HAL
open science

Modélisation spatio-temporelle et approche économique du piégeage de sédiments dans des ravines marneuses végétalisées par génie biologique :le modèle Simulfascine

Géraud Lavandier, Laure Dangla, Max Bruciamacchie, Freddy Rey

To cite this version:

Géraud Lavandier, Laure Dangla, Max Bruciamacchie, Freddy Rey. Modélisation spatio-temporelle et approche économique du piégeage de sédiments dans des ravines marneuses végétalisées par génie biologique :le modèle Simulfascine. Revue forestière française, 2010, 62 (5), pp.525-540. 10.4267/2042/39864 . hal-01072355

HAL Id: hal-01072355

https://hal.science/hal-01072355

Submitted on 25 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation spatio-temporelle et approche économique du piégeage de sédiments dans des ravines marneuses végétalisées par génie biologique : le modèle Simulfascine

Géraud Lavandier – Laure Dangla – Max Bruciamacchie – Freddy Rey

Un risque est un événement dont l'arrivée aléatoire est susceptible de causer un dommage à des personnes, des biens ou aux deux à la fois (Braudo et Baumann, 2009). L'érosion est un aléa naturel responsable de la dégradation du sol. Les matériaux érodés, transportés par charriage ou par suspension, puis déposés par les cours d'eau, peuvent induire des dommages de divers types au sein d'un bassin versant. Lorsqu'il s'agit de matériaux fins transportés par suspension, comme c'est souvent le cas par exemple dans les Alpes du Sud françaises, les conséquences peuvent être sociales (par exemple, augmentation des risques d'inondation due à l'exhaussement d'un lit de rivière), économiques (par exemple, diminution de l'efficacité et de la rentabilité de l'exploitation des barrages hydroélectriques ou agricoles due à leur envasement) ou encore écologiques (par exemple, colmatage de frayères préjudiciable à la reproduction des poissons et à l'activité pêche) (Balland *et al.*, 2002).

Par opposition aux risques de chute de pierres ou d'avalanche, dans le cas du « risque érosion », les enjeux sociaux, économiques et écologiques sont souvent spatialement dissociés de la zone où se produit l'aléa, les matériaux érodés pouvant être transportés sur de longues distances. Par ailleurs, ce risque présente un caractère diffus. L'accumulation de sédiments au niveau d'une zone à enjeux se fait progressivement dans le temps. Ces échelles assez grandes, aussi bien spatialement que temporellement, rendent complexe l'appréhension du risque érosif par les scientifiques, les gestionnaires et les décideurs.

Le phénomène érosif est particulièrement marqué dans les Alpes du Sud françaises. En effet, cette région présente :

— des formations géologiques particulièrement sensibles,
— des épisodes pluvieux violents, occasionnant des départs importants de matériaux,
— un climat globalement sec, rendant l'installation de la végétation difficile.

La Durance est une rivière dont le bassin versant est le théâtre de ces phénomènes et concentre des enjeux sociaux, économiques et écologiques. Un programme nommé « Plan Durance Multi-Usages » a été mis en place en 2005 pour une durée d'au moins 10 ans. Ce plan fixe des orientations stratégiques, des objectifs et des actions concrètes pour l'aménagement du bassin versant de ce cours d'eau. L'un des objectifs affichés est de réduire les impacts négatifs des manifestations d'érosion. Dans le cadre de ce plan, le Cemagref étudie ainsi l'efficacité d'ouvrages de génie biologique, ensemble des techniques et outils utilisant le végétal pour enrayer l'érosion et

la sédimentation associée. La réflexion engagée porte sur les possibilités d'intervention à l'échelle du bassin versant de la Durance ou de certains de ses affluents aux dimensions plus réduites (Rey, 2009b).

Une des grandeurs clés pour appréhender l'efficacité des différentes techniques est le volume de sédiments stocké par les ouvrages. Celui-ci se soustrait des quantités de sédiments fins se déposant annuellement à l'aval du bassin versant. Des expérimentations menées depuis une dizaine d'années ont permis de déterminer les quantités de matériaux pouvant être retenues par des ouvrages de génie biologique dans des ravines marneuses (petits bassins versants d'une surface inférieure à un hectare) (Rey, 2009a).

Afin d'établir différentes stratégies d'application de ces techniques et d'en évaluer les coûts et les avantages, nous avons développé, à l'attention des praticiens, gestionnaires et décideurs, un outil interactif leur permettant de réaliser des tests virtuels d'intervention, afin de déterminer la solution la plus économiquement rentable pour un piégeage efficace et durable de sédiments. Cet outil, nommé Simulfascine, permet ainsi de :

— modéliser l'évolution du volume stocké à l'échelle d'une ravine en fonction de ses caractéristiques, du nombre et du type d'ouvrages mis en place,

— réaliser une analyse coûts-bénéfices des différentes stratégies d'intervention,

— déterminer une stratégie d'intervention sur l'ensemble d'un bassin versant, permettant une optimisation de l'utilisation d'ouvrages.

Ce modèle a été élaboré puis étalonné à partir d'observations réalisées sur des sites expérimentaux. Il a été développé en langage Visual Basic sous Microsoft Excel.

DESCRIPTION DES PROCESSUS À MODÉLISER

Les principaux processus à modéliser sont l'érosion des marnes et l'action de piégeage des sédiments jouée par les ouvrages de génie biologique.

L'érosion des marnes

Les marnes sont des roches sédimentaires constituées d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion variable. Plus la part de calcaire est importante, plus les roches sont dures et donc peu susceptibles d'être érodées. À l'inverse, une plus grande proportion d'argiles rend la roche plus sensible aux phénomènes érosifs.

L'érosion des marnes entraîne la création de saignées comparables à de petits bassins versants élémentaires nommés ravines (figure 1, p. 527). Cette érosion est le résultat de la succession de deux phénomènes : la déstructuration et l'ablation des marnes.

La déstructuration peut être liée à des processus mécaniques (gel-dégel, humectation-dessiccation, variations de température et décompression) ou à des processus chimiques (essentiellement la dissolution de la calcite).

Ces matériaux désolidarisés de la roche mère subissent une ablation par ruissellement ou par gravité. Ils sont entraînés des versants vers le lit de la ravine.

En fin d'hiver, l'accumulation moyenne de matériaux au fond des talwegs est de quelques dizaines de centimètres de hauteur. Les pluies intenses, concentrées en été et en automne, remobilisent ces matériaux accumulés dans les lits pour les mener vers l'exutoire de la ravine.

S'engage alors une succession de reprises et dépôts des sédiments par charriage ou par suspension le long du réseau hydrographique au gré des événements climatiques. Ces sédiments, qui peuvent être transportés sur de longues distances par suspension, s'accumulent ensuite dans des zones où la capacité de transport du cours d'eau s'atténue (Mathys, 2006).

Végétation, ouvrages de génie biologique et piégeage de sédiments

La végétation joue un rôle de protection contre l'érosion (Rey *et al.*, 2004). Deux types d'actions sont à distinguer :

— la protection active : la végétation limite l'érosion, en atténuant l'effet des agents érosifs et en fixant les matériaux,

— la protection passive : la végétation retient les matériaux érodés en jouant le rôle de barrière mécanique.

Les ravines qui présentent une érosion active ne sont pas végétalisées, au moins sur une partie de leur extension. Pour que son action soit efficace en termes de réduction de la production sédimentaire à l'exutoire de ravines, la végétation doit au minimum :

— recouvrir plus de 20 % de la surface de la ravine,

— être composée majoritairement d'arbustes et d'herbacées, concentrés dans le lit de la ravine.

Les techniques de génie biologique ont comme objectif de faciliter l'installation du couvert végétal (Frossard et Evette, 2009). Pour des raisons d'efficacité lorsque la mise en place d'une protection passive est recherchée, les ouvrages sont mis en œuvre dans les zones où l'eau et les sédiments transitent, à savoir le lit des ravines (figure 1, ci-contre) (Rey, 2009a). Ils sont constitués de deux éléments :

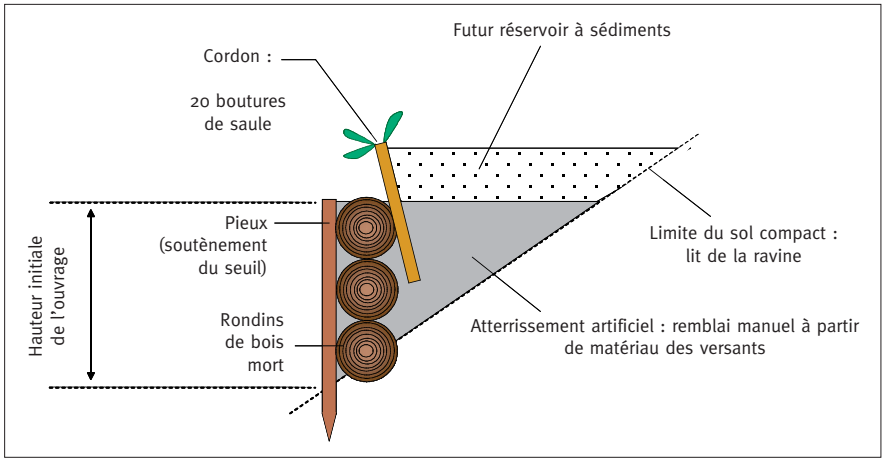
— une barrière physique, sous forme d'un seuil en bois mort jouant le rôle d'ancrage de l'ouvrage au sol ; ce seuil s'apparente à un ouvrage de génie civil ;

— un cordon de boutures de Saule permettant de piéger les sédiments ; l'utilisation de boutures enfoncées profondément dans le sol garantit le maintien en place du matériel végétal, dès son installation, lors de potentiels débits extrêmes dans le lit des ravines ; cela ne serait pas forcément le cas avec des plants dont le système racinaire nécessite un certain temps pour véritablement ancrer l'individu végétal dans le sol.

Figure 1
PHOTOGRAPHIE D'UNE RAVINE MARNEUSE ÉQUIPÉE D'OUVRAGES DE GÉNIE BIOLOGIQUE VISANT À PIÉGER LES SÉDIMENTS

L'espace créé entre le seuil et le lit de la ravine est atterri artificiellement. Un ouvrage type est représenté en figure 2 (Rey, 2009a).

Figure 2 **COUPE EN LONG D'UN OUVRAGE DE GÉNIE BIOLOGIQUE UTILISÉ POUR PIÉGER DES SÉDIMENTS**



Les matériaux issus de la déstructuration et de l'ablation des marnes sur les versants vont progressivement s'accumuler au fond de la ravine. Lors d'événements pluvieux intenses, une part de ces matériaux est alors entraînée et piégée par le cordon de boutures, remplissant ainsi le « réservoir à sédiments ». Les travaux antérieurs (Rey, 2009a) ont montré que, sur marnes, ce type d'ouvrage était apte à résister à des pluies violentes de fréquence de retour centennale, dans des ravines suffisamment petites (de surface inférieure à un hectare) pour que les contraintes de crue ne soient pas trop fortes. Ces mêmes études ont également mis en évidence l'efficacité des ouvrages utilisés pour stopper le transit des matériaux érodés (photo 1).

Un regarni constitué de boutures de Saule plantées sur l'atterrissement, appelé également « garnissage », est éventuellement mis en place entre les ouvrages, afin d'accroître encore les quantités de sédiments piégés. Le développement spontané de la végétation sur la zone atterrie permet également de stabiliser l'ouvrage et d'augmenter sa capacité de stockage année après année (Burylo *et al.*, 2007).

Photo 1
Seuil en bois avec cordon de boutures ayant piégé des matériaux érodés ; les rejets des boutures (rougeâtres) vont continuer à croître et à piéger de nouvelles quantités de matériaux

L'ensemble des végétaux se développant en surface et en hauteur sur l'atterrissement peut aller jusqu'à provoquer l'extinction (arrêt de la production de sédiments) quasi totale des ravines (Rey *et al.*, 2004). Tout cela a lieu naturellement après l'installation des ouvrages : il n'est ainsi pas nécessaire de les entretenir.

LE MODÈLE SIMULFASCINE

La figure 3 illustre les différentes composantes du modèle et leurs articulations. Les données nécessaires au fonctionnement du modèle ainsi que les données fournies en sortie sont précisées.

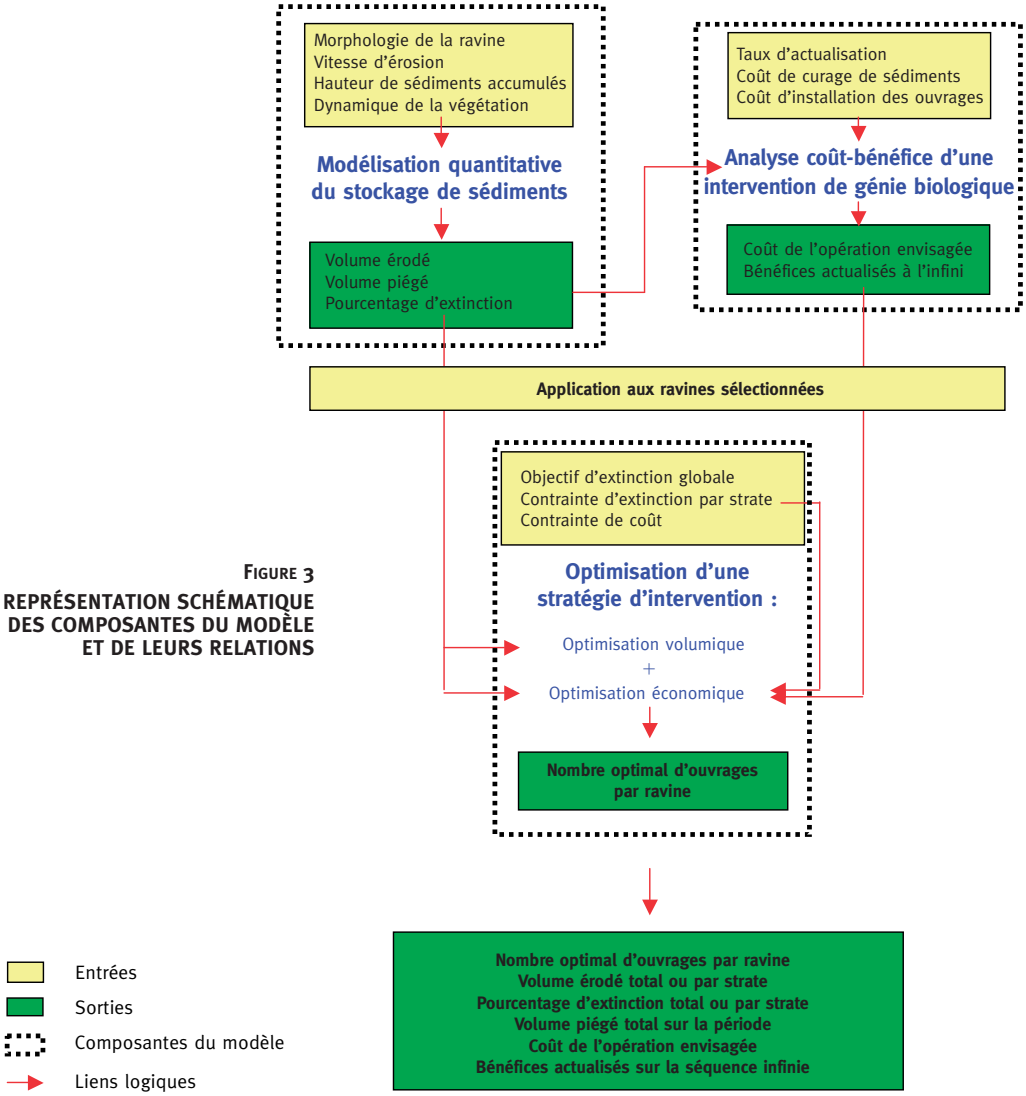


FIGURE 3
REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES COMPOSANTES DU MODÈLE ET DE LEURS RELATIONS

Par une approche géométrique (morphologie de la ravine) et des hypothèses sur la vulnérabilité des sols (vitesse d'érosion), le modèle Simulfascine cherche à quantifier le volume stocké annuellement par les ouvrages.

Ces volumes permettent de réaliser une analyse coûts-bénéfices d'un ouvrage, en termes volumiques ou économiques. Ces calculs peuvent ensuite être utilisés pour optimiser une stratégie d'action à l'échelle d'une ravine, d'un groupe de ravines ou de l'ensemble d'un bassin versant, en fonction d'enjeux locaux.

MODÉLISATION QUANTITATIVE DU STOCKAGE DE SÉDIMENTS

Pour chaque ouvrage, le volume accumulé peut être assimilé à celui d'une pyramide (1) pour laquelle :

— la base est égale à la surface issue de l'accumulation de sédiments l'année *n* dans le plan presque vertical formé par le seuil de l'ouvrage,

— la hauteur correspond à la longueur de l'atterrissement formé.

Si deux ouvrages sont placés suffisamment près l'un de l'autre, le volume peut être assimilé à celui d'une pyramide tronquée (2) par un plan parallèle à celui de la base. Dans ce cas :

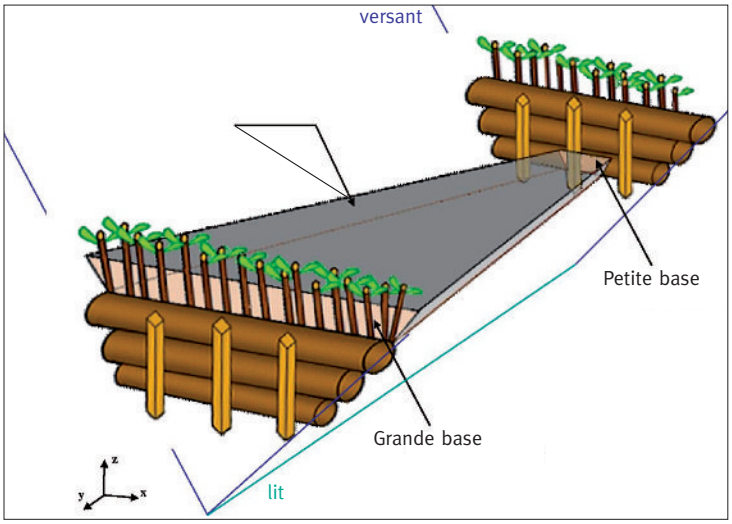
— la grande base est égale à la surface issue de l'accumulation de sédiments l'année *n* dans le plan presque vertical formé par le seuil de l'ouvrage situé à l'aval de l'atterrissement,

— la petite base est égale à la surface issue de l'accumulation de sédiments l'année *n* dans le plan presque vertical formé par le seuil de l'ouvrage à l'amont de l'atterrissement,

— la hauteur correspond à la distance entre deux ouvrages.

Ce volume est représenté dans la figure 4.

Figure 4 **REPRÉSENTATION DU VOLUME DE SÉDIMENTS STOCKÉ L'ANNÉE N**



(1) Volume d'une pyramide = 1/3 x surface de la base x hauteur de la pyramide.

(2) Volume d'une pyramide tronquée = 1/3 x [surface de la grande base + surface de la petite base + (surface de la grande base x surface de la petite base)$^{1/2}$] x hauteur de la pyramide.

D'un point de vue dynamique, la surface de la base de la pyramide va s'accroître d'année en année avec la croissance des rejets des boutures.

Le couvert végétal peut également s'installer spontanément sur les ouvrages, augmentant alors leur capacité de stockage. Cette dynamique naturelle est paramétrable. L'utilisateur du modèle peut choisir de simuler des ravines :

— où il existe une dynamique de végétation naturelle sur les atterrissements ; l'évolution du couvert de la végétation est représentée par le biais d'une fonction de répartition d'une loi normale dont les arguments sont paramétrables (Delcros *et al.*, 2009) ;

— où il existe une dynamique de végétation artificielle sur les atterrissements ; celle-ci correspond à un regarni en boutures de Saule qui crée un couvert de 90 % présent en permanence sur la surface de l'atterrissement initial (Rey, 2009a) ;

— où il n'existe pas de dynamique de la végétation sur les atterrissements.

Le modèle calcule par ravine et pour chaque année le pourcentage de surface aplanie susceptible d'être recolonisé par la végétation, la hauteur moyenne de sédiments accumulée, le volume stocké dans l'ensemble des ouvrages ainsi que le volume sortant de la ravine. Le pourcentage d'extinction (taux de sédiments stoppés) correspond au ratio entre le volume stocké annuellement et le volume érodé sur les versants.

Analyse coûts-bénéfices d'une intervention de génie biologique

L'analyse coûts-bénéfices repose sur la méthode des coûts évités (Cemagref, 2002 ; Markandya *et al.*, 2002). Elle part du principe que chaque mètre cube de matériaux marneux piégé dans les ouvrages est un mètre cube de sédiments fins de moins à curer dans un barrage ou un tronçon de rivière situé à l'aval. Les dépenses correspondent aux coûts de construction des ouvrages. Les recettes sont le produit du nombre de mètres cubes retenus à l'amont par le prix unitaire moyen de curage d'un mètre cube à l'aval.

L'indicateur économique retenu est le bénéfice actualisé sur la séquence infinie. Il comprend la somme des investissements initiaux ainsi que les recettes annuelles jusqu'à l'infini (coûts évités de curage des sédiments) actualisés à l'année 0. Le principal avantage de cet indicateur est de permettre la comparaison directe de projets de génie biologique planifiés sur des périodes de temps différentes.

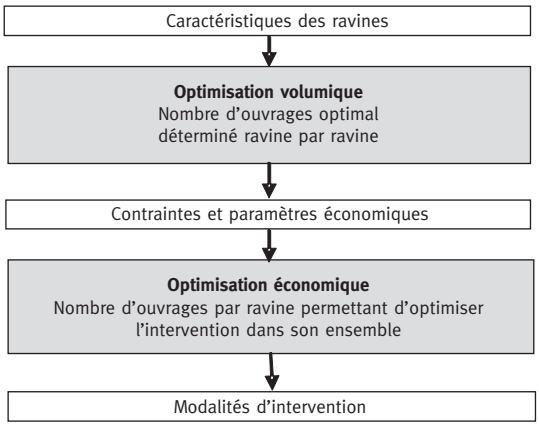
Optimisation d'une stratégie d'intervention

Pour un gestionnaire qui souhaite intervenir dans les ravines marneuses, la question principale est de déterminer le nombre d'ouvrages à installer par ravine. Ce nombre doit permettre d'atteindre des objectifs définis, exprimés sous forme d'un pourcentage d'extinction, tout en respectant des contraintes : un coût maximal d'investissement ou une extinction minimale locale. Précisons ici qu'il n'est pas fixé de nombre minimal de seuils à installer pour s'assurer de leur résistance lors de très fortes pluies, les expérimentations ayant montré que les ouvrages, même isolés, sont généralement en mesure de résister dans des petites ravines (Rey, 2009a).

La démarche d'optimisation comprend deux étapes :

— l'optimisation volumique qui détermine le nombre optimal d'ouvrages régulièrement espacés à installer dans chaque ravine,

— l'optimisation économique qui, à partir des résultats de l'optimisation volumique, détermine dans quelles ravines il serait bénéfique d'augmenter ou de diminuer l'intensité de l'intervention en fonction de contraintes fixées par l'utilisateur.



L'enchaînement de ces deux étapes est présenté dans la figure 5 (ci-contre).

Figure 5
ENCHAÎNEMENT DES DEUX ÉTAPES DE L'OPTIMISATION

Pour chaque ravine, l'optimisation volumique cherche à maximiser le volume unitaire[3] stocké par les ouvrages durant la période d'optimisation choisie par l'utilisateur (figure 6, ci-dessous).

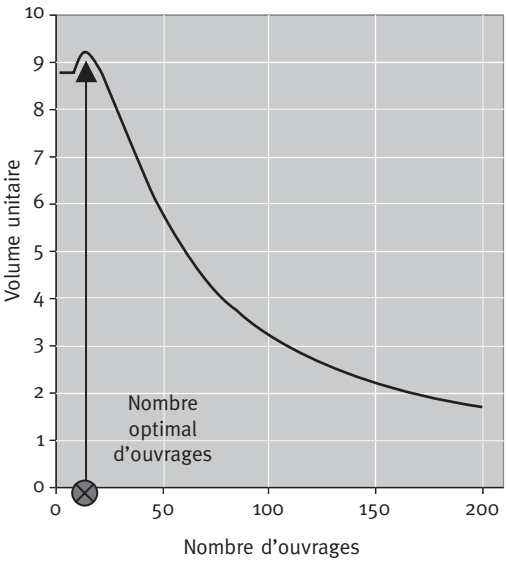


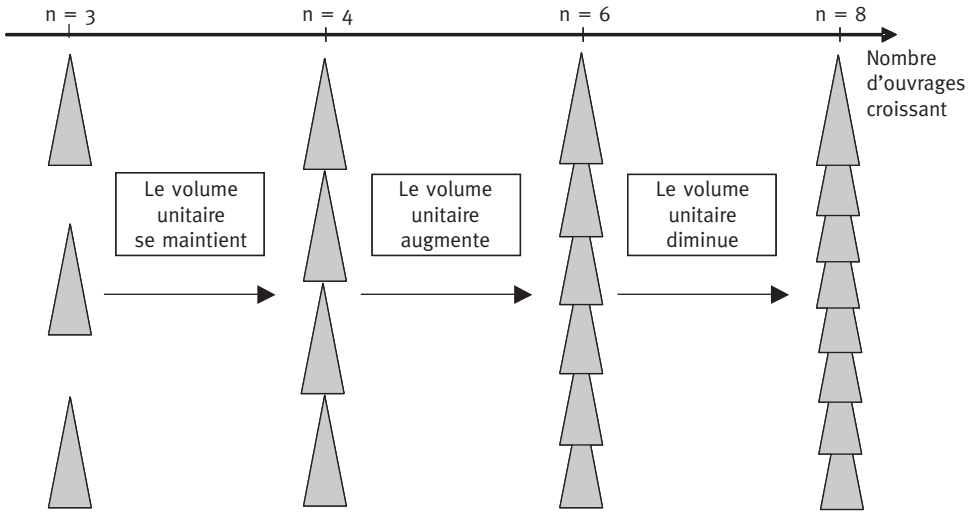
Figure 6
ÉVOLUTION DU VOLUME UNITAIRE EN FONCTION DU NOMBRE D'OUVRAGES

Le volume unitaire stocké s'accroît au cours du temps sous l'action conjuguée de l'augmentation de la section horizontale et, dans le cas d'un ouvrage avec regarni ou d'une installation spontanée de la végétation, de la pente d'atterrissement, à condition que les atterrissements des différents ouvrages n'entrent pas en contact. Lorsque c'est le cas, une partie de la capacité de stockage n'est pas valorisée (cf. figure 4, p. 530). Cette "perte" peut être compensée par le gain lié à l'installation d'ouvrages supplémentaires. Dans un premier temps, le volume unitaire augmente. Toutefois, à partir d'un certain nombre d'ouvrages, le volume perdu par troncature des atterrissements devient plus important que le gain en volume lié à l'installation de nouveaux ouvrages. Le volume unitaire diminue.

(3) Le volume unitaire est défini comme le rapport entre le volume total stocké et le nombre d'ouvrages.

La figure 7 (ci-dessous) schématise la capacité de stockage pour une année donnée en fonction du nombre d'ouvrages. L'augmentation de la capacité unitaire de stockage est d'autant plus forte que les pentes en travers et en long de la ravine sont faibles.

FIGURE 7 **REPRÉSENTATION EN PROJECTION HORIZONTALE DES ATTERRISSEMENTS À L'AMONT DES OUVRAGES, avec visualisation de l'évolution du volume unitaire en fonction du nombre d'ouvrages (n) placés dans le lit d'une même ravine et à une même date**



En résumé, le nombre d'ouvrages va jouer sur la vitesse d'extinction. Le volume unitaire stocké va pour sa part directement influencer l'efficacité économique. Le gestionnaire pourra agir sur ces deux paramètres en fonction des souhaits des acteurs locaux et des financeurs. Pour un nombre d'ouvrages proposé par l'optimum volumique, sans contrainte particulière quant à la vitesse d'extinction des ravines, il est préférable de répartir ces ouvrages en priorité dans les ravines qui ont une faible pente en travers. En revanche, si les acteurs locaux souhaitent éteindre rapidement un groupe de ravines en particulier, le gestionnaire devra y concentrer les moyens financiers mis à sa disposition.

L'optimisation volumique propose un nombre d'ouvrages par ravine qui dépend uniquement des caractéristiques de cette ravine. Mais les stratégies d'intervention sont élaborées aux échelles plus vastes des bassins versants. L'objectif de l'optimisation économique est de proposer une stratégie sur un ensemble de ravines. En effet, le nombre d'ouvrages proposé par l'optimisation volumique pour chaque ravine est ajusté afin de répondre au mieux aux objectifs et contraintes fixés à l'échelle du bassin versant par l'utilisateur (vitesses d'extinction par groupe de ravines, coût global, etc.).

Pour chaque ravine, le processus d'optimisation économique évalue l'efficacité de l'action envisagée suivant cinq modalités :

— conserver le nombre d'ouvrages (n) proposé lors de l'optimisation volumique,
— réduire ce nombre de moitié,
— doubler ce nombre,
— multiplier ce nombre par un facteur f ($f \geq 3$) calculé de façon à atteindre l'extinction globale minimale requise par les décideurs (dans la limite d'un ouvrage par mètre linéaire),
— multiplier ce nombre par le double de ce facteur.

L'optimisation économique recherche, pour l'ensemble des ravines, la combinaison d'application de ces modalités qui maximise le bénéfice (tableau I).

Tableau I **Représentation schématique d'une combinaison de modalités retenue par le modèle**

Ravine	Nombre d'ouvrages à installer				
	$n / 2$	n	$2 \times n$	$f \times n$	$2 \times f \times n$
R1		×			
R2	×				
R3				×	
R4					×
...					
Ri.	×				

L'optimisation économique permet d'améliorer les résultats de l'optimisation volumique en proposant une stratégie d'intervention adaptée aux impératifs financiers exprimés par les décideurs et les acteurs.

DONNÉES D'ENTRÉE DU MODÈLE

Modélisation quantitative du stockage de sédiments

Au niveau d'une ravine, le volume mobilisable dépend de la vitesse d'érosion, de la surface et de la couverture végétale de la ravine. La vitesse d'érosion dépend principalement de la morphologie de la ravine, de la lithologie, des facteurs climatiques et du couvert végétal.

Les données nécessaires au calcul du volume stockable année après année dans une ravine suite à l'installation d'ouvrages sont alors :

— le nombre d'ouvrages,
— la hauteur de sédiments accumulée chaque année,
— la surface drainée par la ravine,
— la longueur du lit traitée,
— la pente en long, qui correspond à la pente du lit de la ravine,
— la pente en travers, qui correspond à la pente des versants,
— le type de dynamique de végétation.

La hauteur de sédiments stockée annuellement par ouvrage dépend de la croissance du cordon de saules et des apports en matériaux marneux. Une méthode permettant de déterminer ces valeurs suivant les caractéristiques propres à la zone étudiée est en cours d'établissement. Actuellement, ce paramètre est renseigné avec des valeurs moyennes issues d'expérimentations (Rey, 2009a).

La longueur du lit, sa pente en long, la pente en travers moyenne au niveau du lit et la surface de la ravine peuvent être calculées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) ayant un pas suffisamment petit (2 mètres au maximum). De tels MNT n'étant actuellement pas commercialisés, le Cemagref se les est procurés sur l'ensemble des zones marneuses érodées du bassin versant de la Durance, à partir de missions photographiques aériennes spécifiques.

La présence de végétation dans le tiers inférieur des versants des ravines est un bon indicateur de la vitesse de colonisation naturelle des atterrissements (Burylo *et al.*, 2007). Cette présence peut être identifiée à partir d'orthophotos infrarouge couleur, par une analyse par ravine du rapport rouge (végétation) sur bleu (sol à nu). Il permet à l'utilisateur de choisir parmi les dynamiques de végétation proposées par le modèle.

Par convention, le volume stocké annuellement ne peut pas être supérieur à un seuil fixé par l'opérateur (par défaut 90 % du volume mobilisable).

Analyse coûts-bénéfices d'une intervention de génie biologique

L'utilisateur fixe un taux d'actualisation (4).

Il peut ensuite modifier les coûts d'installation des ouvrages et de curage des lits de rivière à l'aval. Par défaut, la valeur proposée pour le coût de curage est de 15 € par mètre cube (Della Torre et Rey, 2004). Les expérimentations réalisées sur de vastes zones ont fait état d'un coût unitaire d'installation des ouvrages complets égal à 80 € (Rey, 2009b). Ce coût est majoré de 25 % en cas d'installation d'un regarni. Il s'agit d'un coût unitaire constant quelle que soit la densité d'ouvrages installés, pour la construction d'une série d'ouvrages sur un chantier en une seule fois.

Optimisation d'une stratégie d'intervention

L'opérateur doit déterminer les bassins versants sur lesquels il souhaite intervenir. Ces bassins sont choisis en fonction des enjeux nécessitant l'atténuation des impacts négatifs de l'accumulation de sédiments.

L'ensemble des ravines où il est souhaitable d'intervenir a été identifié grâce à deux outils développés par Rey (2009a) :

— une typologie de la sensibilité de ravines à l'érosion,

— des règles d'intervention précisant les conditions favorables d'utilisation d'ouvrages de génie biologique. Par exemple, les ravines élémentaires doivent avoir une taille inférieure à un hectare afin d'éviter un débit trop important lors d'épisodes orageux.

L'utilisateur détermine la période de temps au bout de laquelle il souhaite que l'intervention soit évaluée et optimisée.

L'objectif et les contraintes de l'intervention planifiée peuvent être précisés par l'utilisateur. L'objectif est exprimé par un pourcentage d'extinction global à atteindre pour les ravines traitées au bout de la période d'optimisation. Les contraintes sont formalisées sous la forme d'un coût maximal d'intervention et d'extinctions minimales à atteindre localement au bout de la période d'optimisation pour un sous-ensemble donné de ravines.

La notion de strate permet de localiser les enjeux. Une strate est un ensemble de ravines reliées à un même enjeu. Des contraintes spécifiques à cet enjeu peuvent être ajoutées (figure 8, p. 536).

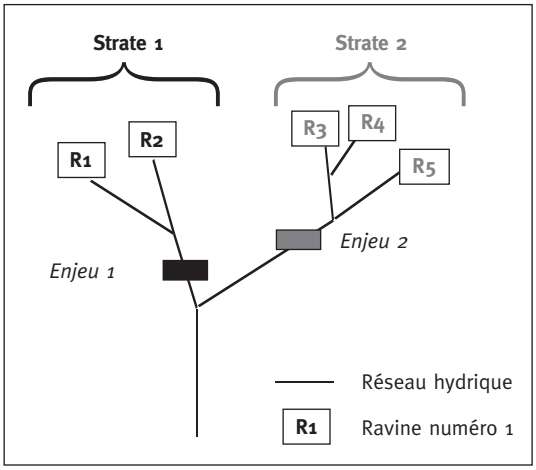
Ces objectifs doivent être déterminés par les décideurs en concertation avec les différents acteurs concernés à l'échelle de la zone supportant les conséquences de l'intervention.

(4) Taux d'actualisation (r) : taux qui exprime la préférence des individus pour le présent (une recette reçue l'année $n + 1$ apporte moins de satisfaction qu'une recette reçue l'année n). Il permet d'actualiser les dépenses et recettes futures d'après le principe suivant :

— la dépense initiale Do équivalente à une dépense Dn survenant à l'année n est égale à $Do = Dn/(1 + r)^n$;

— le taux d'actualisation est paramétrable. Par défaut, il est fixé à 5 %.

Figure 8
REPRÉSENTATION DE DEUX STRATES DÉFINIES EN FONCTION DE DEUX ENJEUX DIFFÉRENTS



Cette zone englobe les ravines marneuses à l'origine de l'aléa et le réseau hydrique à l'aval où l'action est susceptible d'avoir des conséquences perceptibles dans les décennies à venir.

RÉSULTATS

Sorties du modèle

Le modèle fournit le nombre optimal d'ouvrages à installer dans chacune des ravines traitées.

Les grandeurs de synthèse calculées par le modèle pour le scénario retenu sont :

— le volume érodé annuellement,
— le volume piégé au cours de la période d'optimisation,
— le pourcentage d'extinction atteint au cours de la période d'optimisation,
— les coûts engendrés par l'installation des ouvrages,
— le bénéfice actualisé sur la séquence infinie.

Le volume érodé annuellement et le pourcentage d'extinction atteint au cours de la période d'optimisation sont déclinés par strate.

Comparaison de l'impact des différents types d'ouvrages

La figure 9 (p. 537) illustre le volume de sédiments sortant d'une même ravine traitée avec le même nombre d'ouvrages, selon le type d'ouvrage utilisé :

— avec regarni,
— avec une dynamique de la végétation et sans regarni,
— sans dynamique de la végétation et sans regarni.

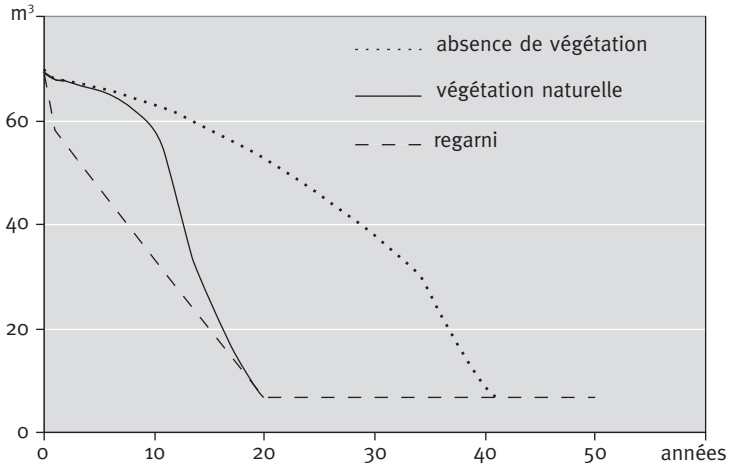
Le volume de sédiments sortant de la ravine diminue beaucoup plus vite lors de l'utilisation d'ouvrages avec regarni que dans les cas sans regarni.

Application

Le modèle a été appliqué à huit ravines fictives dont les caractéristiques correspondent à huit ravines types définies après analyse typologique d'un échantillon de 3 500 ravines (soit un dixième de l'ensemble des ravines du bassin versant de la Durance) sensibles à l'érosion et traitables par les techniques de génie biologique (Rey, 2009b). La typologie n'intègre volontairement pas la pente en travers car la mesure de cette variable de manière automatisée à l'aide d'un SIG reste à ce jour trop imprécise.

La figure 10 (p. 537) présente les résultats globaux de l'optimisation d'une stratégie d'intervention sur une période de dix ans pour ces huit ravines, en considérant qu'il n'existe pas de dynamique de végétation sur les atterrissements.

Figure 9
EXEMPLE D'ÉVOLUTION DU VOLUME DE SÉDIMENTS SORTANT D'UNE RAVINE AU COURS DU TEMPS EN FONCTION DU TYPE D'OUVRAGE INSTALLÉ



Le nombre d'ouvrages proposé par l'optimisation volumique est fortement lié à la longueur du lit et à la pente en long. L'optimisation économique conserve le nombre d'ouvrages proposé lors de l'optimisation volumique, sauf pour les ravines 4 et 5 où ce nombre est doublé. Ces deux ravines présentent une forte production sédimentaire et une faible pente en long : ces caractéristiques sont favorables à un piégeage important. Le modèle propose donc d'y augmenter le nombre d'ouvrages afin de maximiser le bénéfice retiré de l'intervention.

Dans cet exemple, le coût maximal n'est pas limitant. Le coût de l'opération proposée est presque deux fois inférieur au coût maximal envisagé. Les 152 ouvrages, répartis dans les huit ravines, permettraient de piéger 1 075 m³ de sédiments sur une période de dix ans. Au cours de la dixième année, 40 % des 437 m³ de sédiments érodés annuellement seront stoppés dans le lit de la ravine. Le bénéfice de l'opération, en comparaison avec le coût du curage de sédiments à l'aval, est de plus de 50 000 €.

Figure 10
CAPTURE D'ÉCRAN PRÉSENTANT DES RÉSULTATS DE SIMULFASCINE

Données par ravines

Caractéristiques des ravines									Intervention	
Identifiant	Strates (numérotées de 1 à n)	Dynamique de la végétation	Surface (m²)	Longueur (m)	Vitesse d'érosion (cm/an)	Pente en long (%)	Pente en travers (%)	Production annuelle (m³)	Nombre d'ouvrages Optimum volumique	**Nombres d'ouvrages Optimum économique**
1	1	1	1935	15	1	8%	75%	19	2	**2**
2	2	1	1990	20	1	28%	75%	20	6	**6**
3	3	1	3125	65	1	25%	75%	31	14	**14**
4	4	1	7500	45	1	11%	75%	75	4	**8**
5	5	1	7400	135	1	14%	75%	74	18	**36**
6	6	1	7215	35	1	29%	75%	72	10	**10**
7	7	1	7070	100	1	30%	75%	71	28	**28**
8	8	1	7500	170	1	31%	75%	75	48	**48**

Données globales

Objectifs globaux	
Extinction globale minimale	30%
Coût maximal	20 000 €

Caractéristiques globales de l'intervention	
Production annuelle totale	437 m3
Nombre total d'ouvrages	152
Coût	12 160 €
Bénéfice	52 966 €
Pourcentage total d'extinction	40%
Volume total piégé sur la période	1075 m3

DISCUSSION

Les premiers résultats obtenus ont été validés à dire d'expert. En effet, à ce jour, les données expérimentales nécessaires pour mener une validation et un calibrage sont encore insuffisantes. La mise en place de sites expérimentaux est récente (depuis 2002) et, pour les plus anciens, les suivis n'ont pas été réalisés dans une optique de calibrage. Seule une validation du paramètre de hauteur de sédiments accumulés a pu être réalisée sur plusieurs dizaines d'ouvrages.

En 2008, 672 ouvrages ont été installés dans un bassin versant expérimental de 73 ha (le Francon, associé à l'observatoire de recherche en environnement de Draix, dans les Alpes-de-Haute-Provence) (Rey, 2009b). Ce bassin a été équipé d'un dispositif de mesure du volume de sédiments produits à l'exutoire. De plus, après chaque événement pluvieux, plus de 350 ouvrages sont suivis de manière qualitative (maintien du rôle de piège à sédiments de l'ouvrage) et quantitative (hauteur et volume de sédiments stockés, survie et croissance des boutures). Le dispositif est complété par le suivi d'un bassin versant non traité présentant des caractéristiques similaires. L'étude de ce site et l'exploitation des résultats permettront dans les prochaines années de tester de manière robuste la validité de la modélisation quantitative du stockage de sédiments.

Cette absence de validation entraîne des incertitudes quant aux volumes calculés mais aussi quant à la capacité de stockage relative de chacun des différents types d'ouvrages qui peuvent être mis en œuvre. Cette différence, illustrée en figure 9 (p. 537), peut avoir des conséquences importantes dans le processus d'optimisation. Dans la mesure où le surcoût lié à l'installation d'ouvrages avec regarni reste faible comparé au gain en termes de stockage de sédiments, leur installation sera favorisée lors de l'optimisation. Afin d'assurer la cohérence des scénarios optimaux proposés, cette évolution relative du volume suivant le type d'ouvrage devra aussi être validée.

Actuellement, l'échelle de temps de Simulfascine est l'année. Sa transformation en un modèle événementiel est envisagée. Cette approche permettrait une meilleure modélisation des processus en jeu, notamment en améliorant la prise en compte de l'aléa météorologique.

Des expériences complémentaires permettront aussi de préciser l'efficacité de ces techniques dans des situations variées : ravine de deux ou trois hectares, ravines exposées au sud, influence des ouvrages placés à l'amont sur ceux situés en dessous… Le modèle devra évoluer pour intégrer les réponses apportées par cette démarche expérimentale.

CONCLUSIONS

Dans son état actuel, le modèle Simulfascine est destiné aux praticiens, aux gestionnaires et aux décideurs. Dès le printemps 2011, il sera proposé en test "grandeur nature" à ces acteurs dans le cadre d'un prochain chantier expérimental de grande ampleur, dans le bassin versant du Bouinenc (40 km^2, Alpes-de-Haute-Provence). Ce sera l'occasion de mettre à l'épreuve sa convivialité et son adaptabilité auprès des professionnels en charge du financement et de la réalisation d'un tel chantier.

Le processus de décision guidant les diverses parties prenantes à choisir un mode d'intervention pour contrôler l'érosion des marnes et la sédimentation dans un bassin versant peut être divisé en trois étapes :

— étape 1 : identification et hiérarchisation des enjeux,
— étape 2 : choix des objectifs et attribution d'une ressource financière pour les atteindre,
— étape 3 : mise en œuvre technique.

Dans un premier temps, le modèle peut être utilisé au cours de l'étape 2 par les décideurs, les gestionnaires et les parties prenantes. Il permet d'évaluer les effets de différents scénarios, aidant ainsi à déterminer l'intensité de l'intervention nécessaire et la ressource financière adéquate à l'atteinte des objectifs.

Par la suite, le gestionnaire peut à nouveau avoir recours à cet outil lors de l'étape 3 pour optimiser l'intervention (nombre d'ouvrages par ravine, type d'ouvrages, etc.) en fonction des objectifs et de la ressource financière allouée.

Dans tous les cas, ce processus de décision devra inclure l'ensemble des parties prenantes. L'outil Simulfascine devra donc être accessible pour chacun d'entre eux. Pour ce faire, une évaluation de l'outil par les différents utilisateurs pourra être conduite afin de vérifier qu'il répond bien à leurs besoins. Il devra être amélioré pour présenter les résultats de manière pertinente et simple pour tous les différents types d'utilisateur. Il devra également être adapté pour mieux s'intégrer aux processus de décision à grande échelle, prenant en compte d'éventuelles contraintes locales liées au déficit de matériaux alluvionnaires grossiers dans la Durance, responsable de phénomènes locaux d'incision du lit de la rivière.

Le modèle actuel est fonctionnel et pourrait être utilisé pour mettre au point une stratégie d'intervention sur l'ensemble du bassin versant de la Durance. Toutefois, son utilisation à grande échelle soulève des questions pratiques. Comment organiser la concertation liée à la définition d'objectifs ? Quelle organisation logistique permettra la mise en œuvre concrète de ces techniques ? Comment évaluer et suivre l'ensemble des impacts d'une opération à différentes échelles spatiales, de l'ouvrage de génie biologique à l'échelle du bassin versant de la Durance ? Ces éléments font déjà ou feront l'objet de travaux au Cemagref de Grenoble.

Géraud LAVANDIER
Ingénieur, chargé de mission « Plan Durance »
Unité de recherche Écosystèmes montagnards (EMGR)
CEMAGREF, Centre de Grenoble
2 rue de la Papeterie, BP 76
F-38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES cedex
actuellement
Responsable du bureau d'études pour les départements 30-34-48
Direction territoriale méditerranée
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
1 impasse d'Alicante
F-30000 NÎMES
(geraud.lavandier@onf.fr)

Laure DANGLA
Ingénieur, chargée de mission « Plan Durance »
Unité de recherche Écosystèmes montagnards (EMGR)
CEMAGREF, Centre de Grenoble
2 rue de la Papeterie, BP 76
F-38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES cedex
actuellement
Chargée de mission forêt
PARC NATUREL RÉGIONAL PÉRIGORD-LIMOUSIN
Maison du Parc - La Barde
F-24450 LA COQUILLE
(lauredpel@yahoo.fr)

Max BRUCIAMACCHIE
Enseignant chercheur
Laboratoire d'économie forestière
AgroParisTech ENGREF - Centre de Nancy
14 rue Girardet CS 14216
F-54042 NANCY cedex
(max.bruciamacchie@engref.agroparistech.fr)

Freddy REY
Chargé de recherche en écologie de la restauration appliquée aux milieux érodés de montagne
Unité de recherche Écosystèmes montagnards (EMGR)
CEMAGREF, Centre de Grenoble
2 rue de la Papeterie, BP 76
F-38402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES cedex
(freddy.rey@cemagref.fr)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les élèves-ingénieurs des 15e à 18e promotions de la Formation des ingénieurs forestiers (FIF) de l'ENGREF pour leur contribution active dans l'élaboration, le test et la validation de ce modèle.

BIBLIOGRAPHIE

BALLAND (P.), HUET (P.), LAFONT (E.), LETEURTROIS (J.-P.), PIERRON (P.). — Rapport sur la Durance – Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'État sur la gestion des eaux et du lit de la Durance – Contribution à un plan Durance. — MEDD ; MAAPAR ; METLTM, 2002. — 93 p.

BRAUDO (S.), BAUMANN (A.). — Dictionnaire du droit privé français. — 2009. — Site internet : http://www.dictionnaire-juridique.com/definition/risque.php. Consulté en janvier 2010.

BURYLO (M.), REY (F.), DELCROS (P.). — Abiotic and biotic factors influencing the early stages of vegetation colonization in restored marly gullies (Southern Alps, France). — *Ecological engineering*, vol. 30, n° 3, 2007, pp. 231-239.

CEMAGREF. — Guide du forestier méditerranéen : Évaluation des fonctions non marchandes. — Cemagref, 2002. — pp. 66-69.

DELCROS (P.), LEPOUTRE (M.), BURYLO (M.), REY (F.). — TLALOC : un modèle spatio-temporel de la dynamique des communautés végétales en lien avec la dynamique érosive et sédimentaire de ravines marneuses. — *Ingénieries EAT*, n° spécial "Écologie de la restauration et ingénierie écologique : enjeux, convergences, applications", 2009, pp. 121-134.

DELLA TORRE (S.), REY (F.). — Perturbations du système Durance-étang de Berre : origines de la menace, impacts écologiques, économiques et sociaux. — Saint-Martin-d'Hères : Cemagref - centre de Grenoble, 2004. — 31 p.

FROSSARD (P.A.), ÉVETTE (A.). — Le Génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante évolution. — *Ingénieries EAT*, n° spécial "Écologie de la restauration et ingénierie écologique : enjeux, convergences, applications", 2009, pp. 99-109.

MARKANDYA (A.), HAROU (P.), BELLÙ (L.G.), CISTULLI (V.). — Environmental Economics for Sustainable Growth. A handbook for practitioners — Edward Elgar Publishing Limited, 2002. — 528 p.

MATHYS (N.). — Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides. Cas des petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes-de-Haute-Provence). — Institut national polytechnique de Grenoble, 2006.— 346 p. (Thèse de doctorat).

REY (F.). — A strategy for fine sediment retention with bioengineering works in eroded marly catchments in a mountainous Mediterranean climate (Southern Alps, France). — *Land degradation and development*, vol. 20, 2009a, pp. 210-216.

REY (F.), coord. . — Expertise sur l'utilisation du génie biologique pour le contrôle de l'érosion et de la sédimentation. Bassin versant de la Durance. — Saint-Martin-d'Hères : Cemagref - centre de Grenoble, 2009b. — 81 p.

REY (F.), BALLAIS (J.-L.), MARRE (A.), ROVÉRA (G.). — Role of vegetation in protection against surface hydric erosion. [Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface]. — *Comptes rendus Géoscience*, vol. 336, 2004, pp. 991-998.

MODÉLISATION SPATIO-TEMPORELLE ET APPROCHE ÉCONOMIQUE DU PIÉGEAGE DE SÉDIMENTS DANS DES RAVINES MARNEUSES VÉGÉTALISÉES PAR GÉNIE BIOLOGIQUE : LE MODÈLE SIMULFASCINE (Résumé)

Le contrôle de l'érosion et de la sédimentation dans des ravines marneuses (petits bassins versants d'une surface inférieure à un hectare) érodées peut être réalisé à l'aide d'ouvrages de génie biologique, ensemble de techniques et outils utilisant le végétal pour lutter contre les phénomènes érosifs. L'un des enjeux de la lutte contre l'érosion consiste à établir différentes stratégies d'application de ces techniques et à en évaluer les coûts et les avantages. Pour cela, un outil interactif a été développé à l'attention des praticiens, gestionnaires et décideurs, leur permettant de réaliser des tests virtuels d'intervention, afin de déterminer la solution la plus rentable économiquement pour un piégeage efficace et durable de sédiments. Cet outil, nommé Simulfascine, permet de réaliser une modélisation spatio-temporelle et une analyse économique du piégeage de sédiments dans des ravines marneuses végétalisées par génie biologique.

SPATIO-TEMPORAL MODELS AND ECONOMIC APPROACH TO SEDIMENT ENTRAPMENT BY BIOENGINEERED REVEGETATION ON GULLY-ERODED MARLSTONE BEDS - THE *SIMULFASCINE* MODEL (Abstract)

Erosion and sedimentation control in eroded gullies on marlstone beds (small catchments of less than one hectare in surface area) can be achieved through bioengineering, i.e. by a set of techniques and tools that use plants to contain erosive phenomena. One challenging phase in erosion control is determining the various strategies for applying these techniques and assessing their respective costs and benefits. An interactive tool designed for field personnel, managers and policy-makers has been developed for that purpose. *Simulfascine* performs virtual tests for interventions so as to identify the least costly solution for effective, lasting sediment entrapment using a spatio-temporal model and a cost-benefit analysis of sediment entrapment on gullies in marlstone beds by means of biologically engineered revegetation.