techniques ont dû être trouvés, entre un dimensionnement technique initial et les possibilités concrètes sur le terrain qui ont conduit à une réalisation finale de l'ordre de 55% du projet initial, en termes de surface de ZTHA (Kchouk et al., 2015). Plusieurs contraintes à la mise en œuvre de ces dispositifs ont été mises en évidence 1) le fait que par leur existence même, ces ouvrages mettent en visibilité la pollution d'origine agricole, et par conséquent l'impact environnemental de l'usage des phytosanitaires; 2) le fait que la mise en place d'une ZTHA n'exonère pas les agriculteurs de changer de pratiques et soit conditionnée par la nécessité absolue de diminuer les apports de phytosanitaires. Or, sur le bassin versant de Rampillon, peu d'agriculteurs sont engagés dans des accords contractuels visant à réduire leurs apports; 3) le fait que les petits ouvrages situés dans les parcelles des agriculteurs doivent être gérés par les agriculteurs eux-mêmes. Malgré ces freins, les ZTHA ont bien été déployées dans la commune de Rampillon. En plus de « l'opportunité foncière », les facteurs de réussite unanimement cités par les acteurs enquêtés sont l'implication et la collaboration des agriculteurs dans une démarche co-construite et non stigmatisante. L'opposition particulière qu'a suscitée l'implémentation de ZTHA à Rampillon peut s'expliquer par les enjeux

particuliers du territoire de la Brie, qui est un des secteurs de l'agriculture les plus intensifs de France, notamment en céréaliculture.

4) ZTHA, un projet de territoire

La réflexion sur la localisation de la ZTHA dans le bassin versant doit se faire en intégrant des éléments du diagnostic hydrologique, de territoire mais peut aussi se raisonner sur le maintien de la biodiversité. Différentes configurations peuvent être étudiées (figure 4), afin de prendre en compte l'intérêt du milieu naturel, ainsi que la conformité avec la réglementation, notamment la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques, préservant la continuité écologique. Associer les deux challenges d'une part de protection de la ressource en eau (qui généralement oppose les acteurs locaux entre la profession agricole et les gestionnaires de l'eau) et d'autre part du maintien de la biodiversité peut être une opportunité de développement territorial et ainsi dans une certaine mesure faciliter la mise en place de ZTHA. Le verrou soulevé par la profession agricole porte souvent sur la disponibilité du foncier. Pour répondre à cette problématique, relier les deux enjeux eau et biodiversité pourrait permettre de cibler les zones non productives, ou restaurer les éléments du paysage pour leur octroyer une efficacité certaine concernant la fonctionnalité de régulation des flux au sein des bassins versants (figure 5).

5) Le guide technique : un moyen de transfert de savoir-faire des scientifiques aux opérationnels

La capitalisation des retours d'expérience sur l'implémentation des ZTHA a été rassemblée dans le guide technique orienté vers la gestion opérationnelle. Le guide détaille les choix d'implantation des ZTHA et inclut ainsi plusieurs étapes avant, pendant et après la construction. Le guide présente dans une première partie, des rappels sur le fonctionnement du drainage agricole, et les principes d'une zone tampon humide artificielle. Un objectif de 50% de réduction en flux est réaliste,

avec une emprise foncière de l'ordre de 1% du bassin versant amont. Des solutions techniques pour gérer l'eau en entrée et en sortie de la ZTHA sont proposées à titre d'exemple. Par la recherche d'un compromis entre l'emprise foncière et une efficacité de 50%, un temps de séjour de sept jours (stocker statistiquement une crue par semaine) est recommandé. Pour un objectif ciblé de réduction des transferts de pesticide, dans une configuration en parallèle du fossé d'assainissement agricole, cette contrainte nous conduit à proposer un dimensionnement moyen à l'échelle nationale des territoires drainés de 76 m³/hectare drainé (min 25 m³/ha drainé à max 224 m³/ha drainé). Sur une base de 0,8 m de profondeur, cela correspond à une emprise foncière de 1% du bassin versant amont. Les calculs sont détaillés en annexe. Enfin des recommandations le type de végétation, maintenance, sont proposées. Ainsi il est souligné l'importance du diagnostic hydrologique (chemin d'écoulement et quantification des flux), de l'étude topographique (disposer de la dénivelée suffisante pour stocker entre 0,5 et 1,3 m d'eau), et de l'étude géotechnique (s'assurer de l'étanchéité de la couche de fond).

En l'état actuel de la réglementation Loi sur l'eau et les milieux aquatiques, les ZTHA doivent être soit déclarées ou soit autorisées au titre de bassin de rétention hydraulique, selon leur dimension. Il est tout de même nécessaire de se rapprocher des services de police de l'eau du département. Le guide introduit ensuite la méthodologie de mise en œuvre en sept étapes : avant pendant et après la construction : Étape 1 : Le diagnostic hydrologique – Étape 2 : La localisation – Étape 3 : La conception – Étape 4 : Réglementation et financement – Étape 5 : La construction – Étape 6 : La plantation – Étape 7 : La maintenance. Le guide aborde partiellement les aspects de dimensionnement. Issues de calculs et simulations hydrologiques, nos recommandations de dimensionnement aboutissent à consacrer en moyenne 1% du versant amont contributif à la construction d'une ZTHA (figure 6).

Conclusions

Alternative à la solution tout curative, l'aménagement du territoire avec les ZTHA constitue une solution semi-curative écologique. La solution de ZTHA doit être un aboutissement du dialogue territorial, après la phase de diagnostic partagé (hydrologique, territorial, économique). Même si nos recommandations de dimensionnement aboutissent à un seuil de 1% du bassin amont contributif à la construction de la ZTHA, une phase de co-construction est essentielle pour assurer une meilleure appropriation par les acteurs locaux. Cette phase peut dans certains cas amener les acteurs à trouver des compromis et/ou adaptations aux contraintes socio-économiques sur le dimensionnement final de la ZTHA.

Comme toute technique naturelle, la solution ZTHA présente des avantages et des limites. La nécessité d'impliquer les acteurs, dont les agriculteurs, est un bon moyen de se réappropriier le territoire et de valoriser d'un côté les connaissances des acteurs sur leur territoire, et d'un autre côté les atouts écologiques, en restaurant les fonctionnalités naturelles de ce même territoire. Les ZTHA, de par leur conception basée sur l'ingénierie écologique, sont des solutions simples et de bon sens agricole pour peu qu'un effort de pédagogie soit mis en œuvre pour initier les acteurs à ces enjeux. Des liens forts peuvent être dès le départ pris en compte pour maintenir une biodiversité commune.

Toute démarche d'adaptation des processus naturels n'est pas une garantie d'efficacité à 100%. Les ZTHA ne devront en aucun cas constituer un permis de polluer mais bien une solution complémentaire aux actions visant la réduction à la source (adaptation des pratiques agricoles). Les prochains travaux de recherche porteront sur les trois principaux problèmes identifiés : la disponibilité du foncier, le mode de financement et la reconnaissance par les pouvoirs publics dans la restauration des fonctions écologiques des éléments des bassins versants, enfin des aspects scientifiques sur le devenir des polluants dans les ZTHA pour une évaluation à long terme : 1) rétention sur les

sédiments et évaluation du potentiel de relargage des pesticides, 2) émissions de protoxyde d'azote (N₂O), considéré comme un puissant gaz à effet de serre, généré lors des processus de dénitrification incomplète.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les acteurs agricoles (MM. Gobard, Dauphin, Crespin), les partenaires scientifiques (Agrocampus Ouest, LISODE), institutionnels (ONEMA), associatifs (AQUI'Brie), financiers (Life ARTWET, AESN) et collectivités locales (SIARCE, Syndicat du Ru d'Ancoeur) impliqués dans les quatre projets décrits.

Bibliographie

CORPEN (2001). Diagnostic de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires: bases de l'établissement de cahiers des charges des diagnostics de bassins versants et d'exploitations. 32 p.

CORPEN (2003). Éléments méthodologique pour un diagnostic régional et un suivi de la contamination des eaux liée à l'utilisation des produits phytosanitaires. 84 p.

Fisher, J., Acreman, M.C. 2004. Wetland nutrient removal: a review of the evidence. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 8 (4): 673-685.

Kchouk, S., Vincent, B, Tournebize, J., Imache, A., Billy, C., Bouarfa, S. 2015. Les zones tampons humides artificielles pour réduire les pollutions des nappes par les pesticides issus des réseaux de

drainage: une innovation en marche?, *Sciences Eaux & Territoires* n° 17., p. 30-33

E. Passeport, J. Tournebize, C. Chaumont, A. Guenne and Y. Coquet (2013). "Pesticide contamination interception strategy and removal efficiency in forest buffer and artificial wetland in a tile-drained agricultural watershed." *Chemosphere* 91 (9): 1289-1296.

E. Passeport, P. Benoit, V. Bergheaud, Y. Coquet and J. Tournebize (2011a). "Époxiconazole degradation from artificial wetland and forest buffer substrates under flooded conditions." *Chemical Engineering Journal* 173 (3): 760-765.

E. Passeport, P. Benoit, V. Bergheaud, Y. Coquet and J. Tournebize (2011b). "Selected pesticides adsorption and desorption in substrates from artificial wetland and forest buffer." *Environmental Toxicology and Chemistry* 30(7): 1669-1676.

Pulou, J. 2011. Les anciennes cressonnières de l'Essonne: Effets de la recolonisation des zones humides artificielles sur la dynamique de l'azote. Ph.D. Thesis. AgroParisTech, 212 p.

J. Pulou, J. Tournebize, C. Chaumont, J. Haury and A.M. Laverman (2012). "Carbon availability limits potential denitrification in watercress farm sediment." *Ecological Engineering* 49: 212-220

J. Tournebize, E. Passeport, C. Chaumont, C. Fesneau, A. Guenne and B. Vincent (2013). "Pesticide de-contami-

nation of surface waters as a wetland ecosystem service in agricultural landscapes." *Ecological Engineering* 56: 51-59.

Tournebize J., Gramaglia C., Birmant F., Bouarfa S., Chaumont C., Vincent B. (2012) Co-design of constructed wetlands to mitigate pesticide pollution in a drained catch-basin: a solution to improve groundwater quality. *Irrigation and Drainage* 61: 75-86. DOI: 10.1002/ird.1655.

J. Tournebize, C. Chaumont, C. Fesneau, A. Guenne, B. Vincent, J. Garnier and U. Mander (2015). "Long-term nitrate removal in a buffering pond-reservoir system receiving water from an agricultural drained catchment." *Ecological Engineering* 80: 32-45.

Tournebize J. Chaumont C., Molina S., Marcon A., Berthault D. 2015. Guide technique à l'implantation des zones tampons humides artificielles (ZTHA) pour réduire les transferts de nitrates et de pesticides dans les eaux de drainage. Irstea-ONEMA. 60 p. http://zonestampons.onema.fr/system/files/tournebize_et_al_2015.pdf

Adresse de l'auteur:

Irstea, UR HBAN, 1 rue Pierre Gilles de Gennes, CS 10300, 92761 Antony cedex, France (julien.tournebize@irstea.fr)

intersol'2017

Congrès-Exposition International sur les Sols, les Sédiments et l'Eau
International Conference-Exhibition on Soils, Sediments and Water

Call for papers / Appel à communications
Deadline : November 4, 2016

L'Europe des Sites et Sols Pollués :
Blocages et Réussites

The Europe of Polluted Sites and Soils:
Blockages and Successes

www.intersol.fr

14, 15 & 16 mars 2017 - Lyon, France



Cours en ligne MOOC «Hydraulique Fluviale»

Vous vous intéressez à la problématique des rivières?

Nous vous invitons à découvrir le cours en ligne MOOC «Hydraulique Fluviale» développé par une équipe internationale d'enseignants de l'UCL, de l'EPFL et de l'UEH, qui débute le 18 octobre 2016:

<https://www.edx.org/course/hydraulique-fluviale-louvainx-louv17x>

L'inscription est gratuite, libre, anonyme si vous le souhaitez, juste pour le plaisir de la découverte... N'hésitez pas!

L'équipe du MOOC «Hydraulique Fluviale»

MOOC online Kurs «Fluss Hydraulik» (in Französisch)

Sind Sie in an Aspekten der Fluss Hydraulik interessiert?

Wir laden sie ein, den online Kurs MOOC "Fluss Hydraulik", welcher von einem internationalen Team von Lehrkräften der UCL, EPFL und UEH zusammengestellt wurde, ab 18. Oktober 2016 zu absolvieren:

<https://www.edx.org/course/hydraulique-fluviale-louvainx-louv17x>

Der Kurs wird in Französisch durchgeführt. Die Einschreibung ist gratis, kann anonym sein, einfach so aus Spass am Lernen ... also ohne Zögern sich jetzt einschreiben!

Das "Fluss Hydraulik" MOOC Team



Editorial

2

Fachbeiträge

Génie végétal et ingénierie végétale : des compétences et une réglementation aux bénéfiques de la nature et de l'homme

3

L'ingénierie du végétal au service de l'aménagement écologique et paysager des sites dégradés : connaissances, savoir-faire, carences et perspectives en matière de végétalisation par hydroensemencement

7

L'apport d'un programme de modélisation hydrodynamique bidimensionnel au travail de l'ingénieur spécialisé dans les techniques de l'ingénierie végétale pour le contrôle de l'érosion fluviale

13

Pour une meilleure production et utilisation du matériel végétal (semences, boutures, plants) dans les projets de génie végétal

18

Développement de géofiliers biodégradables de qualité destinés à des opérations de génie végétal et écologique

24

Les matériaux synthétiques, alliés du génie végétal ?

29

Effet des plantes sur les processus érosifs : de la connaissance des traits fonctionnels aux applications d'ingénierie végétale et de génie végétal

35

Renewing dangerous highway slopes in Portugal

43

Les zones tampons humides artificielles : pour quoi et pour qui ?

51



INGENIEURBIOLOGIE
GÉNIE BIOLOGIQUE
INGEGNERIA NATURALISTICA
INSCHENIERA BIOLOGICA

Verein für Ingenieurbiologie Association pour le génie biologique

Verein für Ingenieurbiologie
c/o HSR Hochschule für Technik Rapperswil
ILF-Institut für Landschaft und Freiraum
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0)55 222 47 90
E-Mail: sekretariat@ingenieurbiologie.ch



Europäische Föderation für Ingenieurbiologie
Federazione Europea per l'Ingegneria Naturalistica
European Federation for Soil Bioengineering
Fédération Européenne pour le Génie Biologique
Federación Europea de Ingeniería del Paisaje

Dipl.-Ing. Rolf Studer
Verein für Ingenieurbiologie in der Schweiz
Route du Coteau 63, CH-1752 Villars-sur-Glâne
Tel: +41 26 401 02 45
Mail: rolfaugust.studer@gmail.com
http://www.ingenieurbiologie.ch

Inserate

Inseratentarif für Mitteilungsblatt / Tarif d'insertion dans le bulletin

Der vorliegende Tarif ist gültig für eine Ausgabennummer.

Le présent tarif comprend l'insertion pour une parution.

1 Seite	Fr. 750.–	2/3 Seite	Fr. 550.–	1/2 Seite	Fr. 400.–
1/3 Seite	Fr. 300.–	1/4 Seite	Fr. 250.–	1/8 Seite	Fr. 150.–
Separate Werbebeilage beim Versand:	1 A4-Seite		Fr. 1000.–		
	jede weitere A4-Seite		Fr. 300.–		

Inseratenannahme: Roland Scheibli, Baudirektion Kanton Zürich, ALN, Abteilung Landwirtschaft, Walcheplatz 2, Postfach, 8090 Zürich, Tel.: +41 43 259 27 64, Fax: +41 43 259 51 48, E-Mail: roland.scheibli@bd.zh.ch

Link auf der Internetseite des Vereins / Liaison internet sur la page web de l'association: Fr. 750.– pro Jahr / par an

Oder bei Inseraten im Mitteilungsblatt im Wert von mindestens Fr. 750.– pro Jahr

Contre publication d'encarts publicitaires dans le journal Génie Biologique pour Fr. 750.– par an au moins

Kommende Hefte / Carnets à venir

Heft 1/2016: Exkursionsführer

Heft 2/2016: Wegleitung Seeufer

Heft 3/2016: Hochlagenbegrünung

Fachbeiträge sind gemäss den redaktionellen Richtlinien zu verfassen und bis zum Redaktionsschluss an Roland Scheibli, Baudirektion Kanton Zürich, ALN, Abteilung Landwirtschaft, Walcheplatz 2, Postfach, 8090 Zürich, Tel.: +41 43 259 27 64, Fax: +41 43 259 51 48, E-Mail: roland.scheibli@bd.zh.ch