

Connaître la réponse des plantes aux contraintes érosives : intérêt pour la restauration écologique des terrains érodés

Mélanie Burylo et Freddy Rey

Les milieux de montagne sont soumis à de nombreuses contraintes environnementales, notamment érosives, provoquant la dégradation de la qualité des écosystèmes et la perte de ses fonctions de protection des sols. En France, dans les bassins versants marneux des Alpes du Sud, la combinaison de facteurs géologiques, climatiques et humains conduit à une érosion importante des sols. Les vastes affleurements marneux, naturellement très érodables, sont soumis à un climat montagnard subméditerranéen agressif conduisant à un ravinement des terrains et à des pertes de sols parfois considérables (Mathys *et al.*, 2003). Ces phénomènes érosifs sont associés à des enjeux humains de taille. À l'aval du bassin versant de la Durance, les dépôts de sédiments provoquent l'exhaussement du lit de nombreux cours d'eau et l'augmentation du risque d'inondation (Balland *et al.*, 2002).

Face à ces fortes contraintes érosives, la végétation a souvent du mal à s'installer de façon pérenne et à jouer son rôle de protection des sols. Pour lutter contre cette érosion et mettre en œuvre le rôle primordial de la végétation dans la maîtrise des dynamiques érosives, des interventions faisant appel aux principes de l'ingénierie écologique peuvent constituer une solution intéressante. Des ouvrages de génie biologique, sous forme de barrières végétales installées dans le lit de ravines marneuses, permettent de stabiliser le milieu et de piéger les sédiments en transit lors de violents orages. Ces atterrissements représentent alors des zones stables sur lesquelles des communautés

végétales peuvent s'installer et se développer naturellement après une opération de restauration (Rey, 2009 ; Rey *et al.*, 2005).

Dans ce contexte, deux disciplines, développées depuis la fin des années soixante-dix, et appartenant toutes deux à la branche de l'écologie appliquée, peuvent être sollicitées : l'ingénierie écologique et l'écologie de la restauration (Barnaud et Chapuis, 2004). L'ingénierie écologique renvoie à une démarche orientée vers des aspects opérationnels, avec pour objectif la création ou la gestion durable des écosystèmes au profit de l'Homme et des écosystèmes eux-mêmes. L'écologie de la restauration est quant à elle ancrée dans le monde de la recherche, et vise à connaître et comprendre la structure et le fonctionnement des communautés végétales afin de définir et d'évaluer les projets de restauration des milieux. Ainsi, les deux disciplines sont en constante interaction, se nourrissant et s'inspirant l'une de l'autre (Gosselin, 2004 – figure 1).

Cet article s'inscrit dans ce schéma et se propose de montrer l'intérêt des recherches actuelles sur la réponse des espèces végétales aux contraintes érosives et de voir comment les résultats pourront être intégrés à la gestion des terrains érodés de montagne.

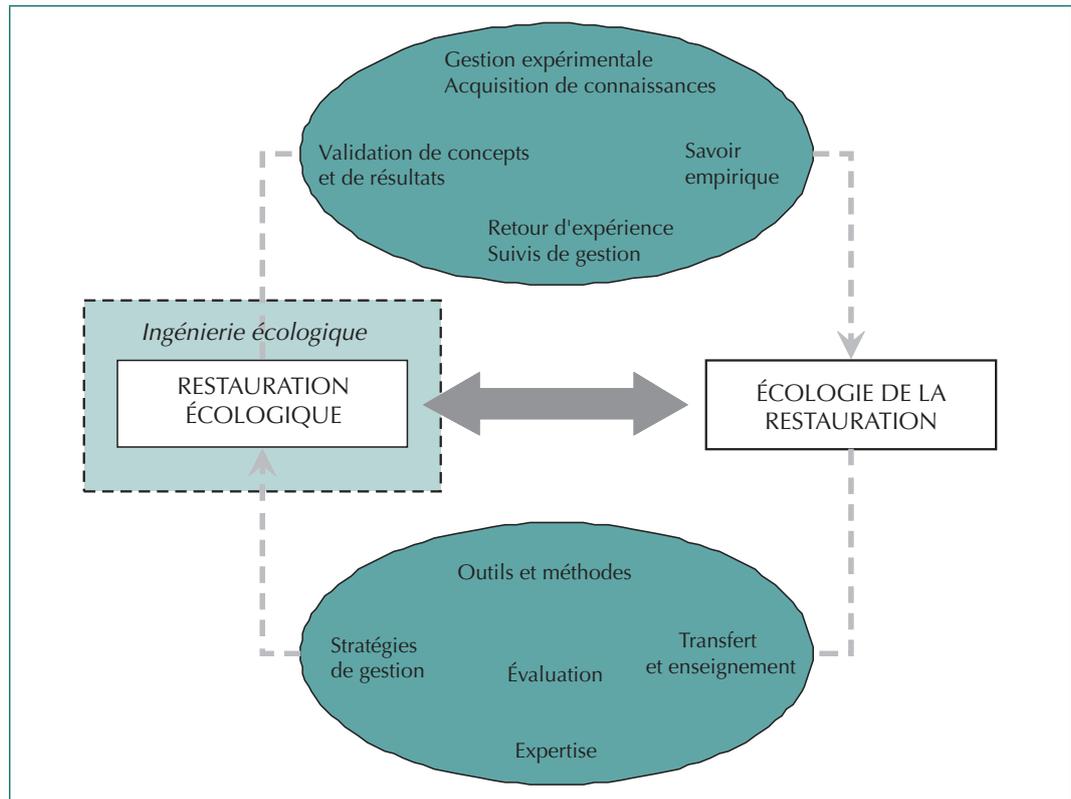
Problématique

La question, posée à la fois par les scientifiques et les gestionnaires, est maintenant de savoir si cette végétation, constituée de plantes à un stade

Les contacts

Cemagref Grenoble,
UR EMGR, Écosystèmes
montagnards, 2 rue de
la papeterie, BP 76,
38402 Saint-Martin-
d'Hères Cedex

► Figure 1 – Schéma conceptuel illustrant les relations entre ingénierie écologique et écologie de la restauration.



juvénile, sera capable de résister aux contraintes physiques liées à l'érosion. Lors d'événements pluvieux importants, deux types de processus se mettent en place et provoquent le déplacement des marnes vers l'aval de la ravine (Bouma et Imeson, 2000) :

- du ruissellement concentré, localisé dans le lit de la ravine, et ayant un fort pouvoir érosif (photo 1),
- des mouvements de masse, correspondant au déplacement gravitaire de la couche superficielle de sol (photo 2).

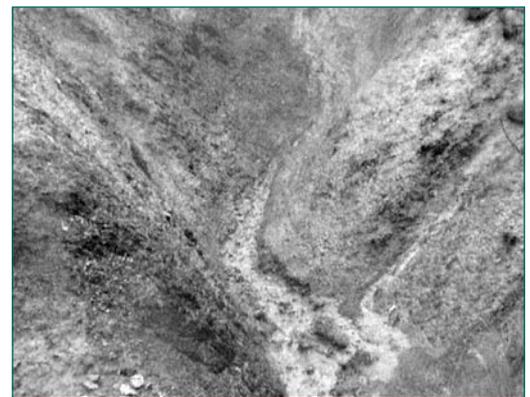
Ces deux phénomènes génèrent des contraintes mécaniques importantes pouvant provoquer l'arrachage ou l'ensevelissement de la végétation et constituent un obstacle à la réussite des actions de restauration des terrains. Deux nouvelles questions émergent donc : quelle est l'efficacité de cette couverture végétale pour résister aux contraintes environnementales ? Et comment la prévoir ?

Les recherches menées actuellement au Cemagref de Grenoble tentent de répondre à cette problématique.

Les recherches

Objectifs et démarche expérimentale

L'approche par les traits de vie des plantes fait régulièrement l'objet d'utilisations fructueuses en écologie de la restauration et plus généralement



▲ Photo 1 – Ruissellement concentré dans le lit d'une ravine de la station expérimentale de Draix (Alpes de Haute-Provence) lors d'un violent orage d'été (photo : Sébastien Klotz).



▲ Photo 2 – Résultat d'un mouvement de masse superficiel suite à un violent orage dans le bassin versant du Saignon, Alpes de Haute-Provence (photo : Freddy Rey).

en écologie appliquée. En effet, l'utilisation des traits de vie est intéressante car ces derniers sont impliqués dans la réponse des plantes aux variations biotiques et abiotiques des facteurs environnementaux, dont les perturbations érosives font partie (Lavorel et Garnier, 2002). Ils apparaissent donc comme des substituts aux fonctions de la plante et offrent des applications prometteuses, notamment en termes de prédiction de la performance des plantes dans les milieux perturbés et de généralisation des résultats au-delà des limites de l'étude (Pywell *et al.*, 2003).

Dans ce contexte, les objectifs de nos recherches sont :

- d'évaluer et de comparer la performance des espèces végétales face aux contraintes érosives ;
- de déterminer si des espèces présentent des différences de résistance du point de vue de leurs traits ;

– d'identifier un trait ou un ensemble de traits permettant de prévoir la réponse des espèces aux contraintes érosives.

Pour remplir ces objectifs, la démarche expérimentale a donc consisté à coupler des mesures de la résistance des espèces au déracinement et à l'ensevelissement à des mesures de traits de vie (figure 2).

Réponse au déracinement

Afin de relier résistance au déracinement et traits de vie, douze espèces, choisies parmi les espèces dominantes dans les terrains marneux érodés des Alpes du Sud, ont été étudiées. Ces espèces, qui présentaient toutes un système racinaire de type pivotant, représentaient différentes formes de croissance, à savoir arbres, buissons et herbacées.

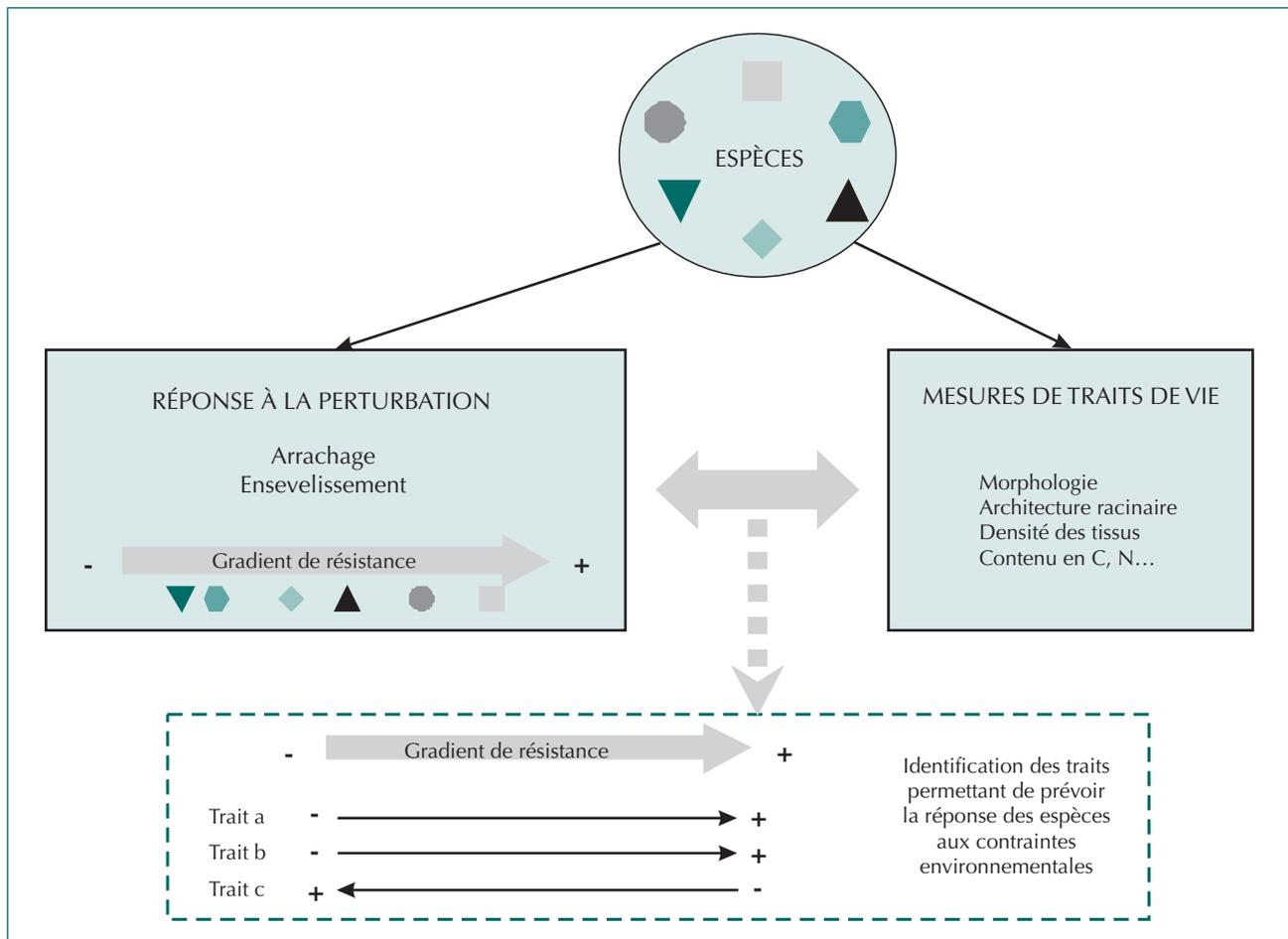
Des tests d'arrachage ont été pratiqués *in situ* sur une dizaine d'individus de chaque espèce, sélectionnés à un stade précoce de leur développement (diamètre à la base de la tige < 2 cm). Les mesures, enregistrées à l'aide d'un dynamomètre, ont permis d'évaluer leur puissance d'ancrage dans le sol (figure 3).

Parallèlement, ces mêmes espèces ont fait l'objet d'analyses en laboratoire afin de mesurer dix traits de vie décrivant la morphologie aérienne et racinaire des plantes, leur architecture racinaire, type de ramifications ou encore densité des tissus racinaires.

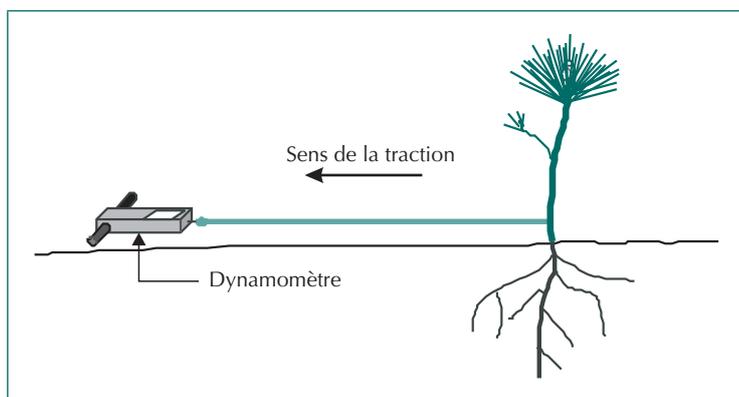
Les résultats ont montré d'importantes différences de résistance à l'arrachage entre les espèces mais n'ont pas fait ressortir d'influence particulière des formes de croissance. À titre d'exemple, parmi les espèces les plus résistantes, on trouvait le genêt (*Genista cinerea*), la bugrane (*Ononis fruticosa*) et le buis (*Buxus sempervirens*) alors que le pin noir (*Pinus nigra austriaca*) et la stéhéline (*Stachelina dubia*) sont apparus comme des espèces moins résistantes. Des analyses supplémentaires ont ensuite permis de faire le lien avec les traits des plantes.

Celles-ci ont fait ressortir l'importance de trois traits liés à la morphologie et à l'architecture du système racinaire des plantes dans la résistance à l'arrachage :

- L_{RI}/D : l'élanement de la racine pivotante, exprimé comme le rapport de la longueur de la racine pivotante sur le diamètre basal de la plante ;



▲ Figure 2 – Schéma simplifié décrivant la démarche expérimentale et l'intérêt de l'utilisation des traits des espèces végétales en écologie de la restauration.



▲ Figure 3 – Schéma du dispositif expérimental utilisé pour évaluer la puissance d'ancrage des espèces végétales dans le sol. Les valeurs sont exprimées en MPa (megapascal).

– %RF : le pourcentage de racines fines, correspondant au pourcentage de longueur de racines dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm ;

– Ramif. : le type de ramification, opposant les systèmes racinaires à ramification dichotomique (ramification importante sur les racines latérales) aux systèmes racinaires dits « arête de poisson » (ramification à partir de la racine pivotante uniquement).

La puissance d'ancrage des plantes dépend de leur aptitude à transmettre les contraintes extérieures dans le sol *via* leurs racines. Ces résultats confirment l'importance de l'ancrage vertical de la plante assuré par le pivot chez les jeunes plantes (L_{R1}/D – Fourcaud *et al.*, 2008). D'autre part, ils soulignent également le rôle des racines

latérales (%RF et Ramif. – Bailey *et al.*, 2002). Ces dernières, liées à l'ancrage horizontal des plantes, déterminent la surface de contact entre le sol et les racines et la rapidité de transfert des contraintes dans le sol (Burylo *et al.*, 2009).

Ainsi, des espèces présentant un pivot long et fin, ainsi qu'un système racinaire à ramification dichotomique composé de nombreuses racines fines, seront plus efficaces, dans les premiers stades de développement, pour résister aux contraintes imposées par le ruissellement concentré, que des espèces présentant les traits opposés (figure 4).

Réponse à l'ensevelissement

Les expérimentations menées sur la réponse des espèces végétales à l'ensevelissement par des sédiments marneux ont porté sur des espèces sélectionnées parmi les espèces les plus communément rencontrées dans les ravines marneuses. Pour des raisons liées aux contraintes expérimentales, seule cinq espèces ont été étudiées, dont

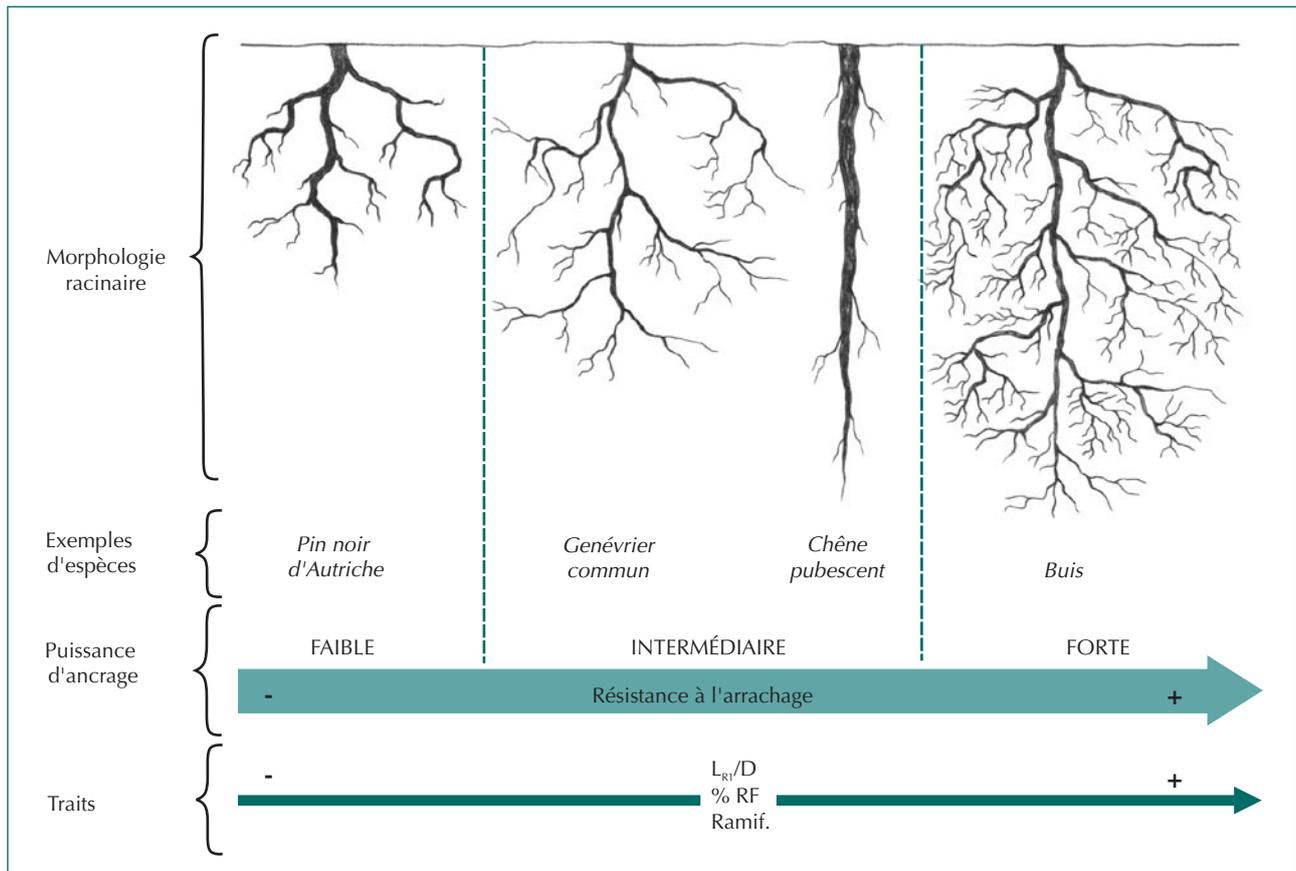
trois espèces arborées et deux espèces buissonnantes. Les individus, issus de germination en chambre de culture, ont été cultivés en pots dans un substrat marneux avant d'être ensevelis.

Trois niveaux d'ensevelissement ont été testés (figure 5) : ensevelissement nul (plantes témoin), ensevelissement partiel (50 % de la hauteur de la plante) et ensevelissement total (100 %).

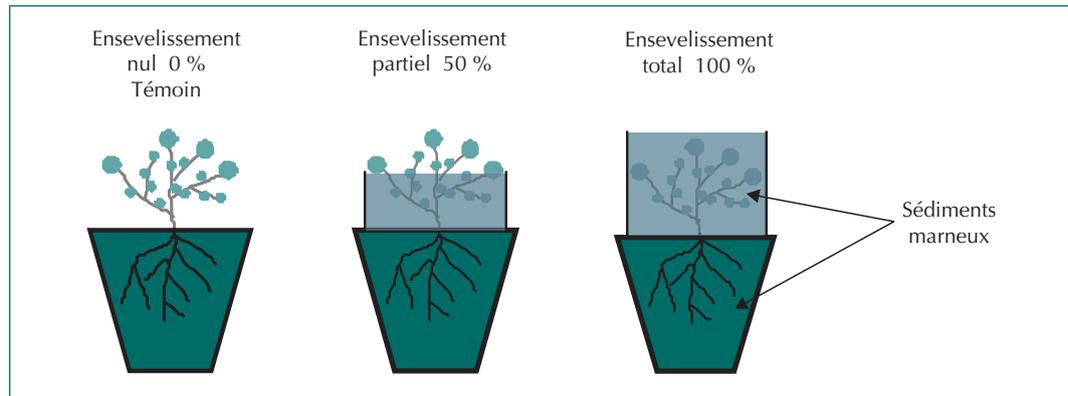
Des mesures de survie, de croissance en hauteur et de biomasse aérienne et racinaire ont été réalisées afin d'évaluer la résistance des espèces au traitement. En outre, les contenus en sucres solubles et en amidon dans les tiges et les racines des plantes ont été mesurés au moment de l'ensevelissement.

Au terme de huit semaines de traitement, les données récoltées ont permis de classer les cinq espèces étudiées en fonction de leur réponse à l'ensevelissement (figure 6). Une distinction selon la forme de croissance est apparue, les espèces arborées étant plus résistantes que les espèces

▼ Figure 4 – Représentation simplifiée des relations entre les traits des plantes et leur résistance au déracinement par du ruissellement concentré.



► Figure 5 – Schéma du dispositif expérimental utilisé pour évaluer la résistance des espèces végétales à l'ensevelissement par des sédiments marneux.



Résistance à l'ensevelissement + ↑ - ↓	Forme de croissance	Espèce	Survie 100 %	Croissance en hauteur	Production de biomasse aérienne	Production de biomasse racinaire
	Arbres		Érable champêtre	40 %	→	→
		Robinier faux-acacia	0 %	→	→	→
		Pin noir d'Autriche	0 %	→	→	↘
Buissons		Bugrane	0 %	↘	→	→
		Argousier	0 %	↘	↘	↘

▲ Figure 6 – Réponse des cinq espèces étudiées à l'ensevelissement par des sédiments marneux. Les flèches indiquent le sens de la réponse de l'espèce considérée après comparaison entre les individus témoins et les individus ensevelis. → : réponse neutre, pas de différence entre individus témoins et ensevelis ; ↘ : réponse négative, croissance des individus ensevelis inférieure à celle des individus témoins ; ↗ : tendance à réponse négative.

buissonnantes. Cependant, les résultats n'ont pas fait ressortir de relation entre cette réponse et les traits décrivant les ressources des plantes. Les recherches sont donc à poursuivre dans ce domaine.

Applications possibles des résultats de la recherche en ingénierie écologique

Les résultats issus des expérimentations présentées dans cet article offrent des perspectives d'application intéressantes pour la gestion des terrains

érodés de montagne. Différents axes d'intégration des connaissances scientifiques à la gestion sont possibles dans le cas présent.

Évaluation du succès des actions de réhabilitation ou de restauration

Après toute opération de réhabilitation ou de restauration écologique de milieux érodés se pose la question de l'évaluation du succès de l'intervention, à court et moyen terme. Traditionnellement, les actions étaient évaluées en termes de dynamique végétale, de richesse et de composition spécifique, ou encore de recouvrement végétal.

De plus en plus, le succès des stratégies de gestion est indissociable d'une restauration des fonctions de l'écosystème et des services qu'il fournit à la société (Herrick *et al.*, 2006), ici la lutte contre l'érosion. Ainsi, dans le cas des terrains érodés de montagne, et plus particulièrement des ravines marneuses des Alpes du Sud, on attend de l'écosystème restauré qu'il puisse résister aux contraintes physiques de l'environnement avant de pouvoir protéger effectivement les sols contre l'érosion (figure 7).

La connaissance de la réponse des espèces végétales aux contraintes érosives fournit des éléments permettant d'évaluer plus précisément l'efficacité de la couverture végétale en développement après les opérations de réhabilitation ou de restauration (figure 7).

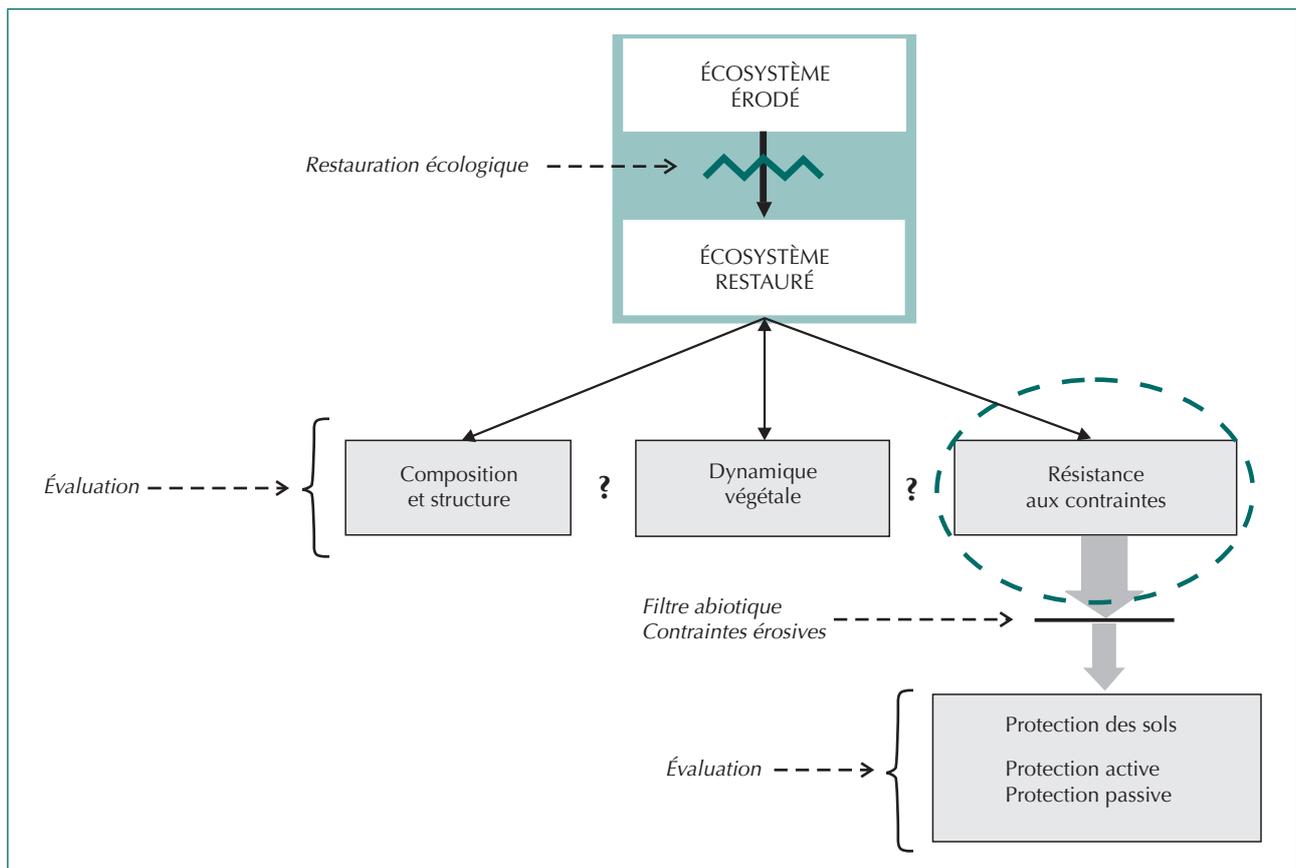
En particulier, l'évaluation à court terme des travaux de réhabilitation ou de restauration ne suffit pas à garantir leur réussite à plus long terme, de nombreuses années après l'intervention. Dans ce contexte, la modélisation apparaît comme un

outil intéressant. En effet, des recherches sont actuellement en cours afin de développer un modèle d'évolution de la couverture végétale dans les ravines marneuses restaurées (Delcros *et al.*, p. 121 de ce même numéro). Celui-ci permettra de simuler la dynamique végétale après réhabilitation (Rey *et al.*, 2005) en prenant en compte les facteurs biotiques et abiotiques qui l'influencent (Burylo *et al.*, 2007). L'impact des contraintes physiques liées aux processus érosifs, en l'occurrence le déracinement et l'ensevelissement des plantes, pourra donc être intégré à ce modèle afin d'obtenir une image plus précise de l'état de la couverture végétale plusieurs années après restauration.

Diagnostic de la vulnérabilité des milieux érodés

Dans les milieux marneux érodés des Alpes du Sud, les actions de lutte contre l'érosion s'inscrivent dans un contexte de gestion « minimale », où le diagnostic de la vulnérabilité des terrains est un objectif fort. À l'échelle du bassin versant,

▼ Figure 7 – Schéma illustrant les différentes caractéristiques et fonctions de l'écosystème restauré permettant l'évaluation des actions de restauration. Le cercle en pointillé indique l'étape où la connaissance de la réponse des espèces végétales aux contraintes peut être intégrée.



la détermination de cette vulnérabilité peut se baser sur deux critères : l'érodabilité des terrains et la présence d'une couverture végétale naturelle (Rey, 2009). Les exigences liées à la végétation sont exprimées en termes de pourcentage de recouvrement, de strate de végétation et de localisation dans la ravine. Cependant, la composition spécifique est également cruciale, certaines espèces se révélant plus efficaces que d'autres pour la protection des sols. La prise en compte de la composition spécifique de l'écosystème réhabilité ou restauré et l'intégration des résultats sur la résistance des espèces à l'érosion pourra donc affiner encore plus le diagnostic de la vulnérabilité des milieux érodés après les interventions.

Amélioration des stratégies de gestion

Dans le domaine de l'ingénierie écologique en milieu montagnard, de nombreux outils sont disponibles afin de faciliter les choix d'action du gestionnaire. Parmi ces outils utilisables pour les milieux érodés de montagne, on peut citer les guides de sylviculture (Gauquelin et Courbaud, 2006), les guides sur le génie biologique (Rey, en préparation) ou encore des fiches techniques décrivant les milieux ou les espèces (Barouillet, 1982). Ces ressources, rassemblées au fil des actions de gestion (connaissances empiriques, retours d'expérience) et des travaux de recherche, fournissent des informations importantes sur les espèces :

- description biologique : type biologique, dimensions, système racinaire, croissance, longévité, mode de reproduction...
- autécologie : exigences trophiques, thermiques, hydriques...

- potentiel invasif,
- modalités d'utilisation en ingénierie écologique : taille des plants, époque et méthodes de plantation, coût...

Les résultats de nos recherches en écologie de la restauration pourront être intégrés dans ce type de document et les enrichir sur la question de la résistance des espèces aux contraintes érosives, jusque là peu développée. Moyennant un avis d'expert, ce travail pourra mieux guider les praticiens dans leurs choix sur les espèces à utiliser pour la restauration des milieux, ou encore sur l'ampleur nécessaire ou suffisante de leurs actions de réhabilitation (Rey, 2009).

Conclusion

La connaissance et la prédiction de la réponse des espèces végétales aux perturbations environnementales est un objectif fort en écologie appliquée et encore plus en écologie de la restauration. Les résultats des recherches dans ce domaine trouvent naturellement de nombreuses applications et perspectives d'intégration dans les actions de gestion faisant appel à l'ingénierie écologique. Cet article constitue à ce titre un exemple intéressant de l'emboîtement et des interactions importantes entre recherche et gestion. Les recherches menées par le Cemagref de Grenoble dans le domaine de l'écologie de la restauration appliquée aux bassins versants torrentiels se poursuivent dans cette optique et s'orientent notamment aujourd'hui vers l'étude de l'effet des espèces végétales sur la protection des sols, en particulier leurs rôles de piégeage des sédiments par leur feuillage et de stabilisation des sols par leur système racinaire. □

Résumé

Cet article se propose d'illustrer l'intérêt des recherches actuelles sur la réponse des espèces végétales aux perturbations érosives pour la restauration des terrains marneux érodés des Alpes du Sud. En effet, l'écologie de la restauration et l'ingénierie écologique sont des disciplines proches, issues de l'écologie appliquée, mais appartenant chacune à deux mondes différents, respectivement celui du scientifique et du gestionnaire. Ces deux domaines sont ainsi fortement complémentaires et présentent de nombreuses interactions. L'objectif des travaux en cours est de connaître et prévoir la résistance des plantes au déracinement et à l'ensevelissement sous des sédiments marneux provoqués par du ruissellement concentré et des mouvements de masse superficiels. L'utilisation des traits des plantes permet de relier l'efficacité des espèces à leurs caractéristiques morphologiques et offre ainsi des possibilités de généralisation intéressantes. Les résultats obtenus peuvent trouver différentes formes d'intégration dans le cadre d'actions de réhabilitation ou de restauration écologiques, telles que l'évaluation de ces opérations, le diagnostic de la vulnérabilité des milieux érodés ou l'optimisation des stratégies de gestion.

Abstract

The aim of this paper is to illustrate how current investigations on species response to erosive perturbations can be of major interest for the ecological restoration of eroded marly lands in the French Southern Alps. Indeed, restoration ecology and ecological engineering are close fields, both stemming from applied ecology, but belonging to two different circles, respectively the researcher's and the practitioner's world. These two disciplines are complementary and present strong interactions. The aim of our investigations is to determine, explain and predict species resistance to uprooting and burial by marly sediment caused by concentrated runoff and shallow mass movements. The use of plant traits to relate species performance to their morphological characteristics offers the possibility to generalize the results and is therefore highly relevant. The results of our study can be integrated in different ways into ecological rehabilitation or restoration actions. They can be used to evaluate the success of restoration projects or the vulnerability of eroded lands, and to optimize management strategies.

Bibliographie

- BARNAUD, G., CHAPUIS, J.-L., 2004, Ingénierie écologique et écologie de la restauration : spécificités et complémentarités, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial, p. 123-138.
- BAILEY, P.-H.-J., CURREY, J.-D., FITTER, A.-H., 2002, The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in *Allium cepa* and root mutants of *Arabidopsis thaliana*, *Journal of Experimental Botany*, n° 53, p. 333-340.
- BALLAND, P. *et al.*, 2002, *Rapport sur la Durance – Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance – Contribution à un plan Durance*, MEDD-MAAPAR-METLTM, 93 p.
- BARROUILLET, J., 1982, *La revégétalisation dans les Alpes du Sud – Choix et emploi des espèces herbacées ou arbustives*, Cemagref, 148 p.
- BOUMA, N.-A., IMESON, A.-C., 2000, Investigation of relationships between measured field indicators and erosion processes on badland surfaces at Petter, Spain, *Catena*, n° 40, p. 147-171.
- BURYLO, M., REY, F., DELCROS, P., 2007, Abiotic and biotic factors influencing the early stages of vegetation colonization in restored marly gullies (Southern Alps, France), *Ecological Engineering*, n° 30, p. 231-239.
- BURYLO, M. *et al.*, 2009, Linking plant morphological traits to uprooting resistance in eroded marly lands (Southern Alps, France), *Plant and Soil*, in press.
- DELCROS, P., LEPOUTRE, M., BURYLO M., REY, F., 2009, TLALOC : un modèle spatio-temporel de la dynamique des communautés végétales en lien avec la dynamique érosive et sédimentaire de ravines marneuses, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial « Écologie de la restauration et ingénierie écologique – Enjeux, convergences, applications », p.121-134.
- FOURCAUD, T. *et al.*, 2008, Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: a modelling approach, *Annals of Botany*, n° 101, p. 1267-1280.
- GAUQUELIN, X., COURBAUD, B., (coord.), 2006, *Guide des sylvicultures de montagne (Alpes du Nord françaises)*, Cemagref-CRPF-ONF, 289 p.
- GOSELIN, F., 2004, Intégrer recherche scientifique en écologie et gestion dans le cadre de l'ingénierie écologique : intérêts et limites, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial, p. 113-120.
- HERRICK, J.-E., SCHUMAN, G.-E., RANGO, A., 2006, Monitoring ecological processes for restoration projects, *Journal for Nature Conservation*, n° 14, p. 161-171.
- LAVOREL, S., GARNIER, E., 2002, Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: Revisiting the Holy Grail, *Functional Ecology*, 16, 5, p. 545-556.
- MATHYS, N. *et al.*, 2003, Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model, *Catena*, n° 50, p. 527-548.
- PYWELL, R.F. *et al.*, 2003, Plant traits as predictors of performance in ecological restoration, *Journal of Applied Ecology*, n° 40, p. 65-77.
- REY, F., (en prép.), *Génie biologique contre l'érosion torrentielle*.
- REY, F., 2009, A strategy for fine sediment retention with bioengineering works in eroded catchments in mountainous and Mediterranean type ecosystems, *Land degradation and development*, in press.
- REY, F., ISSELIN-NONDEDEU, F., BEDECARRATS, A., 2005, Vegetation dynamics on sediment deposits upstream of bioengineering works in mountainous marly gullies in a Mediterranean climate, *Plant and Soil*, n° 278, p. 149-158.