

Le rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres

Freddy Rey^a, Frédéric Berger^a, Caroline Quéte^{la}, Céline Le Hir^a

En milieu de montagne, les biens et les activités humaines sont souvent menacés par des aléas naturels de divers types : crues torrentielles et érosion, glissements, chutes de blocs, avalanches... Ces enjeux sont majoritairement et de plus en plus situés hors des zones naturelles et en aval de celles-ci. Les aléas trouvent leurs origines dans les milieux naturels situés plus en amont et qui subissent souvent un abandon de l'activité agricole, forestière ou pastorale du fait du contexte économique et de la migration urbaine.

La prévention et la lutte contre les risques naturels peuvent, dans ce schéma, passer par deux politiques complémentaires :

– une défense active, par une gestion adaptée des milieux naturels à la source de l'aléa, dont l'objectif est d'empêcher le phénomène de se produire ;

– une défense passive et rapprochée des zones cibles, dont l'objectif est d'empêcher les aléas naturels de nuire. C'est ce deuxième volet qui nous intéresse ici plus particulièrement.

La végétation forestière peut jouer un important rôle de protection passive vis-à-vis de certains aléas naturels. C'est le cas en ce qui concerne l'érosion et les chutes de pierres. La végétation peut y jouer un rôle d'obstacle favorisant la déperdition d'énergie ou le piégeage de matériaux en mouvement. Pour les autres aléas tels que les avalanches et les glissements de terrain, ce rôle de protection passive est quasi inexistant.

Les coûts élevés d'implantation et d'entretien des ouvrages de génie civil et la volonté d'optimiser les investissements publics ont ré-initié, dans les pays de l'arc alpin, une réflexion sur l'adoption de mesures préventives et de valorisation des milieux naturels en tant qu'ouvrage naturel de protection (Berger et Liévois, 1998). Afin de remplir ces exigences, il est nécessaire de disposer de connaissances scientifiques solides pour qualifier et quantifier le rôle de protection de la végétation forestière. L'objectif des études en cours, réalisées notamment dans le cadre d'une action de recherche (action scientifique structurante « Risques naturels »), est ainsi de mieux connaître son rôle de protection passive vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres, afin de proposer des solutions optimales de protection contre ces aléas par le biais de l'ingénierie écologique.

Rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion

État de l'art

La végétation peut retenir les sédiments érodés à l'amont, jouant ainsi un rôle passif ou « à distance » contre l'érosion (Viles, 1990). Lee *et al.* (2000) ont montré qu'il existe un effet de filtration des écoulements au travers de barrières végétales. Ces écoulements déposent les sédiments suite à la réduction de leur énergie de transport. Bien que Beuselinck *et al.* (2000) aient montré que la végétation est plus susceptible de piéger

Contact

a. Cemagref Grenoble,
UR Écosystèmes
et paysages
montagnards,
BP 76,
38402 Saint-Martin-
d'Hères Cedex

les sédiments fins, Cammeraat et Imeson (1999) ont montré que les sédiments grossiers pouvaient également être piégés par des barrières végétales. Des dépôts ont ainsi été observés à l'amont de barrières végétales (Sanchez et Puigdefabregas, 1994), sur des pentes plus fortes que celles sans végétation (Bochet *et al.*, 2000). L'utilisation de haies végétales sur terrasses pour lutter contre l'érosion a souvent été testée avec succès (Poudel *et al.*, 1999). Les haies végétales de vétiver (*Vetiveria sp.*) ont notamment souvent montré leur efficacité pour le piégeage des sédiments (Dalton *et al.*, 1996). Ces processus ont également été observés sur les berges des cours d'eau. Les accumulations de sédiments permettent alors de renforcer la stabilité des berges (Thorne, 1990).

Rey (2002) a également montré une action de piégeage et de fixation de sédiments marneux à l'amont de barrières végétales (photo 1). Les végétaux situés à l'aval d'une ravine, et plus particulièrement les strates herbacée et sous-arbustive situées dans les lits, constituent les barrières les plus efficaces. Une dimension optimale de barrière végétale a été mise en avant : une barrière recouvrant seulement en surface les 20 % aval d'une zone marneuse entièrement en érosion peut suffire pour maîtriser complètement la sortie de sédiments de cette zone.

Objectifs

On cherche à utiliser au mieux l'effet de la végétation dans le piégeage et la rétention des sédiments à l'amont des cours d'eau. Nous avons vu que des études ont été menées sur l'efficacité de piégeage des sédiments par des barrières végétales naturelles. On cherche maintenant à imiter ces processus naturels étudiés, par l'utilisation d'ouvrages de génie biologique pouvant jouer un « effet barrière ». On souhaite

tester l'hypothèse selon laquelle ces ouvrages sont efficaces au même titre que des barrières végétales naturelles.

Il s'agit donc ici de tester la capacité des ouvrages de génie biologique à piéger les sédiments marneux à très court terme, soit dès la première année d'installation. On cherche notamment à quantifier l'efficacité des ouvrages en termes de mètres cubes de sédiments retenus. Les observations ont été réalisées sur une année (2002), dans le département des Alpes de Haute-Provence (Alpes du sud), dans le bassin versant du Saignon, sur la commune de La Motte du Caire. Ce bassin appartient au grand bassin versant de la Durance.

Sur la base des résultats obtenus, on pourra proposer des stratégies optimales d'utilisation du génie biologique (priorités d'intervention, règles minimales), pour une rétention durable des sédiments dans les bassins versants, devant mener à une réduction de la charge solide des cours d'eau.

Description du programme de recherche

MÉTHODOLOGIE

Les observations ont été réalisées dans deux ravines expérimentales (ravines R2 et R3) situées sur des marnes noires. La ravine R2 a une surface de 3 834 m² pour une surface de marnes nues de 1 590 m², soit un taux de couverture végétale de 72 %. La pente moyenne des versants est de 55° et celle du lit de 17°. La ravine R3 a une surface de 2 502 m² pour une surface de marnes nues de 850 m², soit un taux de couverture végétale de 66 %. La pente moyenne des versants est de 45° et celle du lit de 16°.

Nous avons suivi le comportement de 29 cordons sur fascines (photo 2). Ces ouvrages de génie biologique doivent mener au développement de barrières végétales, destinées à piéger les sédiments en transit. Le choix de ce type d'ouvrage se justifie par le fait que le cordon sur fascine, de par sa morphologie, permet de jouer un rôle de piégeage des sédiments dès la première année, en constituant un réservoir à son amont par effet barrage (figure 1). Les reprises de boutures joueront ensuite un rôle dans l'agrandissement dynamique du barrage. La fascine permet quant à elle de maintenir l'ensemble de l'ouvrage en place.

La ravine R2 comporte 13 ouvrages et la ravine R3 en comporte 16. Les ouvrages ont été disposés tous les 3 m en distance dans le lit des ravines.

► Photo 1 – Piégeage de sédiments marneux par une barrière végétale.



Ils ont en moyenne une largeur de 2 mètres. Les fascines ont une hauteur de 50 cm et les boutures utilisées pour les cordons ont une longueur hors-enterrément de 10 cm. Nous avons utilisé le saule cassant (*Salix fragilis*) pour les fascines, car nous disposons de longues boutures, d'environ 2 mètres. Seules quelques fascines ont été réalisées avec du saule blanc (*Salix alba*). Pour les cordons, le saule blanc et le saule pourpre (*Salix purpurea*) ont été utilisés, toujours pour des raisons de disponibilité du matériel végétal. Ces ouvrages ont été réalisés par le service de Restauration des terrains en montagne de l'Office national des forêts des Alpes de Haute-Provence.

Une ravine dénudée de référence, équipée d'un piège à sédiments à son exutoire, avait pour objet de déterminer un taux d'ablation moyen de la marne pour chaque pluie. Un pluviographe a permis de recueillir les caractéristiques des pluies.

Il s'agissait tout d'abord d'analyser qualitativement la reprise des boutures, celle-ci conditionnant la morphologie des barrières végétales et donc l'efficacité du piégeage. Un système de mesure des quantités de sédiments retenues après chaque pluie par les ouvrages de génie biologique a été mis en place.

▼ Photo 2 – Cordons sur fascines.



Des piquets ont ainsi été installés afin de mesurer les variations d'épaisseur de sédiments ; ils ont été placés sur l'atterrissement de sédiments juste à l'amont des cordons. Le volume de sédiments piégés par chaque ouvrage de génie biologique a ainsi été déterminé.

RÉSULTATS

Les pluies

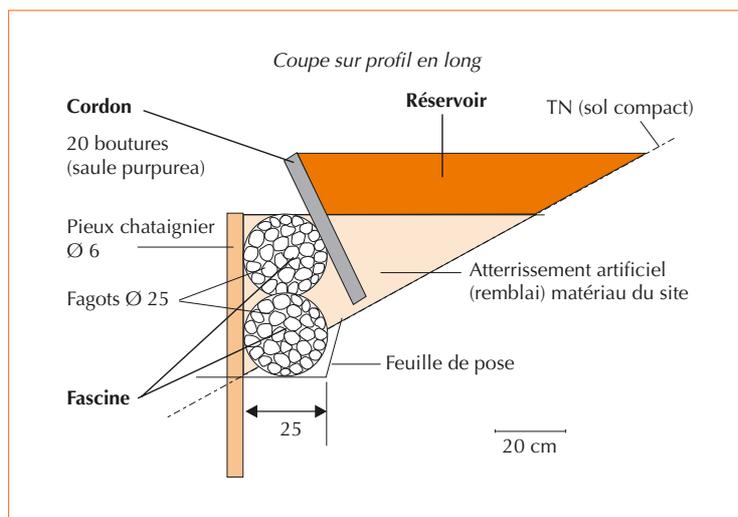
L'année 2002 a été caractérisée par un printemps très sec ; l'été et l'automne ont quant à eux été très pluvieux, avec notamment une pluie centennale (69 mm/h pendant 1 h).

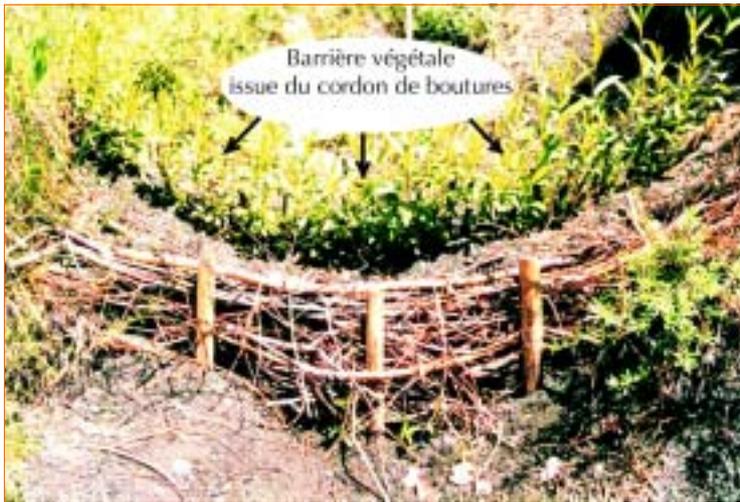
La reprise des boutures

Les boutures utilisées pour les cordons (saule pourpre et saule blanc) ont très bien repris et ont permis de constituer des barrières végétales relativement denses (photo 3, p. 168). La hauteur des boutures atteint jusqu'à 80 cm. Si le feuillage des boutures est bien développé, les systèmes racinaires dans les parties enterrées sont également bien présents, ce qui laisse penser que les boutures seront viables à plus long terme (sur plusieurs années). Les reprises de boutures ont été effectives pour les 29 ouvrages, même si les boutures des ouvrages situés les plus en amont des ravines se sont moins développées.

Le saule blanc apparaît plus intéressant que le saule pourpre au niveau de la morphologie du feuillage (plus dense), donc de l'efficacité du piégeage. Les boutures de saule cassant utilisées pour les fascines n'ont quant à elles pas du tout repris.

▼ Figure 1 – Constitution d'un « réservoir » à sédiments à l'amont d'un cordon de boutures.





▲ Photo 3 – Cordon sur fascine après la reprise des boutures.

La raison en est certainement que l'espèce n'est pas adaptée aux conditions de sécheresse. Par contre, les quelques fascines pour lesquelles le saule blanc a été utilisé ont très bien repris. La technique du fascinage n'est donc pas remise en cause ; par contre, le saule cassant apparaît comme une espèce de saule inadaptée au milieu. Cette non-reprise des boutures des fascines peut remettre en cause la durabilité de l'ouvrage qui constitue un ouvrage « mort », dont la pérennité et la résistance ne pourront être garanties que sur quelques années. Le saule pourpre semble mieux résister à la sécheresse. Il apparaît que les petits diamètres sont les plus touchés, ainsi que les boutures situées sur les bords des ouvrages (moins d'eau disponible car moins de terre et moins de capacité de stockage d'eau).

▼ Photo 4 – Piégeage de sédiments à l'amont d'un cordon.



Au début de l'été, le feuillage des saules a jauni à la base des boutures et les feuilles mortes sont tombées. Certaines boutures ont même complètement séché. Il faut noter que toute la végétation alentour a également jauni. On peut attribuer ce jaunissement au printemps très chaud et sec, avec une très forte chaleur au sol. Les boutures à l'ombre ont beaucoup moins jauni que celles en plein soleil, ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle c'est la chaleur au sol qui serait à l'origine du jaunissement. Mais les boutures des ouvrages les plus à l'amont des ravines semblent également plus touchées, ce qui, dans ce cas, fait plutôt pencher la balance pour un manque d'eau.

Ce séchage par la base entraîne une diminution de l'opacité des écrans végétaux et est donc susceptible de diminuer l'efficacité du piégeage. Il faudra donc bien prévoir, lors de l'installation des cordons, de serrer les boutures pour constituer un écran opaque même sans feuillage. Cependant, les boutures restent très vertes dans l'ensemble et restent donc viables.

Ces premières observations ont permis d'identifier les espèces de saules qui seront à utiliser pour la construction des prochains ouvrages biologiques. Le saule blanc et le saule pourpre seront seuls employés, aussi bien comme constituants des fascines que pour la réalisation des cordons. Le saule cassant ne sera pas utilisé. Les cordons tels qu'ils ont été installés ont permis la constitution de barrières végétales denses qui doivent permettre un piégeage efficace des sédiments en transit dans le lit des ravines. Il faut préciser que le printemps a été relativement sec, ce qui constitue théoriquement un obstacle au développement des boutures.

Au vu des premières observations, ceci laisse présager un très bon comportement des boutures pour la revégétalisation du site. Des racines sont apparues sur la partie enterrée des boutures, gage de réussite à long terme de celles-ci. Le diamètre des boutures est important pour le taux de reprise et la résistance à la sécheresse.

Les quantités de sédiments retenus par les ouvrages de génie biologique

Le piégeage est très important dans tous les ouvrages (photo 4). Les cordons montrent ainsi une très grande efficacité pour le piégeage des sédiments. Le cordon constitué de boutures-origine (celles mises en place lors de la

construction de l'ouvrage) représente un barrage efficace immédiatement. La hauteur des boutures-origine est importante, car la hauteur de l'atterrissement après piégeage correspond *grosso modo* à la hauteur de ces boutures. Les reprises de boutures joueront ensuite un rôle dans l'agrandissement dynamique du barrage.

Malgré l'occurrence d'une pluie centennale, les boutures correspondant au cordon-origine sont restées en place et ont permis un piégeage très efficace des sédiments en transit dans le lit des ravines. Une ou deux barrières n'ont cependant pas permis de retenir efficacement les sédiments car les boutures-origine du cordon ont été trop espacées. Le flux d'eau est donc parvenu à filtrer à travers l'écran et le piégeage est resté faible. Ceci met en avant l'importance de la densité de l'écran constitué des boutures du cordon. Le diamètre des boutures est également important pour l'opacité de la barrière.

L'ensemble des 29 ouvrages a engendré, sur l'ensemble de l'année, un piégeage de 1,33 m³ de sédiments, ce qui correspond à un piégeage de 0,05 m³ par ouvrage. Ce résultat montre qu'il est possible de retenir des sédiments grâce au génie biologique, ceci dès la première année d'installation des ouvrages.

La dynamique végétale devrait, dès la deuxième année, mener à une colonisation végétale des sédiments piégés la première année, permettant d'une part de retenir durablement ces sédiments grâce aux systèmes racinaires des végétaux colonisateurs, d'autre part de favoriser une « croissance » du barrage engendrant un nouveau piégeage de sédiments.

Conclusion

Les travaux effectués constituent une expérimentation en vraie grandeur rarement réalisée même à l'étranger. Ils permettent de mettre en évidence et d'illustrer l'impact de travaux de végétalisation sur l'érosion à très court terme.

Après deux années supplémentaires d'observation et la mise en place de dispositifs complémentaires, il sera possible de fournir des éléments d'aide à la décision pour le dimensionnement d'ouvrages biologiques lors d'opérations de réhabilitation de ravines marneuses érodées, déterminant ainsi les crédits à investir.

Rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis des chutes de pierres

État de l'art

Les chutes de pierres sont des phénomènes naturels en zone de montagne, qui peuvent représenter des menaces pour des personnes ou des biens. La fréquence des arbres blessés sur les zones forestières soumises à de tels phénomènes montre indéniablement le rôle d'obstacle joué par la forêt.

Cependant, à l'heure actuelle, il est difficile de quantifier l'action d'un peuplement forestier sur la chute d'un bloc. Or, la connaissance précise de ce rôle permettrait d'une part d'optimiser la gestion de ces forêts en vue d'obtenir le peuplement le plus protecteur, d'autre part d'intégrer le rôle actuel de la végétation lors du dimensionnement des ouvrages de protection de génie civil (filet, tunnel...).

Actuellement, la gestion des forêts parcourues par des chutes de pierres n'utilise que des connaissances essentiellement empiriques. Ces connaissances se basent sur des adages tels que : plus il y a d'arbres, plus grand est le nombre de chocs ; les arbres de fort diamètre sont les plus aptes à résister aux chocs. Mais si ces adages sont logiques, ils impliquent le culte du « gros arbre » qui est bien souvent incompatible avec les conditions du milieu sur lequel poussent les peuplements parcourus par des chutes de pierres. De plus, une sylviculture favorisant les arbres de fort diamètre ne permet pas d'assurer la pérennité de la fonction de protection des peuplements forestiers. En effet, elle favorise le traitement en structure régulière et l'utilisation de coupes de régénération sur des grandes surfaces.

Nos connaissances sur la quantification de la capacité de dissipation d'énergie des arbres ne proviennent essentiellement que d'expériences de type « résistance des matériaux » menées en laboratoire et sur des éprouvettes de bois. Ainsi, au regard des résultats des premières expériences réalisées sur des arbres *in situ* (Couvreur, 1982 ; Doche, 1997), il apparaît que les coefficients calculés à partir des expériences en laboratoire sous-estiment la capacité de dissipation des arbres *in situ* d'un facteur 100. Cette sous-estimation est due au fait que l'on ne peut extrapoler le comportement mécanique d'un arbre à partir de celui d'une simple éprouvette en bois. En effet,

le tronc n'est pas le seul élément constitutif d'un arbre participant à la dissipation d'énergie lors d'un impact avec un bloc rocheux. Son système racinaire qui intervient dans l'ancrage de l'arbre dans le sol et son houppier (constitué des branches et du système foliaire) interviennent aussi (résistance au déracinement, frottement du houppier dans l'air lors de l'oscillation de l'arbre). Les effets de ces deux systèmes ne peuvent être étudiés à partir d'une éprouvette qui somme toute ne peut, dans le meilleur des cas, qu'être représentative de la seule action du tronc d'un arbre.

Or, les coefficients obtenus en laboratoire sont ceux utilisés dans les rares logiciels de trajectographie qui intègrent la végétation forestière. Par conséquent, lors des simulations de trajectoires, le rôle de la végétation forestière est très vraisemblablement sous-estimé. Ces modèles sont utilisés pour apprécier le risque et dimensionner les ouvrages de protection nécessaires à la protection des biens et des personnes. Mais les travaux de simulation ne se font que pour le terrain nu, c'est-à-dire sans tenir compte de la végétation forestière présente. Il convient donc de proposer une intégration réaliste de la végétation forestière dans ces modèles. Cette intégration ne peut se faire que si l'on dispose d'un jeu de données précis, obtenu par le biais d'expériences en grandeur réelle afin d'acquies des données fiables.

De plus, l'analyse bibliographique des études portant sur les interactions forêts-chutes de pierres fait apparaître une évolution des approches employées pour déterminer le rôle de protection des forêts de montagne contre les éboulements rocheux. En effet, on observe, avec la formalisation des connaissances, une modification de l'échelle d'analyse. On passe ainsi d'une détermination à l'échelle d'un peuplement homogène par un calcul énergétique global à celle unitaire de l'arbre.

Cette volonté d'étudier plus précisément le contact entre un arbre et un bloc rocheux résulte de la difficulté, voire de l'impossibilité d'extrapolation des informations obtenues sur éprouvettes en laboratoires et de la nécessité de prendre en compte la répartition spatiale des arbres. Le programme de recherche que nous avons élaboré est entre autre basé sur la finalisation de cette approche « mécanique » de modélisation mécanique du comportement d'un arbre soumis à l'impact d'un bloc rocheux.

Objectifs

L'objectif général est une meilleure connaissance de la fonction de protection des peuplements forestiers vis-à-vis des chutes de pierres, pour une meilleure prise en compte de cette fonction dans les aménagements forestiers et une reconnaissance dans les plans de prévention des risques.

L'objectif de l'étude est de construire un outil informatique intégrant un modèle de simulation de trajectoire de chutes de pierres, un modèle de comportement mécanique d'un arbre lors de l'impact d'une pierre, et un modèle de croissance de peuplement forestier. Le support informatique de cet outil est une plateforme de type système d'information géographique (SIG). Cet outil sera utilisé pour apprécier les conséquences de l'aléa chute de pierres dans un secteur boisé donné et ce pour différents scénarios : abstraction des peuplements forestiers actuellement présents (hypothèse terrain nu), prise en compte de l'état actuel du type d'occupation du sol, réalisation d'expérimentations virtuelles de sylviculture et simulation de leurs conséquences sur l'aléa chute de pierres.

Cet outil nous permettra donc d'apprécier par simulation les conditions limites d'efficacité d'un peuplement forestier donné (variation de la dimension des blocs) et pour les mêmes conditions expérimentales (pente et volume des blocs fixés), le peuplement offrant une protection optimale. À partir de ces travaux, un guide de sylviculture des peuplements forestiers ayant une fonction de protection vis-à-vis du risque de chute de pierres sera proposé aux gestionnaires.

Description du programme de recherche

Pour atteindre l'objectif que nous nous sommes fixé, notre axe de recherche a été décomposé en 5 phases bien distinctes. Elles correspondent à trois types d'actions bien spécifiques et chronologiques :

- la construction d'un modèle (phase 1) ;
- le couplage de modèles entre eux (phase 2 et 3) ;
- la réalisation d'expérience virtuelles avec l'outil ainsi créé et implanté dans un environnement SIG (phase 4 et 5).

De part leur nature les phase 1, 2 et 3 sont actuellement les plus abouties. Les phase 4 et 5 seront initiées dès lors que la phase 3 sera terminée.

CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN ARBRE LORS DE L'IMPACT D'UNE PIERRE

Afin de progresser dans l'analyse de la réponse d'un peuplement forestier soumis à des impacts de blocs rocheux, un modèle de comportement mécanique à l'échelle de l'arbre a été développé.

Ce développement est le résultat d'un travail en partenariat des unités de recherches EPM (réalisation des expérimentations et approche sylvicole) et ETNA (partie mécanicienne) du Cemagref de Grenoble.

Ce modèle permet de décrire la réponse d'un arbre soumis à l'impact d'un bloc rocheux et d'estimer la trajectoire réfléchiée de bloc après l'impact. Pour de plus amples détails sur ce modèle, nous invitons le lecteur à consulter l'article « Étude des interactions entre un bloc en mouvement et le milieu extérieur » (Nicot, 2003).

Ce modèle introduit plusieurs paramètres, rhéologiques (module d'Young, coefficient de Poisson, etc.) et géométriques (diamètre de l'arbre, etc.) dont l'estimation impose de recourir à des essais expérimentaux. Ainsi les données de calage de ce modèle proviennent et proviendront entre autres d'un site expérimental sur lequel des expériences grandeur nature sont réalisées.

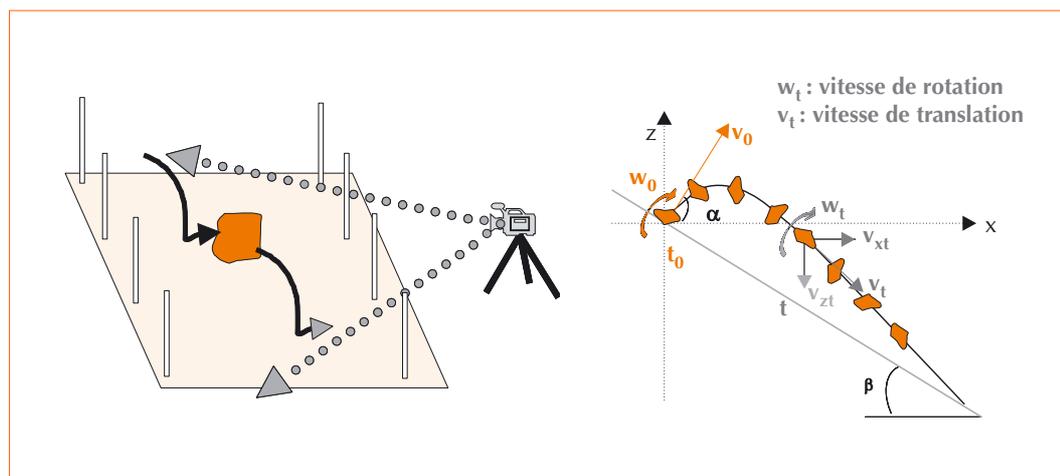
Du point de vue forestier, les principaux objectifs de ces expériences *in situ* sont de quantifier l'énergie que peut dissiper un arbre et la déviation latérale que peut occasionner le choc avec un arbre. Pour remplir ces objectifs, il faut être en

mesure de visualiser, de localiser dans un référentiel spatial et temporel la position d'un bloc en tout point de sa trajectoire. À partir de ces informations, il est alors possible de calculer les vitesses (de translation et de rotation) développées par un bloc en tout point de sa trajectoire et la direction du bloc (axe de la trajectoire) entre deux impacts (figure 2).

Pour l'ensemble de ces raisons, nous avons décidé de procéder au suivi cinématographique de la trajectoire de blocs de caractéristiques connues (dimensions, composition, masse) sur un terrain préalablement cartographié (modèle numérique de terrain, mode d'occupation du sol, position de tous les obstacles : arbres, blocs en place, etc.), ainsi qu'au relevé cartographique précis des impacts (position, nature, distance et azimut entre deux impacts) après le passage d'un bloc.

Le site expérimental a été choisi de manière à pouvoir réaliser des expériences dans un secteur dépourvu de végétation forestière et dans un secteur boisé. Il faut souligner que les conditions de pente sont les mêmes dans les deux cas. Nous pouvons ainsi procéder à une comparaison des données entre ces deux conditions expérimentales.

Pour chacune de ces conditions, un total de 100 lâchers ont été réalisés. Les blocs ont été lâchés les uns après les autres. Pour chacun des blocs, un suivi cinématographique ainsi qu'un relevé cartographique de sa trajectoire ont été réalisés (photos 5 à 10, p. 173).



◀ Figure 2 – Représentation schématique du dispositif expérimental et des données mesurables à partir d'un suivi cinématographique entre deux impacts au sol.

L'ensemble de ces données permet de structurer et de construire une base de données qui est et sera entre autres utilisée à des fins de modélisation et de validation (figure 3).

**MISE EN OEUVRE DE CE MODÈLE
DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN ARBRE
DANS UN MODÈLE DE SIMULATION NUMÉRIQUE
DE TRAJECTOIRES**

Étant donné que la majorité des codes trajectographiques sont développés par des bureaux d'études privés, nous avons décidé de travailler avec un code développé par un centre de recherche public et ce afin de limiter les problèmes de propriétés intellectuelles liés à l'utilisation d'un tel code de calcul. De plus, compte tenu des travaux envisagés, nous devons pouvoir avoir accès à tous les éléments constituant le code de calcul. Le code trajectographique qui est utilisé est celui actuellement développé par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC). Ce code utilise un nouveau concept de prise en compte des chocs solide-obstacles, selon la théorie des percussions (Dimnet, 2001 ; Fremond, 2000, 2001 ; Dimnet et Fremond, 2000), et offre ainsi l'avantage de travailler en

mono-bloc (un seul projectile) et en pluri-blocs (plusieurs projectiles en tenant compte de leurs interactions). De plus, il est de type tridimensionnel et permet ainsi de prendre en compte les déviations latérales occasionnées par la présence des arbres.

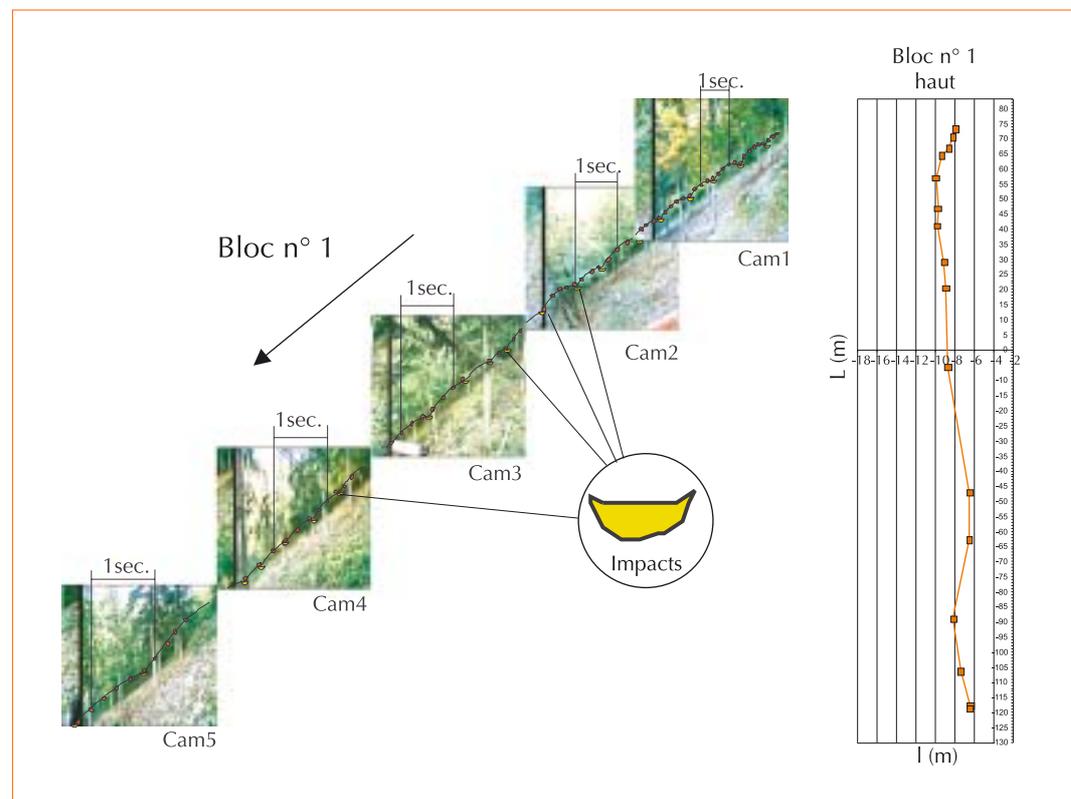
Ce modèle nécessite de développer une interface utilisateur qui soit conviviale, mais surtout qui soit en mesure de prendre en compte des données environnementales provenant d'un SIG.

C'est pourquoi nous avons décidé de coupler le logiciel de trajectographie du LCPC avec le SIG ARC/INFO.

Afin de pouvoir réaliser un portage de ce code de trajectographie dans un environnement SIG, il s'est avéré nécessaire que la donnée de base, c'est-à-dire le modèle numérique de terrain, soit dans un format compatible avec l'utilisation d'un SIG et du code de calcul. Nous avons donc opté pour une modélisation du terrain sous forme de facettes triangulaires (TIN).

Cette modélisation du terrain, si elle offre l'avantage d'être utilisable par ces deux outils, offre aussi celui de proposer une représentation réaliste de la surface

► Figure 3 –
Exemple d'image
analysée et de
cartographie de la
trajectoire associée.



topographique étudiée, ce qui n'est pas le cas des modélisations numériques de terrain avec des fonction de lissage de type spline.

L'objectif principal de cette phase a été de fournir, à partir d'un nuage de points (figure 4, p. 174), une triangulation de ces points (figure 5, p. 174) pour le calcul de la trajectoire (figure 6, p. 174). Cette triangulation est issue, soit d'un programme FORTRAN que nous avons développé et implémenté dans le code trajectographique, soit du module TIN du SIG ARC/INFO (nous avons développé la passerelle informatique de transfert des données du SIG vers le code trajectographique).

En parallèle à ces travaux, la maquette conceptuelle d'implantation des arbres dans le code de trajectographie a été réalisée. Cette maquette est basée sur la représentation sur la surface topographique d'une population d'arbres à partir d'un fichier contenant les coordonnées géographiques et un descriptif de chacun des arbres constituant cette population, sur la détermination des arbres impactés et l'extraction des données nécessaires (vitesses du projectile, direction du projectile, caractéristique initiale de



l'arbre impacté) à l'utilisation du modèle de comportement mécanique d'un arbre.

Dans les phases suivantes de notre programme de recherche, des données issues du SIG, relatives aux caractéristiques du sol et intervenant dans le calcul de la trajectoire, seront introduites dans le logiciel de trajectographie (cf. phase 4).

La robustesse de ce code a été testée sur modèle réduit, nous procédons actuellement pour notre site expérimental au calage et à la validation de ce code avec les données acquises lors de nos expériences grandeur réelle.

▲ Photos 5 et 6 – Les caméras utilisées et leur implantation sur le site.

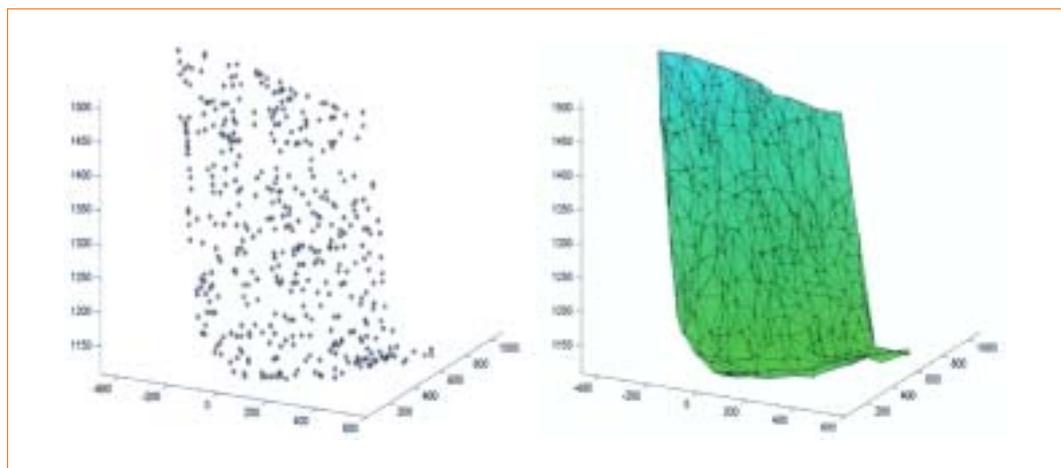


◀ Photos 7 et 8 – Préparation des projectiles et mise en mouvement.



◀ Photos 9 et 10 – Exemple de prise de vue et de relevé cartographique après un lâcher.

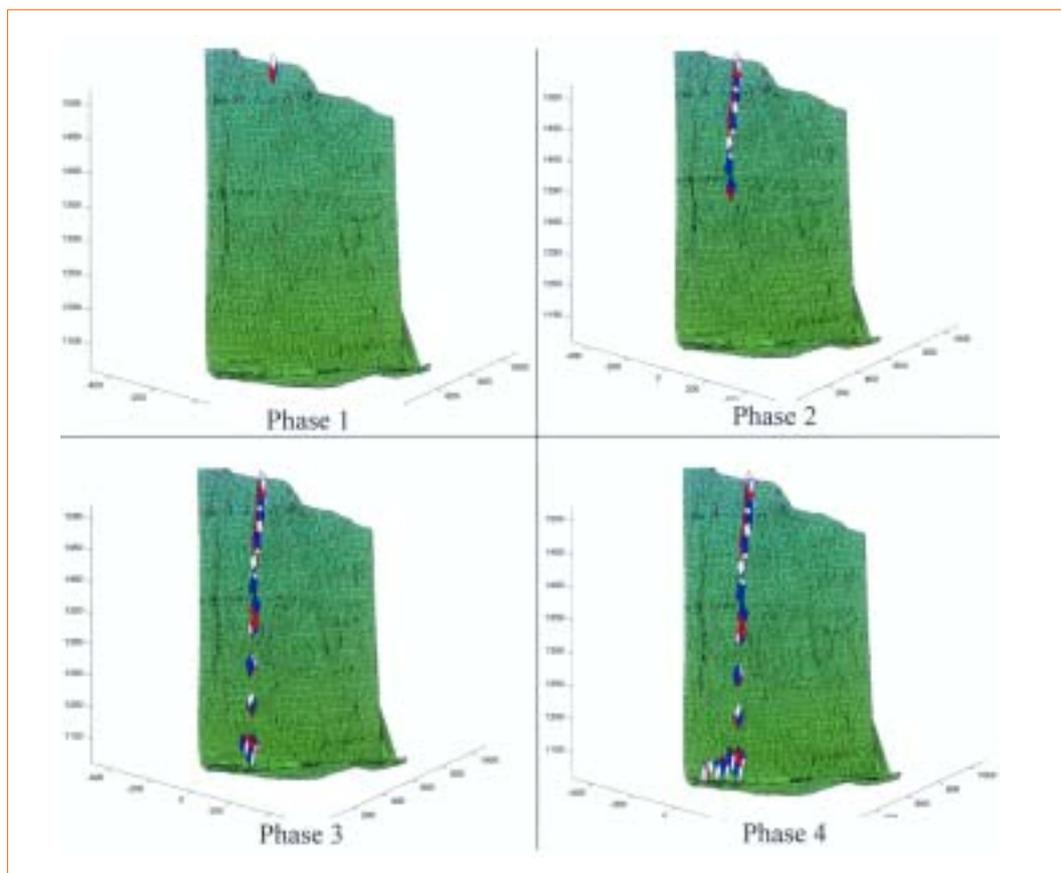
- Figures 4 et 5 – Nuage de point initial et triangulation correspondante.



UTILISATION COUPLÉE D'UN MODÈLE DE CROISSANCE DE PEUPLEMENT FORESTIER ET DU CODE TRAJECTOGRAPHIQUE INTÉGRANT LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ARBRES
Le modèle de croissance de peuplement que nous utiliserons sera celui développé au sein du thème de recherche FOREVER du Cemagref de

Grenoble. Ce modèle sera utilisé pour construire et tester le cadre méthodologique général d'implémentation d'un modèle de croissance de peuplement forestier au sein d'un modèle 3D de simulation numérique de propagation de mouvements gravitaires rapides (chutes de pierres, avalanches, laves torrentielles).

- Figure 6 – Le film d'évolution de la simulation d'une chute d'un bloc rocheux avec le code du LCPC.



MISE EN OEUVRE DE CE MODÈLE DE TRAJECTOGRAPHIE INTÉGRANT DES PARAMÈTRES FORESTIERS (COMPORTEMENT-CROISSANCE) DANS UNE PLATE-FORME INFORMATIQUE DE TYPE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Cette phase correspond à la construction d'une interface utilisateur qui permettra à celui-ci d'initier de façon transparente les différents modules et outils développés. Ainsi, ce « couplage » des différents outils utilisés nous permettra de proposer dans un premier temps une meilleure visualisation des résultats obtenus par simulation, et dans un deuxième temps de faciliter la prise en compte des données orographiques et d'occupation du sol. L'objectif de ce couplage est de proposer un outil transparent au niveau de son utilisation et répondant aux besoins d'ingénieries des personnels en charge de la gestion des forêts à fonction de protection.

UTILISATION DE CETTE PLATE-FORME INFORMATIQUE POUR RÉALISER DES EXPÉRIENCES VIRTUELLES DE SYLVICULTURE ET APPRÉCIER LEURS CONSÉQUENCES SUR L'ALÉA CHUTES DE PIERRES

Cette cinquième phase correspond à l'utilisation proprement dite de l'outil que nous construisons, afin de déterminer pour une chute de pierres (fixée par l'opérateur) quel est le type de peuplement offrant une protection optimale et le type de cheminement sylvicole nécessaire à mettre en œuvre pour obtenir ce peuplement optimal. De plus, une estimation du risque résiduel à l'aval des peuplements forestiers étudiés sera réalisée. Nous pourrions ainsi déterminer quelles sont les situations nécessitant des interventions complémentaires de type génie civil. Les résultats de ces expérimentations virtuelles seront formalisés dans un guide de sylviculture.

Conclusion

Les travaux qui ont été réalisés à ce jour font que nous disposons maintenant des différents éléments constitutifs du futur outil d'aide à la gestion des forêts à fonction de protection vis-à-vis des chutes de pierres. L'intégration d'un terrain triangulé (en 3 dimensions) dans le code de trajectographie du LCPC nous a permis d'ouvrir des perspectives de représentation spatiale d'un peuplement forestier et offre une modélisation plus proche de la réalité. Elle permet aussi de prendre en compte les phénomènes de déviation d'un bloc, ce que n'autorise pas le choix d'un

profil fixé. De plus, le langage orienté objet utilisé (Visual C++) a permis de faciliter l'insertion de nouveaux éléments dans le modèle de données et aidera, en particulier, à celle d'éléments de végétation. Son adaptation au monde de l'information géographique facilitera les liens avec le SIG.

Les modifications et développements que nous avons apportés au code de trajectographie du LCPC nous permettent maintenant de réaliser l'implémentation pratique de notre modèle conceptuel de prise en compte d'arbres dans le code trajectographique, et de pouvoir initier les travaux de couplage avec d'une part le modèle de comportement mécanique d'un arbre lors de l'impact d'un bloc rocheux, d'autre part celui de modélisation de la dynamique de peuplements forestiers.

Prise en compte des résultats pour l'ingénierie écologique au service de la prévention des risques naturels

Un risque naturel est défini comme étant la résultante du croisement de la présence d'un aléa naturel (déterminé en termes de nature, fréquence et intensité) et d'un ou plusieurs enjeux socio-économiques (conséquence de l'activité humaine dans un espace géographique). La prévention, quant à elle, correspond à tous les moyens mis en œuvre afin de limiter voire d'annihiler le risque. Pour ce faire, elle fait appel à des actions de types curatives, quand le risque est actif, visant à empêcher l'aléa de se produire (protection active) ou de nuire (protection passive), ainsi qu'à des actions de types préventives au sens propre du terme, basées sur une gestion adaptée des objets qui maintiennent le risque à un niveau potentiel (réglementation des droits d'usage et d'occupation des sols par le biais du plan de prévention des risques, gestion adaptée des écosystèmes ayant une fonction de protection).

À ce titre, nous considérons que la surface géographique assujettie à un risque naturel représente un « géosystème », c'est-à-dire un territoire sur lequel existe une mosaïque de systèmes que l'on peut définir en termes de référentiels spatial, temporel et fonctionnel. Par exemple, dans le cas d'un versant parcouru par des chutes de pierres, les éléments constitutifs du géosystème sont : la zone de départ des blocs (falaises, barres rocheuses), la mosaïque des écosystèmes présents depuis la zone de départ

jusqu'à la zone de dépôt des blocs, les perturbations et l'anthroposystème qui agit sur ce territoire (mode d'usage du territoire, mode de gestion des écosystèmes, activités économiques, réglementation en vigueur...).

Dans ce géosystème, nous définissons l'ingénierie écologique comme étant le moyen de piloter les écosystèmes présents afin de pérenniser et d'optimiser leur fonction de protection vis-à-vis de ce phénomène naturel. Ce pilotage nécessite une vision globale du géosystème, c'est-à-dire que le gestionnaire doit être en mesure d'identifier tous les acteurs qui sont concernés (directs et indirects, locaux et délocalisés), de déterminer les fonctions du ou des écosystèmes dont il a la charge, de quantifier l'efficacité actuelle de leur fonction de protection, d'estimer l'influence de différentes perturbations sur le devenir de cette fonction, d'identifier les secteurs d'interventions prioritaires, de sélectionner le mode de gestion le plus adapté au maintien et à l'optimisation de ce rôle, de définir les modes d'actions afin d'anticiper et d'éviter les conséquences des perturbations, de déterminer les indicateurs nécessaires au suivi de la gestion afin, le cas échéant, de modifier la stratégie mise en oeuvre et finalement de réaliser une concertation des différents acteurs.

Dans ce contexte général, nos objectifs sont d'identifier les attentes des gestionnaires, de traduire leurs questionnements en axes de recherches scientifiques, d'acquérir des connaissances scientifiques solides sur les interactions peuplements forestiers-aléas naturels, de formaliser ces connaissances par le biais de modèles et/ou de typologies de situations, et de développer des outils d'aide à la gestion de ces peuplements. En parallèle, il faut aussi développer dans cette thématique des recherches fondamentales afin de pouvoir entre autre, dans un futur proche ou lointain, anticiper les attentes des gestionnaires.

Ainsi, concernant l'érosion, les résultats peuvent constituer une référence pour le dimensionnement ou l'entretien d'ouvrages de génie biologique utilisés lors de chantiers de correction de ravines par génie biologique. On pourra

notamment déduire des résultats le nombre d'ouvrages de génie biologique à installer sur une ravine pour bloquer tous les sédiments sur une année. La dynamique végétale fera le reste pour les années suivantes (croissance des barrages végétaux avec les atterrissements). À une échelle plus globale, le retour à des opérations de protection par la végétation, visant à retenir efficacement et durablement une partie des sédiments dans les bassins versants, devrait permettre de diminuer les apports de sédiments dans les retenues de barrages hydroélectriques (cas de la Durance dans les Alpes du sud). La solution écologique proposée pour retenir les sédiments dans les bassins comme une alternative au curage des retenues de barrage est une action efficace à court terme (dès la première année), économique et d'intérêt écologique.

À terme, il sera possible de déterminer un rapport coût/avantages en terme de sédiments retenus dans les ravines grâce à ces interventions, par rapport au prix de revient du curage des barrages hydroélectriques. Pour appuyer cela, il faudra continuer à déterminer l'efficacité des ouvrages de génie biologique à retenir les sédiments dans les bassins versants en fonction du temps, puis comparer le prix de construction et d'entretien des ouvrages avec celui du curage des sédiments dans une retenue de barrage.

Concernant les chutes de pierres, l'outil d'aide à l'optimisation et à la pérennisation de la protection passive des peuplements forestiers vis-à-vis des chutes de pierres que nous construisons est un des éléments constitutifs de l'ingénierie écologique dédiée à la gestion des forêts à fonction de protection. En effet, son utilisation permettra d'affirmer ou d'infirmer les connaissances empiriques, de formaliser les connaissances scientifiques acquises et d'élaborer des tableaux de bord de gestion des peuplements forestiers : identification et affichage du rôle actuel, détermination de la ou des structures optimales afin d'optimiser le rôle des peuplements, détermination de la sylviculture à adopter pour atteindre cette/ces structure(s), détermination d'indicateurs de suivi de cette sylviculture, possibilité de tester différents scénarios sylvicoles. □

Résumé

La végétation forestière peut jouer un rôle de protection « passive » contre certains aléas naturels, c'est-à-dire qu'elle peut permettre de réduire l'impact d'un aléa après que celui-ci se soit déclenché. Ce type d'action de la végétation peut être observé avec l'érosion et les chutes de pierres. Il apparaît alors intéressant de chercher à quantifier ce rôle de protection. Deux programmes de recherche ont ainsi été initiés sur ces deux types d'aléas. Dans les deux cas, des expériences grandeur nature ont été réalisées et permettent de montrer, qualitativement et quantitativement, l'impact de barrières végétales sur les mouvements de matériaux allant du sédiment au bloc. Les premiers résultats montrent qu'il sera possible de déterminer des règles de gestion des problèmes liés à l'érosion et aux chutes de pierres par la voie de l'ingénierie écologique.

Abstract

Forest vegetation can play a significant role of « passive » protection against certain natural hazards, i.e. that it can reduce the impact of a hazard after this hazard began. This type of vegetation action can be observed when erosion or rockfalls occur. Thus, it seems interesting to seek to quantify this protection role. Two research programs have then been initiated about these hazards. In both cases, real size experiments have been carried out and show, in qualitative and quantitative ways, the impact of vegetation barriers on sediments as well as rocks. First results show the possibility to determine management rules for problems of erosion and rockfalls by the mean of ecological engineering.

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.
- BEUSELINCK, L., STEEGEN, A., GOVERS, G., NACHTERGAELE, J., TAKKEN, I., POESEN, J., 2000, Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt, *Geomorphology*, vol. 32, p. 69-82.
- BOCHET, E., POESEN, J., RUBIO, J.-L., 2000, Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 25, p. 847-867.
- CAMMERAAT, L.-H., IMESON, A.-C., 1999, The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain, *Catena*, vol. 37, p. 107-127.
- COUVREUR, S., 1982, *Les forêts de protection contre les risques naturels*, ENITEF-Cemagref, Grenoble.
- DALTON, P.-A., SMITH, R.-J., TRUONG, P.-N.-V., 1996, Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain: hedge hydraulics, *Agricultural Water Management*, vol. 31, p. 91-104.
- DIMNET, E., 2001, *Chocs dans les systèmes solides rigides*, 9 pages.
- DIMNET, E., FREMOND, M., 2000, *Instantaneous collisions of solids*, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, 13 pages.
- DOCHE, O., 1997, *Étude expérimentale de chutes de blocs en forêt*, Cemagref, Grenoble, 103 pages.
- FREMOND, M., 2000, Collision of a wedge with a plane, *Computational and Applied Mathematics*, vol. 19, n° 2, p. 1-10.
- FREMOND, M., 2001, *Non-smooth Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin.
- LEE, K.-H., ISENHART, T.-M., SCHULTZ, R.-C., MICKELSON, S.-K., 2000, Multispecies riparian buffers trap sediment and nutrients during rainfall simulations, *Journal of environmental quality*, vol. 29, p. 1200-1205.
- NICOT, F., 2003, Étude des interactions entre un bloc en mouvement et le milieu extérieur, *Ingénieries-EAT*, n° spécial « Risques Naturels », 2003.
- POUDEL, D.-D., MIDMORE, D.-J., WEST, L.-T., 1999, Erosion and productivity of vegetable systems on sloping volcanic ash-derived Philippine soils, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 63, p. 1366-1376.
- REY, F., 2002, *Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du sud*, Cemagref-université Joseph Fourier, Grenoble, 183 pages (thèse de doctorat).
- SANCHEZ, G., PUIGDEFABREGAS, J., 1994, Interactions of plant growth and sediment movement on slopes in a semi-arid environment, *Geomorphology*, vol. 9, p. 243-260.
- THORNE C.-R., 1990, Effects of vegetation on riverbank erosion and stability, in *Vegetation and erosion: processes and environments*, Ed. J.-B. Thornes, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 125-144.
- VILES, H.-A., 1990, « The agency of organic beings »: a selective review of recent work in biogeomorphology, in *Vegetation and erosion: processes and environments*, Ed. J.-B. Thornes, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 5-24.