

Génie écologique contre l'érosion des marnes dans les Alpes du Sud

Freddy Rey, Daniel Vallauri et Christophe Chauvin

Les actions de correction torrentielle dans les bassins versants marneux dans les Alpes du Sud, menées par les services de la Restauration des terrains en montagne (RTM), ont montré leur efficacité dans la réduction des crues et laves torrentielles depuis plus d'un siècle. Par exemple, les observations réalisées sur les bassins versants expérimentaux de Draix ont montré l'influence de la revégétalisation d'un bassin versant marneux dégradé sur la production sédimentaire à son exutoire (Richard et Mathys, 1997). Le bassin versant du Brusquet, d'une superficie de 108 ha et végétalisé à 87 %, a une production sédimentaire spécifique à son exutoire 220 fois moins importante que celle du bassin versant du Laval, d'une superficie de 86 ha et végétalisé à 32 %.

La revégétalisation fut un objectif stratégique essentiel pour les pionniers de la RTM. La végétation s'oppose en effet à l'érosion par des mécanismes à diverses échelles : régulation du régime hydrologique des bassins, fixation des sols, retenue des sédiments par effet barrière. Dotée d'une dynamique propre, elle développe son action dans le temps : développement individuel des plantes, colonisation des sols provisoirement piégés par des barrières végétales, consolidation et pérennisation par de nouvelles espèces s'installant sous l'abri des pionnières.

Elle reste toutefois menacée par les phénomènes d'érosion, principalement par l'érosion régressive, menant à des déchaussements et des effondrements. Les reboisements et

réengazonnements n'ont donc pu se faire qu'appuyés sur d'importants dispositifs de génie civil, séries de barrages superposés ou radiers, destinés à caler les lits des torrents.

Lutte active et lutte passive

Il se trouve qu'en France, dans une logique devenue plus strictement sécuritaire, le génie civil a progressivement supplanté le génie biologique auprès des services RTM, alors qu'il était au départ censé le conforter. Les ambitions de « restauration des terrains de montagne » ont été souvent réduites à la seule régulation des flux de sédiments, notamment des laves torrentielles, selon la formule : « livrer au détail ce que la nature livre en gros ». On est ainsi passé d'un concept de lutte active, recherchant l'extinction des phénomènes en amont, à un concept de lutte passive, se contentant d'en limiter les effets les plus nocifs à l'aval. Les barrages se conçoivent alors comme des réservoirs d'équilibre plus ou moins temporaires, ralentissant et écrétant les flux en amont des enjeux socio-économiques à protéger : ainsi sont apparus, au niveau des cônes de déjection, les « pièges à matériaux » régulièrement curés.

Mais l'histoire se répète... et ce sont comme au siècle dernier des préoccupations bien plus à l'aval, autrefois les crues fluviales et aujourd'hui l'invasement des retenues d'Électricité de France (EDF) et de l'étang de Berre (Brochot 1993), qui renvoient vers des concepts de correction torrentielle active. Le stockage durable d'1 m³ de

Les contacts

Cemagref, UR
Écosystèmes et
Paysages monta-
gnards, BP 76,
38402 Saint-Martin-
d'Hères Cedex

sédiments dans un barrage RTM classique revient moins cher que son extraction/stockage pour curer les retenues EDF ou l'étang de Berre. Si on ajoute l'effet du barrage sur le calage des lits et des berges, bloquant l'enfoncement des profils et l'érosion régressive, le coût du m³ de curage évité à moyen terme par un barrage RTM devient tout à fait intéressant... et si enfin, dans un certain nombre de configurations favorables, la végétation peut, par sa propre dynamique, prendre le relais en amont des ouvrages pour le piégeage des sédiments et leur fixation définitive, la cause de la RTM classique redevient tout à fait plaidable économiquement.

Dans une vision plus large, un certain retour à la lutte active rejoint les préoccupations actuelles de gestion durable : de nouvelles opérations d'envergure devraient pouvoir s'intégrer, comme du temps de Fabre, dans une logique globale d'aménagement du territoire, traitant solidairement les problèmes d'amont (terrains et chemins emportés, emploi) avec les problèmes d'aval.

Le génie biologique pourrait alors retrouver chez nous une place qu'il n'a d'ailleurs jamais perdue dans les autres pays alpins. L'expérience acquise depuis 100 ans et l'évolution des concepts en écologie de la restauration (encadré) nous feraient parler aujourd'hui de « génie écologique ». Ce terme plus général englobe à la fois les techniques d'installation des végétaux (génie biologique au sens strict) et la conduite ultérieure des écosystèmes restaurés vers un état souhaité, ici de plus grande autonomie et de plus grande multifonctionnalité.

Le présent article se propose de faire un bilan opérationnel de diverses études concernant le génie écologique, conduites ces dernières années au sein de l'unité Écosystèmes et Paysages montagnards du Cemagref de Grenoble, dans le cas particulier des terrains marneux dans les Alpes du Sud. Ces études, menées en liens étroits avec les services gestionnaires de l'Office national des forêts (ONF) et du RTM, s'intègrent dans les programmes de recherche des ministères de l'Agriculture (DERF : programme Gestion des forêts de montagne) (Vallauri *et al.*, 1998), de l'Environnement (DNP, DPPR : programme fédérateur risques et conventions spécifiques, SRAE/EGPN : programme recréer la nature) (Rey *et al.*, 2000a ; Millot, 2000), et de la Recherche (programme national de recherche en hydrologie du CNRS) (Richard *et al.*, 2000).

La première partie de l'article dresse une synthèse des connaissances acquises sur l'influence de la végétation sur l'érosion des marnes, à diverses échelles spatio-temporelles (Rey *et al.*, soumis), ainsi que sur son impact en terme d'écologie de la restauration (Vallauri, 1997).

Dans une deuxième partie, nous verrons comment ces connaissances peuvent permettre de proposer des stratégies de maîtrise de l'érosion sur marnes dans les Alpes du Sud par l'utilisation du génie écologique (Rey *et al.*, 2000b), un des objectifs majeurs étant de chercher à optimiser l'utilisation des végétaux pour la réduction de la production sédimentaire à l'exutoire des bassins versants marneux.

Influence de la végétation sur l'érosion au cours de la restauration d'un bassin versant marneux dégradé

La végétation peut permettre de lutter contre l'érosion. Comprendre son influence nécessite de prendre en compte les échelles de temps ; en effet, la couverture végétale n'est pas figée et la protection contre l'érosion offerte par la végétation varie dans le temps. La dynamique végétale s'oppose ainsi à la dynamique érosive au sein des bassins versants ; la végétation se développe ou au contraire régresse selon sa susceptibilité à dominer l'érosion ou à subir ses contraintes.

L'analyse de l'influence de la végétation sur l'érosion à diverses échelles de temps peut être présentée chronologiquement à partir des opérations de restauration d'un bassin versant marneux dégradé.

Processus érosifs dans un bassin versant marneux dégradé

Dans les Alpes françaises du Sud, les terrains marneux dégradés sont soumis à une érosion intense. Le taux d'ablation moyen annuel des *badlands*, nom donné aux formes raviniées dans les marnes noires, est d'environ 1 cm/an (Richard et Mathys, 1997 ; Robert, 1997 ; Lecompte *et al.*, 1998). L'ablation des marnes est essentiellement due à la gélifraction ainsi qu'à la thermoclastie. Ces processus sont responsables de la formation d'un régolite, épaisseur de sédiments meubles apparaissant sur les versants et ayant une pente d'équilibre d'environ 45°. Ces sédiments meubles sont alors mis en mouvement soit par gravité, soit par

l'effet *splash* et le ruissellement lors des pluies. Ils se rassemblent au fond des ravines, d'où ils sont évacués par des écoulements temporaires au cours des orages. À la suite d'orages intenses, peu de dépôts de sédiments subsistent dans les lits de ravines dénudées, en raison de fortes pentes (> 20 %).

À l'échelle du bassin versant – défini comme un ensemble de lits principaux drainant des ravines – les écoulements au niveau des lits principaux entretiennent des processus d'érosion régressive, responsables de l'instabilité des ravines et des versants

sapés à leur base. L'enfoncement des lits maintient ainsi sur les versants des pentes fortes, activant les processus d'érosion et empêchant toute végétation de s'installer.

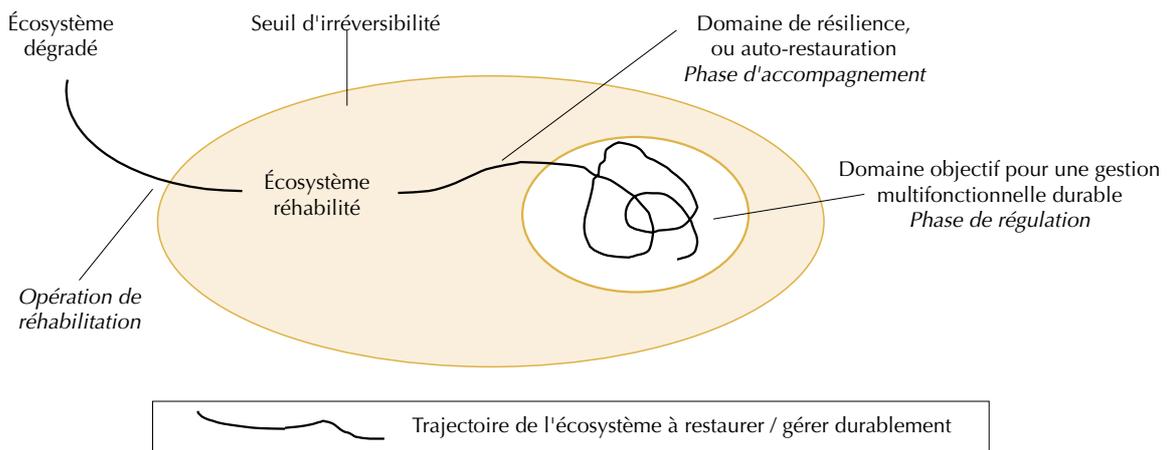
Réhabilitation d'un bassin versant marneux érodé : phase d'installation de la végétation

Pour restaurer par génie écologique un bassin versant marneux dégradé, il faut permettre l'installation de la végétation qui ne peut se développer que sur des terrains temporairement sta-

Encadré

Les concepts de l'écologie de la restauration

D'un point de vue scientifique, le génie écologique, ou ingénierie écologique, relève de l'écologie de la restauration, dont les principaux concepts sont résumés dans le schéma suivant :



Dans cette terminologie, les deux phases de restauration d'un écosystème dégradé sont la réhabilitation et l'accompagnement :

- la phase de *réhabilitation* de l'écosystème, par des opérations de génie biologique au sens strict, consiste à lui redonner les éléments d'une dynamique propre de développement : amélioration des conditions de milieu, introduction de matériel végétal approprié ;
- la phase d'*accompagnement* qui suit consiste à piloter l'écosystème réhabilité vers un état ou domaine a priori souhaitable, qualifié d'écosystème objectif ou d'« écosystème de référence ». Il s'agit d'une phase d'orientation, au cours de laquelle l'écosystème s'enrichit naturellement et dans lequel on intervient plutôt par sélection.

Ces deux phases de restauration mènent à une troisième phase, de régulation ou de *gestion durable*, où l'on cherche à maintenir l'écosystème dans ce domaine souhaitable, et à l'adapter aux évolutions de l'environnement et de la demande sociale. On intervient ici par anticipation et imitation des perturbations.

On retrouve en gros dans ces trois phases les trois opérations classiques de la foresterie : plantation, éclaircie, régénération. La majeure partie des reboisements RTM anciens se trouvent entre la phase d'accompagnement et la phase de régulation : progressivement ouverts dans les 20 dernières années, ils se sont diversifiés en sous-étage, et les opérations de régénération sont aujourd'hui décisives pour leur composition future.

bilisés. Une première phase dans le processus de restauration correspond donc à la réhabilitation du bassin.

CORRECTION PAR GÉNIE CIVIL DANS LES LITS PRINCIPAUX DU BASSIN POUR MAÎTRISER L'ÉROSION RÉGRESSIVE

La végétation permet de lutter contre l'érosion à l'échelle des ravines élémentaires du bassin versant (Rey *et al.*, soumis). Pour cela, il faut en premier lieu maîtriser l'érosion régressive en stabilisant les berges des lits principaux : c'est le domaine du génie civil – qui peut par ailleurs être avantageusement accompagné d'une végétalisation des berges. Le cas des marnes noires est particulièrement propice, car la roche est dure dès quelques centimètres sous le régolite, ce qui permet d'installer facilement des ancrages au pied des ravines.

INTERVENTIONS PAR GÉNIE BIOLOGIQUE DANS LES RAVINES ÉLÉMENTAIRES

Les ouvrages de génie biologique

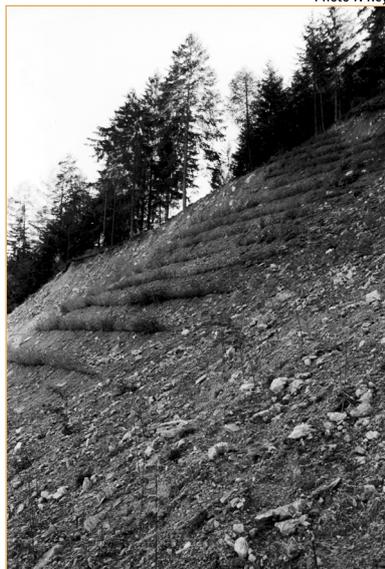
Les ouvrages de génie biologique sont destinés à jouer un rôle prépondérant dans la lutte contre l'érosion à court terme. Ces ouvrages sont de trois types : les cordons, les fascines et clayonnages, les garnissages. Ils sont constitués, entre autres, de boutures, c'est-à-dire de parties de plants – essentiellement des saules – qui, mises en con-

tact avec le sol, vont émettre des rejets à partir des bourgeons. Les boutures ont la faculté de se développer rapidement en offrant une couverture du sol efficace en terme de protection contre l'érosion.

Ces différents ouvrages de génie biologique se distinguent par leurs constituants et leur morphologie. Les cordons de boutures sont constitués uniquement de boutures placées verticalement dans le sol, ou bien installées horizontalement sur une banquette. Une grande quantité de boutures disposées en courbe de niveau sur un versant ou une berge permet d'obtenir une haie végétale (photo 1). Les fascines sont constituées de boutures regroupées en fagots, empilés derrière des pieux métalliques, de bois mort ou de boutures (photo 2). Les clayonnages comportent les mêmes constituants que les fascines, mais ici les boutures sont tressées une à une autour des pieux (photo 3). Enfin, les garnissages consistent à recouvrir le sol d'un tapis de boutures (photo 3).

Les ouvrages de génie biologique peuvent être accompagnés de plantations ou d'engazonnement. Les plantations ne sont cependant efficaces que si elles sont réalisées sur des terrains stabilisés et meubles, c'est-à-dire sur des zones d'atterrissement, en amont d'ouvrages de génie biologique ou de génie civil. Quant à l'engazonnement, il est très peu utilisé sur marnes ; des

Photo F. Rey



▲ Photo 1 – Cordons de boutures.

Photo F. Rey



▲ Photo 2 – Fascine.

Photo F. Rey



▲ Photo 3 – Clayonnages et garnissages.

expériences d'engazonnement sous toile de jute ont certes montré une certaine efficacité du dispositif pour la réduction de l'érosion, mais le coût d'un tel traitement apparaît rapidement dissuasif (Crosaz et Dinger, 1997).

Les ouvrages de génie biologique ont pour fonction première de créer sur quelques années des conditions de stabilité temporaire des sols, nécessaires pour permettre aux plants de s'enraciner et s'installer. Ils permettent ainsi de retenir les matériaux meubles. Durant les premières années, c'est essentiellement l'ouvrage lui-même qui va jouer un rôle prépondérant dans la lutte contre l'érosion, plus que les végétaux qui verront quant à eux leur influence sur l'érosion augmenter au cours de leur développement. L'efficacité d'un ouvrage correspond ainsi à son aptitude à permettre l'installation et le développement de végétaux qui assureront après plusieurs années un rôle de protection efficace et durable contre l'érosion.

Connaître l'efficacité des différents ouvrages biologiques de petite correction torrentielle dans la lutte contre l'érosion peut permettre de guider le choix des ouvrages à utiliser lors de la réhabilitation de ravines dégradées.

Étude de l'efficacité des ouvrages de génie biologique

Le suivi sur plusieurs années de l'efficacité d'ouvrages installés dans des bassins versants érodés est une opération qui nécessite un temps long. Un autre moyen de connaître cette efficacité est d'étudier le résultat d'ouvrages anciens réalisés par les services RTM.

Une étude a ainsi été menée sur les départements de l'Isère et des Hautes-Alpes (Rey, sous presse ; Rey *et al.*, 2000b) – cette étude n'a pas été limitée aux terrains marneux mais les résultats permettent une première approche de l'efficacité des ouvrages de génie biologique. Après un recensement sur cartes et documents des ouvrages réalisés depuis plus d'un siècle, une analyse et une interprétation des réussites et échecs obtenus par l'utilisation des différents ouvrages ont été réalisés. 108 réalisations d'ouvrages ont ainsi été étudiées sur les deux départements. L'efficacité des ouvrages a notamment été étudiée selon leur répartition spatiale au sein du bassin versant. Les ouvrages réalisés dans des talwegs principaux de bassins versants ont été distingués de ceux installés dans des ravines élémentaires. La surface drainée, et par conséquent les contraintes hydrologiques et érosives, sont plus importantes dans le premier cas. Ensuite, l'efficacité des ouvrages a été jugée selon leur position dans le talweg principal ou la ravine. Cette distinction permet de séparer les ouvrages soumis plutôt à une érosion concentrée (lits et berges) ou plutôt à une érosion diffuse (versants).

Un ouvrage a été jugé efficace lorsqu'il a permis d'installer une couverture végétale sur plus de 50 % de la surface d'un sol initialement érodé. Les résultats apparaissent dans les tableaux suivants (tableaux 1 et 2).

La plus ou moins grande efficacité des ouvrages de génie biologique s'explique par leur différence de nature et de morphologie, dans un contexte érosif donné.

Technique	Position dans le talweg principal		
	lit	berge	versant
Cordons		++ / +++	++ / +++
Fascines et clayonnages	-	+++	++
Garnissages	+		

Efficacité : +++ : > 75 % ; ++ : entre 50 et 75 % ; + : entre 25 et 50 % ; - : < 25 % ; grisé : pas d'utilisation.

Technique	Position dans la ravine secondaire		
	lit	berge	versant
Cordons		+	++
Fascines et clayonnages	-	+++	++ / +++
Garnissages	++ / +++		

Efficacité : +++ : > 75 % ; ++ : entre 50 et 75 % ; + : entre 25 et 50 % ; - : < 25 % ; grisé : pas d'utilisation.

◀ Tableau 1 – Efficacité des ouvrages de génie biologique installés dans des talwegs principaux de bassins versants, d'après une étude réalisée sur deux départements français alpins (38 et 05).

◀ Tableau 2 – Efficacité des ouvrages de génie biologique installés dans des ravines élémentaires de bassins versants, d'après une étude réalisée sur deux départements français alpins (38 et 05).

Dans les lits d'un talweg principal ou d'une ravine, les garnissages donnent de bons résultats car ce sont des ouvrages flexibles, contrairement aux fascines et clayonnages qui constituent des ouvrages rigides. Ainsi, lors des crues, les boutures des garnissages ne s'opposent pas aux écoulements concentrés ; elles sont plaquées au sol et sont recouvertes par des dépôts de sédiments meubles. Les boutures vont alors rejeter au contact de ces sédiments et se développer à nouveau. Les fascines et les clayonnages sont, pour leur part, des ouvrages qui s'opposent aux écoulements concentrés. Dans une ravine, ces ouvrages peuvent être efficaces si la surface drainée n'est pas trop importante – même si les résultats de l'étude indiquent une très faible efficacité. Dans les talwegs principaux, il est par contre utopique de chercher à installer des ouvrages biologiques rigides ; seuls des ouvrages de génie civil peuvent résister à de fortes contraintes hydrologiques.

Sur les berges et les versants, il n'apparaît pas de différences d'efficacité très marquées entre les ouvrages. Les fascines et les clayonnages se montrent toutefois particulièrement efficaces dans les ravines ; l'explication provient certainement du fait que leur morphologie leur permet une importante rétention des sédiments érodés favorable au développement des boutures et plants, les cordons de boutures étant moins « filtrants » et donc moins efficaces.

Accompagnement de l'écosystème réhabilité : phase de développement de la végétation

Dans les ravines élémentaires du bassin versant réhabilité, la dynamique végétale va permettre aux plants et boutures installés de se développer, en biomasse et en recouvrement du sol. Dans l'hypothèse la plus favorable, ces plants sont appelés à prendre le relais des ouvrages de génie biologique – voués à disparaître progressivement – dans la protection contre l'érosion. Pour cela, il faut d'abord que ces plants soient suffisamment développés pour résister à l'érosion aréolaire.

PROCESSUS DE PIÉGEAGE DES SÉDIMENTS PAR LA VÉGÉTATION À L'INTÉRIEUR DES RAVINES

Une fois que la végétation est capable de se maintenir en place, elle va jouer un rôle important de piégeage et de rétention d'une partie des sédiments érodés à l'intérieur du bassin versant

(Brochot, 1993 ; Lacheney, 1998 ; Rey *et al.*, soumis). En effet, le suivi du déplacement de sédiments marneux peints à l'amont de barrières végétales a montré que des sédiments peuvent être piégés dans des touffes végétales (photo 4). Ces observations ont été confirmées par le suivi de l'enfouissement de clous installés à l'amont de ces barrières (photo 5). Enfin, des tranchées réalisées à l'amont de ces mêmes barrières ont révélé l'existence d'importantes accumulations de sédiments meubles (photo 6).

Si ces sédiments sont maintenus sur quelques années, on peut assister à la dynamique végétale suivante : des plants colonisateurs vont s'installer sur les matériaux piégés, par propagation – principe du bouturage – ou par dissémination, et développer leurs systèmes racinaires. Ces derniers permettront alors de fixer les matériaux piégés (figure 1). Ces processus ont lieu aussi bien sur versants que dans les lits des ravines, à l'échelle d'une ravine entière ou ponctuellement à l'intérieur de la ravine.

La dynamique végétale progressive permet ainsi une « remontée biologique » sur le profil en long de la ravine. Une conséquence est que la dynamique végétale va modifier le profil en long de la ravine. Ainsi, une barrière végétale s'installant à l'aval d'une ravine à profil rectiligne va créer un atterrissement et engendrer une modification du profil rectiligne en profil concave ; si la végétation s'installe tout le long du profil, elle créera de nombreux atterrissements et aboutira à la formation d'un profil en « escalier ».

Il arrive alors un moment où la couverture végétale devient suffisante pour bloquer l'ensemble des sédiments érodés à l'amont de la ravine. On passe ainsi d'un contexte rhexistasique – dynamique érosive dominante, avec production sédimentaire effective à l'exutoire de la ravine – à un contexte biostasique – dynamique végétale dominante permettant l'extinction de la ravine, c'est-à-dire un arrêt de la production sédimentaire à son exutoire – à l'échelle de la ravine : la dynamique végétale maîtrise la dynamique érosive.

CONSÉQUENCES SUR LA PRODUCTION SÉDIMENTAIRE À L'EXUTOIRE DES RAVINES

Ce rôle de piégeage des sédiments par la végétation, observé à l'échelle du versant ou du lit de ravine, a des répercussions importantes sur la production sédimentaire à l'exutoire des ravines marneuses. Ce constat émane du suivi pendant 1 à 2



Photo F. Rey

▲ Photo 4 – Dispositif de suivi du déplacement sur un versant de sédiments marneux peints.



Photo F. Rey

▲ Photo 5 – Enfouissement d'un clou après un orage, à l'amont d'une touffe de Bauche.

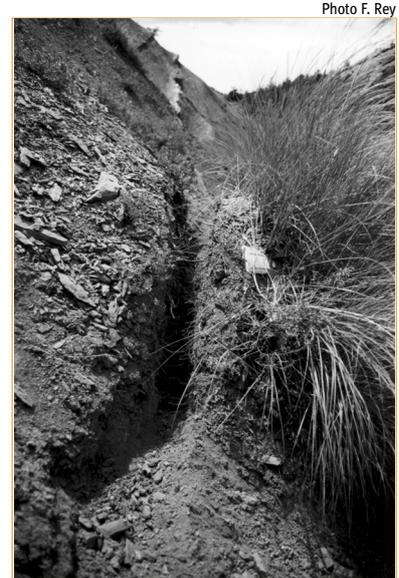


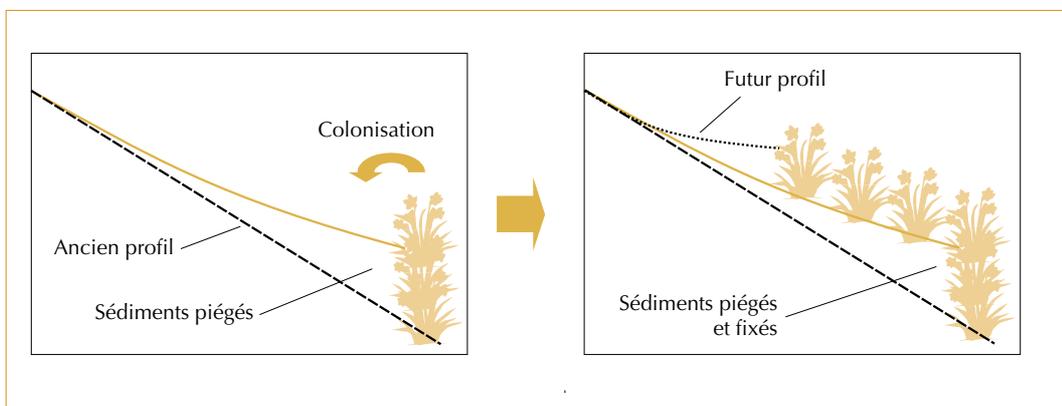
Photo F. Rey

▲ Photo 6 – Réalisation d'une tranchée à l'amont d'une barrière végétale.

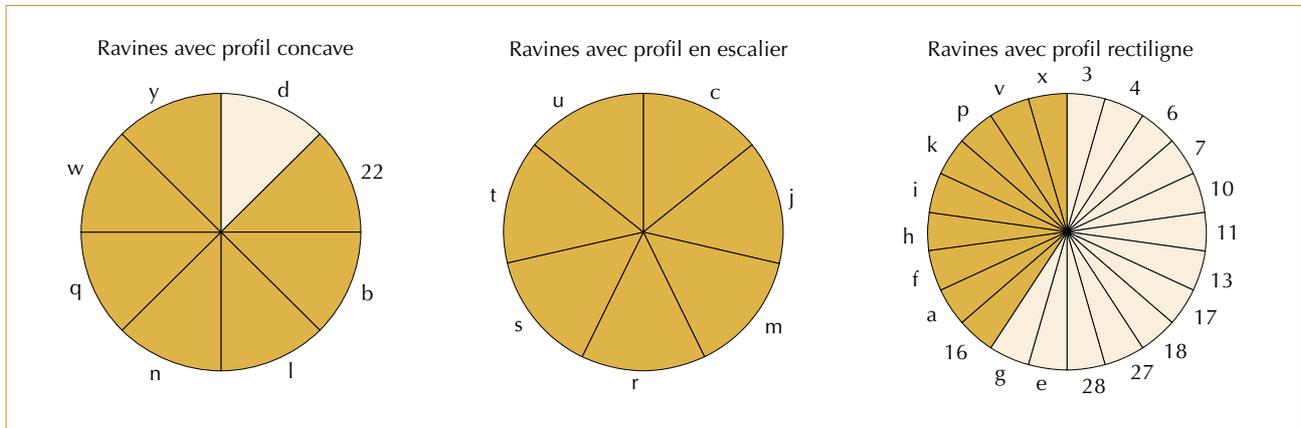
ans de la production sédimentaire de 38 ravines marneuses diversement végétalisées, grâce à des pièges à sédiments installés à l'exutoire de ces ravines (photo 7, p. 48). Les ravines ont été déterminées comme « actives » ou « éteintes » selon qu'elles produisaient ou non des sédiments à leur exutoire. Les résultats montrent que la production sédimentaire des ravines n'est pas corrélée avec le pourcentage de couverture végétale totale des ravines (figure 2, p. 48) mais avec le pourcentage de lit occupé par une couverture végétale au sol (figure 3, p. 48) (Rey *et al.*, 2000a) – on entend par couverture végétale « au sol » les strates herbacées et sous-arbustives, quelles que soient les essences. L'explica-

tion réside dans le fait que la végétation située dans les lits des ravines joue un rôle important de piégeage des sédiments érodés à l'amont. Une corrélation a également été établie entre le profil en long des ravines et leur stabilité (figure 4, p. 49).

Il apparaît un seuil assez net de 50 % de couverture végétale au sol dans les lits, au-delà duquel on ne trouve quasiment que des ravines éteintes (figure 3). Au-dessus de 80 %, on trouve exclusivement des ravines éteintes. En-dessous de 50 %, on trouve aussi bien des ravines éteintes et des ravines actives. Toutefois, il apparaît qu'en dessous de 30 %, on ne trouve quasiment que des ravines actives.



◀ Figure 1 – Colonisation végétale et fixation des matériaux piégés sur un profil en long de ravine.



▲ Figure 4 – Relations entre profil en long et activité des ravines (en foncé : ravines éteintes ; en clair : ravines actives).

restière de pin noir d'Autriche a été installée de manière très dense. Mais ces forêts connaissent aujourd'hui des problèmes d'instabilité dus à leur âge avancé, leur monospécificité, leur état sanitaire dégradé par les attaques parasitaires, leur densité trop forte et leur manque d'entretien (Vallauri *et al.*, 1997). Des reprises d'érosion suite à une déstabilisation des arbres peut être envisagée dans certaines ravines, ce qui pourrait avoir des répercussions sur les productions sédimentaires aux exutoires des bassins versants. La couverture végétale doit donc être pérennisée pour assurer une protection durable contre l'érosion. En parallèle, l'entretien du génie civil peut être minimal par endroits.

L'amorce naturelle d'une deuxième génération végétale peut être effective ou non, et nécessiter une intervention humaine d'accompagnement de la dynamique végétale (éclaircies dans les peuplements forestiers, reboisements complémentaires...) (Vallauri, 1999).

Pour savoir s'il lui est nécessaire d'intervenir, le gestionnaire forestier doit connaître les potentialités du bassin réhabilité en terme de régénération du peuplement forestier. Dans cette optique, une analyse écologique 120 ans après réhabilitation par le pin noir d'Autriche a été menée dans les Alpes du Sud. L'étude a été réalisée sur le bassin versant torrentiel marneux du Saignon, dans les Alpes-de-Haute-Provence ; elle a dressé un bilan de la dynamique de la restauration écologique sur plusieurs points (Vallauri, 1997).

Concernant les stations forestières, la capacité de régénération de la plupart d'entre elles, hor-



◀ Photo 8 – Ravine éteinte bien que non complètement végétalisée (vue du sommet de la ravine) : la végétation, très présente dans le lit de la ravine, suffit à bloquer l'ensemble des sédiments érodés à l'amont.

mis les stations les plus sèches d'adret, a été mise en évidence. Cette capacité de régénération est favorisée par la restauration des sols autrefois décupés ; on trouve aujourd'hui des régosols peu différenciés mais objets d'une activité lombricienne perceptible et d'une prospection racinaire importante (Vallauri *et al.*, 1998). La restauration de la diversité des arbres est potentiellement forte sous couvert du pin noir mais elle s'exprime aujourd'hui de manière aléatoire. L'expérience issue de certaines coupes réalisées montre que la deuxième génération de peuplement forestier est en général une phase post-pionnière constituée d'érable à feuille d'obier et d'alisier blanc (Rey, 2000). Nous avons également observé le retour en deuxième génération de la végétation climacique constituée, pour la zone étudiée, d'une forêt de chêne pubescent. Dans tous les cas, la présence des oiseaux disséminateurs constatée sur les sites (Finet, 1999) laisse

présager de bonnes potentialités pour la restauration de la diversité des arbres. Le renouvellement naturel des peuplements de pin noir par une végétation forestière feuillue constituerait un gage de pérennité de la couverture végétale, car le pin noir étant aujourd'hui décimé par le gui (Vallauri, 1998), y compris parmi les jeunes plants, son avenir reste plus que compromis.

Il apparaît donc que s'il existe un certain potentiel de régénération de la couverture forestière, la pérennisation naturelle de cette couverture végétale n'est pas certaine ; un accompagnement de cette régénération peut ainsi s'avérer utile, voire indispensable.

Conclusion sur le rôle de la végétation

La végétation peut jouer un rôle de protection contre l'érosion très important, aussi bien sous son couvert, grâce au recouvrement du sol, qu'à distance, par des effets de piégeage. Cette influence de la végétation sur l'érosion des marnes dans les Alpes du Sud varie dans l'espace et dans le temps. Une approche multi-échelles est donc indispensable pour comprendre le fonctionnement érosif actuel des bassins versants marneux dans les Alpes du Sud. La protection augmente avec la dynamique végétale, tant que les contraintes érosives les plus déstabilisantes telles que l'érosion régressive sont maîtrisées au minimum à l'échelle du bassin versant. Enfin, si à l'échelle d'une génération forestière la végétation joue un rôle de protection optimal, une protection durable ne peut s'envisager qu'en anticipant la dynamique végétale sur plusieurs générations de peuplements végétaux et forestiers.

Intérêt des connaissances sur les interactions végétation-érosion pour l'utilisation du génie écologique contre l'érosion des marnes dans les Alpes du Sud

Les acquis de connaissances présentés dans la première partie de l'article peuvent être mis à profit pour développer des stratégies d'utilisation du génie écologique pour la maîtrise de l'érosion sur marnes dans les Alpes du Sud.

La protection contre l'érosion doit être assurée à moindres frais en raison des restrictions budgétaires actuelles pour ce domaine de la gestion des territoires. Ainsi, le principe de « gestion op-

timale » impose autant que possible de définir spatialement des priorités d'intervention, afin d'orienter les crédits à disposition ; cela va jusqu'à déterminer des zones de non-intervention.

Réhabilitation des écosystèmes érodés

ÉTENDUE DE LA CORRECTION À ENVISAGER

Au sein d'une ravine à réhabiliter, il est possible de déterminer l'étendue de la correction nécessaire et suffisante pour obtenir une extinction de cette ravine. Pour cela, on peut utiliser le principe selon lequel la distribution spatiale de la végétation sur une ravine est importante pour la réduction de la production sédimentaire à son exutoire, la végétation située dans les lits des ravines élémentaires jouant un plus grand rôle dans la maîtrise de l'érosion que la végétation située sur les versants ou les interfluves. C'est donc la présence de cette couverture végétale à l'aval de la ravine qu'il faut assurer pour espérer obtenir une extinction à l'échelle d'une ravine. Nous avons vu qu'au-delà de 30 % de végétalisation d'un lit de ravine, il est possible d'obtenir une extinction de la ravine (cf. figure 3). On peut donc chercher à obtenir par des opérations de végétalisation ce taux minimum de 30 % de couverture végétale dans les lits. Les opérations de végétalisation par génie biologique doivent ainsi s'effectuer dans les lits des ravines élémentaires, puis sur les berges et éventuellement sur les bas de versant. La végétalisation des hauts et milieux de versant n'est pas indispensable.

Pour s'assurer d'atteindre ce taux minimal de 30 %, on peut préconiser une intervention partielle sur les 50 % aval du lit de la ravine. Bien entendu, un suivi et un entretien des ouvrages de génie biologique sont indispensables pour veiller à ce que ce taux soit bien atteint, et surtout que la végétation occupe bien les zones-clés du lit de la ravine.

CHOIX DES TECHNIQUES À UTILISER

À l'intérieur des ravines, on peut tenter de définir une stratégie pour le choix des ouvrages de génie biologique à utiliser, suivant la localisation d'intervention sur la ravine. Cette stratégie est présentée dans le tableau 3.

ENTRETIEN

La réussite des opérations de génie biologique n'est souvent pas optimale lors de la réhabilitation d'un bassin versant marneux érodé. La cou-

Position sur la ravine	lit	berge	bas de versant
Ouvrages à utiliser	fascines et clayonnages + garnissages de boutures	cordons de boutures	fascines et clayonnages

▲ Tableau 3 – Proposition d'une stratégie de choix des ouvrages de génie biologique en fonction de la position d'installation de l'ouvrage sur la ravine.

verture végétale installée est généralement très hétérogène et l'état de stabilisation de chaque ravine peut varier. Il peut alors s'avérer nécessaire de réaliser des interventions complémentaires dans certaines ravines.

À ce titre, il nous a semblé intéressant de développer un outil de diagnostic de l'état de stabilisation ou d'activité érosive de ravines partiellement végétalisées. En se basant sur les résultats des études portant sur l'importance de la distribution spatiale de la végétation au sein des ravines, nous proposons ainsi une typologie de ravines (Rey *et al.*, 2000a).

Pour établir cette typologie, deux paramètres ont été jugés déterminants : la couverture végétale au sol dans les lits et le profil en long des ravines. Ces deux paramètres permettent d'expliquer ou de diagnostiquer la production sédimentaire à l'exutoire de ravines diversement végétalisées. La typologie de ravines proposée est la suivante (figure 5).

La typologie permet de distinguer 3 grands groupes de ravines : les ravines éteintes stables, les ravines actives à tendance rhéxistatique et les ravines éteintes ou actives qualifiées de « fragiles ». À l'intérieur de ces grands groupes, nous avons identifié 6 types de ravines indiqués sur la figure 5 (en chiffres arabes). La détermination de ces 6 types de ravines repose d'une part sur les mesures de production sédimentaire aux exutoires des 38 ravines suivies pendant à 1 à 2 ans, d'autre part sur l'observation du comportement érosif de certaines ravines au cours des deux années d'observation, permettant de déterminer le caractère de plus ou moins grande stabilité ou fragilité attribué aux ravines.

La typologie peut être utilisée pour planifier des interventions par type de ravine (tableau 4, p. 52).

Accompagnement et gestion durable de l'écosystème réhabilité

La quasi-totalité des terrains marneux restaurés dans les Alpes du Sud sont aujourd'hui recou-

verts d'une forêt de pin noir d'Autriche déstabilisée, pour laquelle un renouvellement doit être envisagé pour pérenniser la couverture végétale et garantir la durabilité de la protection contre l'érosion.

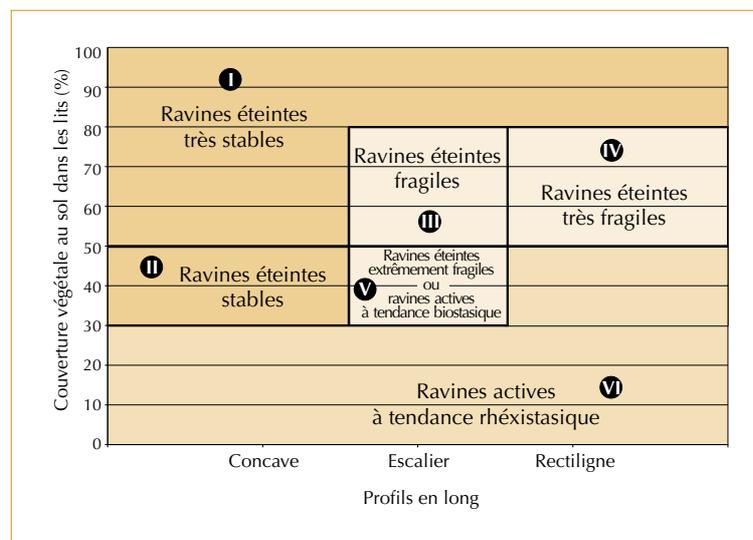
PRIORITÉS D'INTERVENTIONS FORESTIÈRES

Des priorités d'interventions forestières peuvent être définies à trois échelles spatiales différentes.

À l'échelle d'un bassin versant

Une réflexion à l'échelle du bassin versant – donc de l'aménagement forestier – doit d'abord être menée. Ainsi, nous avons proposé dans un article précédent (Rey *et al.*, 1998) une méthode de détermination et de cartographie de Zones d'interventions forestières prioritaires (ZIFP), appliquée aux peuplements de pin noir d'Autriche sur marnes. Cette méthode fait intervenir des critères d'une part d'importance et de probabilité d'occurrence de l'aléa, d'autre part de stabilité des forêts. Elle préconise ainsi des interventions prioritaires en cas de forte probabilité d'occurrence de l'aléa – dans le cas des

▼ Figure 5 – Typologie de ravines partiellement végétalisées pour un diagnostic de leur état de stabilisation ou d'activité érosive.



► Tableau 4 –
Stratégies d'interven-
tion par type de
ravine.

Type de ravine	Règles d'intervention
I	Pas d'intervention
II	Entretien et renforcement de l'écran végétal situé à l'aval de la ravine : <i>une fascine (ou un clayonnage) à l'aval de la ravine</i>
III	Renforcement de la stabilisation du lit pour augmenter la couverture végétale : <i>une fascine (ou un clayonnage) et garnissages de boutures à l'aval de la ravine</i>
IV	Renforcement important de la stabilisation du lit pour augmenter la couverture végétale : <i>fascines (ou clayonnages) sur points d'appui et garnissages de boutures dans le lit, cordons sur berges</i>
V	Correction du lit nécessaire par le bas : <i>fascines (ou clayonnages) sur points d'appui et garnissages de boutures dans le lit, cordons sur berges, fascines (ou clayonnages) en bas de versant</i>
VI	Réhabilitation

substrats marneux, les efforts seront concentrés sur les marnes plutôt que sur les terrains marno-calcaires ou calcaires – et de faible stabilité de la forêt de protection.

Cette méthode permet une approche globale, à l'échelle d'un bassin versant. La détermination des zones prioritaires d'intervention peut ainsi être réalisée par parcelle forestière de quelques hectares.

À l'échelle de la parcelle forestière

Les connaissances acquises sur l'influence de la végétation sur l'érosion des marnes permettent d'affiner les stratégies de choix des zones à traiter en priorité, à l'échelle plus précise de la parcelle forestière. Il est en effet possible, à l'intérieur d'une parcelle de même note de ZIFP, de mettre en évidence les ravines où la protection contre l'érosion par la végétation forestière est susceptible d'être remise en cause à brève échéance : ces ravines sont à traiter prioritairement. La typologie de ravines présentée plus haut permet de caractériser la plus ou moins grande stabilité des ravines et donc de déterminer les priorités d'intervention selon les ravines rencontrées. Ainsi, à l'intérieur d'une ZIFP, les interventions forestières visant à renouveler la couverture végétale seront prioritairement réalisées de la manière suivante :

- 1^{re} priorité : ravines éteintes extrêmement fragiles (type V) ;
- 2^e priorité : ravines éteintes très fragiles (type IV) ;

- 3^e priorité : ravines éteintes fragiles (type III) ;
- 4^e priorité : ravines éteintes stables (type II) ;
- 5^e priorité (ou non-intervention) : ravines éteintes très stables (type I).

À l'échelle de la ravine

Une fois effectué le choix des ravines à traiter en priorité, on peut tenter de déterminer l'étendue de l'intervention suffisante pour maintenir l'extinction d'une ravine.

On peut définir à l'intérieur de la ravine des zones de « non-intervention ». Il est en effet possible de laisser des zones en érosion non végétalisées sans que les sédiments érodés sur ces zones ne rejoignent l'exutoire de la ravine. Dans ces zones, une reprise d'érosion suite à une disparition de la couverture végétale ne serait pas préjudiciable en terme de production de sédiments à l'exutoire des ravines concernées. Ces zones de non-intervention correspondent à la partie amont de chaque ravine élémentaire, partie d'ailleurs souvent la plus difficilement exploitable par coupe forestière. On peut ainsi préconiser de maintenir une couverture minimale de 30 % dans les lits dans le cas d'un renouvellement de forêt vieillie.

GESTION SYLVICOLE

Des règles de gestion sylvicole des peuplements de pin noir d'Autriche pour une pérennisation de la couverture végétale ont été exposées à l'échelle de la forêt domaniale (Rey et Chauvin,

1998 ; Vallauri, 1999). Des propositions d'intervention par coupe ont ainsi été proposées, sur une base bibliographique couplée à une analyse de l'effet de différents types de coupes – pratiquées ces dernières années – sur la régénération forestière (Rey, 2000). Ainsi, des coupes de régénération par trouées sont recommandées si les semis présents sous le couvert des pins noirs sont abondants (> 1 500 plants/ha) et s'ils sont jugés suffisamment diversifiés, alors que des coupes de régénération pied à pied sont à envisager si les semis sont absents ou peu présents (< 1 500 plants/ha), ou bien s'ils sont abondants mais trop peu diversifiés.

Les connaissances récentes acquises sur les interactions végétation-érosion permettent d'affiner les propositions d'intervention à l'échelle des ravines. Nous sommes en effet en mesure d'apporter des précisions sur la taille et la disposition des zones à exploiter. Ainsi, il faut en effet éviter de pratiquer une « coupe rase » à l'échelle d'une ravine entière. Nous avons vu qu'il n'était pas indispensable d'exploiter l'amont d'une ravine ; seule la couverture à l'aval de la ravine est indispensable en terme de lutte contre la production sédimentaire des ravines. Dans cette zone aval à exploiter, il faut assurer le maintien de la couverture végétale, notamment des arbustes. Dans le cas où une exploitation par trouées est préconisée, il faut veiller à alterner zones végétalisées denses et zones de coupe pendant tout le temps de l'exploitation – qui peut durer jusqu'à dix ans – en réalisant des trouées de quelques ares réparties de manière homogène sur la ravine. En cas de non-reconstitution d'une couverture végétale dans ces zones exploitées et d'une reprise d'érosion, on ne s'exposerait pas à un risque d'augmentation de la production sédimentaire à l'aval, la couverture végétale située à l'aval étant suffisante pour bloquer l'ensemble des sédiments érodés dans la zone dénudée.

Conclusion

Les recherches menées au *Cemagref* de Grenoble sur l'influence de la végétation sur la production sédimentaire des bassins versants marneux dans les Alpes du Sud permettent aujourd'hui de proposer des stratégies économes de maîtrise de l'érosion par le génie écologique dans ces milieux difficiles. Ces éléments doivent être pris en compte autant pour l'aménagement des forêts à rôle de protection contre l'érosion sur marnes que pour repenser une politique de revégétalisation-reboisement à l'échelle du bassin versant de la Durance, sur la base d'une gestion optimale. En outre, les ravines végétalisées présentant un caractère « fragile » pourraient faire l'objet d'un zonage dans les Plans de préventions des risques naturels (PPR), au titre de « zones vertes », objets de prescriptions particulières de protection ou de gestion active (Berger et Liévois, 1998) : la végétation y est considérée comme ouvrage de protection à surveiller et entretenir.

Les études se poursuivent actuellement par une approche plus quantitative du rôle de la végétation dans la rétention des sédiments dans les bassins versants. L'objectif poursuivi est une amélioration des modèles d'érosion existants qui ne tiennent généralement pas compte du rôle de piégeage des sédiments par la végétation, ce qui amène ces modèles à surestimer les productions sédimentaires aux exutoires des bassins versants marneux partiellement végétalisés (Lachenay, 1998).

Pour les applications pratiques, les propositions d'intervention en génie écologique pourraient à l'avenir faire l'objet d'un manuel plus développé, qui manque en France, où il permettrait de relancer ces techniques largement plus utilisées dans les autres pays alpins.



Résumé

Cet article dresse dans un premier temps une synthèse des connaissances acquises sur l'influence de la végétation sur l'érosion des marnes dans les Alpes du Sud. Les différents rôles de la végétation, liés à la dynamique végétale, sont présentés en retraçant les étapes de la restauration d'un bassin versant marneux dégradé. Sont ainsi abordées la phase de réhabilitation du bassin par l'utilisation d'ouvrages de génie biologique, la phase de dynamique végétale et d'accompagnement de l'écosystème réhabilité, enfin la phase de gestion durable par pérennisation de la végétation. Dans une deuxième partie, nous exposons comment ces connaissances peuvent être utilisées pour proposer des stratégies optimales de maîtrise de l'érosion par le génie écologique, avec préconisations d'interventions aux différentes étapes de la restauration d'un bassin.

Abstract

This article first exposes a synthesis about knowledge learnt on the influence of vegetation on erosion in marly lands in the French Southern Alps. The different roles of vegetation, close to the plant dynamics, are presented by relating the stages of the restoration of a degraded marly catchment basin. Here are approached the stage of rehabilitation of the basin with the use of biological engineering works, the stage of plant dynamics and monitoring of the rehabilitated ecosystem, finally the stage of sustainable management with the vegetation perennality. In the second part, we explain how this knowledge can be used to propose optimal strategies for erosion control by ecological engineering, with intervention recommendations at the different stages of a basin restoration.

Bibliographie

- BERGER, F., LIEVOIS, J., 1998. Détermination de zones d'interventions forestières prioritaires et création des zones vertes dans les plans de prévention des risques : un exemple de transfert chercheur-praticien. *Ingénieries – EAT*, n° spécial « Risques naturels », p. 97-104.
- BROCHOT, S., 1993, *Érosion de badlands dans le système Durance-Étang de Berre*, Cemagref-Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Grenoble, 7 fascicules.
- CROSAZ, Y., DINGER, F., 1997. Mesure de l'érosion sur ravines élémentaires et essais de végétalisation, Bassin versant expérimental de Draix. *Actes du colloque « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne »*, Draix, Le Brusquet, Digne, 22-24 Octobre 1997, p. 103-118.
- FINET, F., 1999. *Les vecteurs de dissémination orientant la régénération de Sorbus aria, Quercus pubescens et Acer opalus dans les pineraies noires RTM des Alpes du Sud*, Mémoire de DEA, Cemagref, Grenoble, 53 p.
- FORT, C. 1999. L'eau et la forêt. *Bulletin Technique de l'ONF*, n° 37 spécial, 240 p.
- LACHENY, B., 1998. *Étude et modélisation de l'érosion dans un bassin versant forestier : Le Brusquet*, Mémoire d'ingénieur ISTG, Cemagref, Grenoble, 120 p.
- LAVABRE, J., ANDRÉASSIAN, V., 2000, *La forêt : un outil de gestion des eaux ?*, Cemagref Éditions, Antony, 116 p.
- LECOMPTE, M., LHENAFF, R., MARRE, A., 1998. Huit ans de mesures du ravinement des marnes dans les Baronnies méridionales (Préalpes françaises du sud). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 4, p. 351-374.
- MILLOT, M., 2000, *Dynamique de la restauration des écosystèmes forestiers sur substrat marneux dans le secteur haut-provençal : analyse, un siècle après plantation, de la restauration des écosystèmes initiée avec Pinus nigra Arn. ssp. nigricans Host. et problème de viabilité économique à long terme – Rapport final*, Cemagref, PNR « Recréer la nature », Grenoble, 103 p.
- REY, F., ROBERT, Y., VENTO, O., (soumis). Influence de la végétation forestière sur la production sédimentaire de terrains marneux à l'échelle du versant, de la ravine et du bassin versant : intérêt pour la gestion du risque torrentiel et le contrôle de l'érosion. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.

REY, F., (sous presse). Historical study of the effectiveness of the techniques of bushes-installation with cutting in small torrential correction in the north Alps (France). *Actes de la conférence internationale « The management of erosion », Trento (Italy), 28-29 Mai 1999.*

REY, F., 2000. Minimal management of the Austrian Black Pine on marls for a sustainable protection against erosion (Southern Alps, France). *Actes du 9^e congrès international « Interpraevent 2000 », Villach (Austria), 26-30 juin 2000, Tome 2, p. 155-167.*

REY, F., CHAUVIN, C., RICHARD, D., 2000a, *Influence de la végétation forestière sur la production sédimentaire de terrains marneux : établissement d'une typologie de ravines*, Cemagref-DPPR, Grenoble, 37 p.

REY, F., VALLAURI, D., MILLOT, M., 2000b. La gestion actuelle de l'érosion par la végétation forestière dans les Alpes du Sud. *Forêt Méditerranéenne*, tome XXI, n° 2 spécial « Foresterrané'99 », p. 207-214.

REY, F., CHAUVIN, C., 1998. La gestion du pin noir d'Autriche sur marnes dans les Alpes du Sud : priorités d'interventions forestières et règles de gestion sylvicole. *Ingénieries – EAT*, n° spécial « Risques naturels », p. 131-137.

REY, F., CHAUVIN, C., BERGER, F., 1998. Détermination de zones d'interventions forestières prioritaires pour la protection contre l'érosion dans les Alpes du Sud. *Revue forestière française*, vol. L, n° spécial « Gestion multifonctionnelle des forêts de montagne », p. 116-127.

RICHARD, D., MATHYS, N., RONCHAIL, J., MAQUAIRE, O., BALLAIS J.-L., LECOMPTE, M., 2000. Formation de l'érosion et des crues dans les bassins versants marneux. *Actes du colloque « PNR Hydrologie 2000 », Toulouse, 16-17 Mai 2000*, p. 371-377.

RICHARD, D., MATHYS, N., 1997. Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. *Actes du colloque « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montraque », Draix, Le Brusquet, Digne, 22-24 Octobre 1997*, p. 11-28.

ROBERT, Y., 1997, *Érosion et colonisation végétale dans les bad-lands marneux des Alpes du Sud. L'exemple du bassin du Saignon*, Mémoire de Maîtrise, IGA-UJF, Grenoble, 135 p.

ROVERA, G., ROBERT, Y., COUBAT, M., NEDJAÏ, R., 1999. Érosion et stades biorhexistatiques dans les ravines du Saignon (Alpes de Provence) ; essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. *Actes du Colloque « La montagne méditerranéenne : paléoenvironnements, morphogénèse, aménagements », 8-10 octobre 1998, Aix en Provence*. In *Études de Géographie Physique*, travaux 1999, n° XXVIII, p. 109-115.

VALLAURI, D., 1999. Quel avenir pour les peuplements RTM de pin noir d'Autriche sur substrats marneux dans les Alpes du Sud ?. *Revue forestière française*, vol. LI, n° 5, p. 612-626.

VALLAURI, D., 1998. Dynamique parasitaire de *Viscum album* L. sur pin noir dans le bassin du Saignon (Préalpes françaises du Sud). *Annales des Sciences Forestières*, vol. 55, p. 823-835.

VALLAURI, D., REY, F., BERGER, F., CHAUVIN C., 1998, *Gestion minimale des forêts pour le contrôle des crues torrentielles dans les Alpes du Sud*, Cemagref, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Grenoble, 47 p.

VALLAURI, D., GROSSI, J.-L., BRUN, J.-J., 1998. Les communautés lombriciennes 120 ans après la restauration forestière de sols érodés sur marnes. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, série B*, p. 1023-1033.

VALLAURI, D., CHAUVIN C., MERMIN E., 1997. La restauration écologique des espaces forestiers dégradés dans les Alpes du Sud, Chronique de 130 ans de restauration et problématique actuelle de gestion des forêts recrées en pin noir. *Revue Forestière Française*, vol. XLIX, n° 5, p. 433-449.

VALLAURI, D., 1997, *Dynamique de la restauration forestière des substrats marneux avec *Pinus nigra* J.F. Arnold ssp. *nigra* dans le secteur haut-provençal : trajectoires dynamiques, avancement du processus de restauration et diagnostic sur l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes recrées*, Thèse de doctorat de l'Université de Marseille III, Cemagref, Grenoble, 300 p.