



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche
pour la prévention des Risques Naturels



Programme de recherche 2008

Financé par le Conseil général de l'Isère

Rapport final

Le bois raméal fragmenté (BRF) en végétalisation pour la lutte contre l'érosion de surface

Coordinateur :

Freddy REY
(Cemagref Grenoble, UR EMGR)

Participants :

Vincent BRETON, Sylvain MEISTERMANN
(Cemagref Grenoble, UR EMGR)

Yves CROSAZ
(Bureau d'étude Géophyte)



Décembre 2009



Table des matières

Table des matières	2
Introduction	3
I) Le BRF : une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion	4
• La technique du BRF	4
➤ Définition	4
➤ Le principe	5
➤ Intérêts pour la lutte contre l'érosion (hypothèses)	6
• Le BRF et la réglementation	7
➤ Le BRF est une matière fertilisante	7
➤ Le BRF est un produit qui doit être conforme à la norme NF U44-051	7
➤ L'épandage du BRF doit se conformer à la norme NF U44-051	7
II) Protocole expérimental	8
• Matériels	8
• Méthodes	10
➤ La technique d'épandage :	10
➤ Suivis :	11
• Maintien du BRF	11
• Quantification de l'érosion	12
• Suivi de la dynamique végétale et fongique	13
• Suivi de l'évolution du taux de matière organique	16
III) Résultats et interprétations	17
• Qualité du BRF	17
• Maintien du BRF	17
• Interactions avec les sédiments	21
• Suivi de la dynamique végétale et fongique	25
• Suivi du taux de matière organique	29
Conclusion	32
Abstract	33
Table des illustrations	34
Annexes	35
Bibliographie	45

Introduction

L'érosion constitue un phénomène naturel aux conséquences souvent préoccupantes et dommageables (Poesen *et al.*, 2003). La maîtrise de l'érosion représente un défi majeur sur les espaces où se localisent des enjeux socio-économiques, aussi bien dans certains milieux semi-naturels (bassins versants torrentiels) que dans les milieux fortement anthropisés (talus, berges de rivières et de lacs, zones agricoles, carrières, pistes de ski). Le département de l'Isère regroupe l'ensemble des milieux cités et se retrouve par conséquent particulièrement concerné (Figure 1).

Il est largement admis aujourd'hui que la végétation peut jouer un rôle très efficace de protection des sols contre l'érosion de surface (Crosaz, 1995 ; Rey *et al.*, 2004). L'installation d'une couverture végétale nécessite généralement une intervention de l'homme pour stabiliser les terrains et introduire du matériel végétal pionnier.

Cependant, les conditions de milieu ne permettent pas toujours un bon développement de la végétation (Burylo *et al.*, 2007). Certains terrains (marneux par exemple) constituent des milieux hostiles, aux conditions difficiles à l'implantation des végétaux. Par ailleurs, les changements climatiques en cours sont susceptibles d'aggraver la situation, par l'augmentation tant du stress hydrique que des températures.

Des solutions sont donc à rechercher aujourd'hui pour favoriser le développement des espèces végétales pionnières sur les milieux érodés. L'une des pistes entrevues serait d'utiliser le Bois Raméal Fragmenté (BRF). C'est un matériau végétal composé de branches de moins de 7 cm de diamètre fraîchement broyées. Des premières expérimentations semblent en effet montrer des capacités dans le domaine de la lutte contre l'érosion (Dodelin *et al.*, 2007 ; Maricato, à paraître).

L'objectif de ce projet était de déterminer l'efficacité du BRF pour : 1/ la lutte contre l'érosion, en particulier dans des contextes où les contraintes hydrauliques sont fortes (pluies intenses) et les terrains fortement érodés (ravines dans les bassins versants torrentiels) (objectif à court terme) ; 2/ la facilitation du développement végétal dans des milieux érodés de montagne, qui doit permettre d'accentuer durablement l'efficacité de la protection contre l'érosion (objectif à plus long terme). Il s'agissait alors de rédiger une fiche d'information et de recommandations concernant l'utilisation pratique du BRF dans une optique de protection des sols.



Figure n°1-Terrains érodés (Le Thauc, Isère)

I) Le BRF : une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion

La technique du BRF

➤ *Définition*

➤ *Historique du BRF*

L'histoire du BRF a débuté dans les années 1970 au Canada lorsque la valorisation des résidus d'élagage issus des arbres situés sous les lignes à haute tension a posé question. Ces branchages ont été broyés et utilisés chez des agriculteurs en tant qu'amendement organique. Les essais réalisés ont eu des effets plutôt encourageants. Les rendements en culture ont connu un accroissement les années suivant l'épandage de BRF. A partir de ce moment, plusieurs études ont été engagées par Gilles Lemieux, de l'université de Laval au Québec, sur des sols forestiers dégradés et sur des sols agricoles recevant du BRF. Depuis, ce dernier tente de diffuser cette technique à travers le monde.

Malgré les efforts de communication d'universitaires canadiens, cette technique s'est très peu répandue jusqu'à la fin des années 90, faute d'intérêt de la part des financeurs. Aujourd'hui encore cette technique est encore très peu connue en France, où seuls quelques agriculteurs précurseurs l'utilisent fréquemment. Un colloque international a été organisé à Lyon en 2007 par l'association Bois Mort, Agriculture et Forêt pour tenter de mettre en relation les différents acteurs qui pourraient tirer bénéfice de cette technique.

➤ *Composition*

Selon Gilles Lemieux, le terme Bois Raméal Fragmenté, désigne les résidus du broyage de branches de diamètre inférieur à 7 cm, issues d'élagages ou de coupes en forêt (*figure 2*). Un broyat issu de feuillus (bois durs à forte teneur en tannins tels que le chêne, le châtaignier, l'érable, le hêtre) est préférable (*figure 3*). En effet le bois du tronc n'est pas utilisé en BRF car il comporte trop peu de lignine et sa valorisation pour des usages classiques, bois d'œuvre notamment, est autrement plus rentables (Lemieux, 1998).

D'autres auteurs apportent des préconisations.

Les résineux sont à éviter car ils contiennent une lignine plus difficilement dégradable par les champignons. Toutefois il est possible d'accepter jusqu'à 20% de broyat de conifères dans la composition du BRF. Certaines familles de bois sont à proscrire car toxiques pour les champignons et bactéries, tels que les thuyas ou les eucalyptus (Asselineau et al., 2007 ; Dupety, 2007).

➤ *Préparation*

Le bois raméal est fragmenté par différents procédés mécaniques notamment par les entreprises d'élagage (broyeurs à couteaux ou à marteaux).

➤ *Période de mise en place*

Pour que le BRF ne contienne pas de feuilles, il est prélevé en période hivernale après la chute des feuilles et avant la reprise des bourgeons, lorsque la lignine est moins « dure » que plus tard en été.

➤ *Stockage*

Le BRF est stocké le moins longtemps possible, en milieu aéré, avant son épandage in situ pour éviter tout risque de fermentation. Il est en effet impératif d'éviter une augmentation de la température (démarrage du compostage) qui remettrait en cause ultérieurement le développement naturel d'une flore fongique.



Figure n°2-Bois raméal



Figure n°3-BRF fraîchement broyé

➤ *Le principe*

Cette technique imite la pédogénèse des sols forestiers en recréant le procédé d'humification naturelle des sols à partir de la décomposition des branches par la faune et la flore du sol. Elle est différente de celle du compostage qui rend directement accessible aux plantes les éléments chimiques issus de la fermentation de la matière organique, mais sans structuration du sol.

Le processus se déroule en plusieurs étapes successives.

L'étape de fragmentation par des moyens mécaniques humains du bois raméal est essentielle. Elle permet de rompre la barrière étanche physico-chimique constituée de cires, de polyphénols ainsi que de résines qui empêchent la flore fongique d'avoir un accès aux constituants du bois. Ainsi les hyphes des champignons basidiomycètes peuvent pénétrer plus profondément dans le bois pour pouvoir dégrader la cellulose puis la lignine.



Figure n°4-Mycélium

L'étape de dégradation du bois n'est pas instantanée. En effet la cellulose ne peut être dégradée que par des champignons basidiomycètes dont les spores sont déjà présentes sur les branches. Ces champignons vont se développer rapidement dans le BRF, sous forme de mycélium, parfois appelé pourriture blanche (*figure 4*). Ils puiseront dans un premier temps l'énergie nécessaire à leur croissance dans l'azote minéral présent dans la solution du sol, parfois au détriment des autres plantes (phénomène de faim d'azote pour les cultures). Par la suite, ces champignons émettront des enzymes qui dépolymériseront la cellulose du bois en composés azotés. La dépolymérisation de la cellulose dégagera aussi des acides humiques qui vont avoir un rôle important dans l'humification du sol.

Une fois la cellulose dégradée, l'accès au reste des constituants du bois (lignine, hémicellulose...) est rendu possible et leur dégradation est assurée par la microfaune édaphique et par les bactéries.

L'étape de structuration du sol est assurée par la pédofaune qui se nourrit du mycélium, des micro-organismes contenus dans le BRF ainsi que des produits issus de la dégradation du BRF. Les arthropodes, collemboles et nématodes, entre autres, augmentent la porosité du sol, et redistribuent les minéraux à travers les différents horizons.

On doit également souligner le rôle important des polysaccharides produits par la flore fongique qui lient les différents complexes argilo humiques en agrégats, et qui sont à la base d'une augmentation de la fertilité du sol.

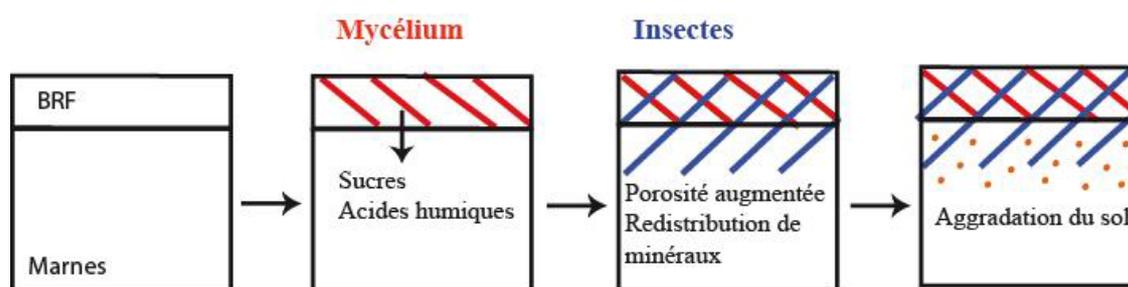


Figure n°5- Schéma simplifié de l'action du BRF sur le sol.

➤ **Intérêts pour la lutte contre l'érosion (hypothèses)**

• **Action physique**

Du point de vue de l'action physique du BRF, l'hypothèse proposée est que celui-ci peut se maintenir en place après une phase de colonisation par le champignon. Le tapis de BRF pourrait alors jouer un rôle de protection mécanique du terrain en absorbant l'énergie cinétique des gouttes de pluie et en évitant ainsi le choc destructeur de ces gouttes sur les agrégats (effet splash). On peut alors s'attendre à une diminution de la croute de battance et donc à une meilleure infiltration de l'eau dans le sol. Le BRF pourrait également ralentir le ruissellement de surface, au profit d'un écoulement hypodermique moins érosif. On peut enfin penser que le BRF contribuera à retenir, de la même façon qu'un filet posé sur le sol, les matériaux issus de l'érosion et mis en mouvement par la gravité et par le ruissellement (correction de versant). Le BRF pourrait également piéger les sédiments. La matière organique issue de la dégradation du BRF est alors directement en contact avec des particules fines minérales (argiles). La formation de complexes argilo-humiques serait favorisée (figure 6).

• **Action biologique**

Du point de vue de son action biologique, le BRF devrait mener à une restructuration du sol par la faune et la flore, ce qui devrait permettre une augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol. De plus, on espère la formation d'un humus mince dans le fond des ravines qui devrait également permettre la rétention d'un volume important d'eau. On peut supposer que le BRF servira de support d'ancrage favorisant la dynamique de reconquête végétale en terrain difficile. En effet les fragments de rameaux vont piéger les semences disséminées par différents vecteurs, qui se mélangeront aux argiles également piégées. Le substrat est alors nourricier et donc favorable au développement de ces plantes. L'enracinement de ces jeunes pousses permettra de lutter efficacement contre l'érosion (figure 6).

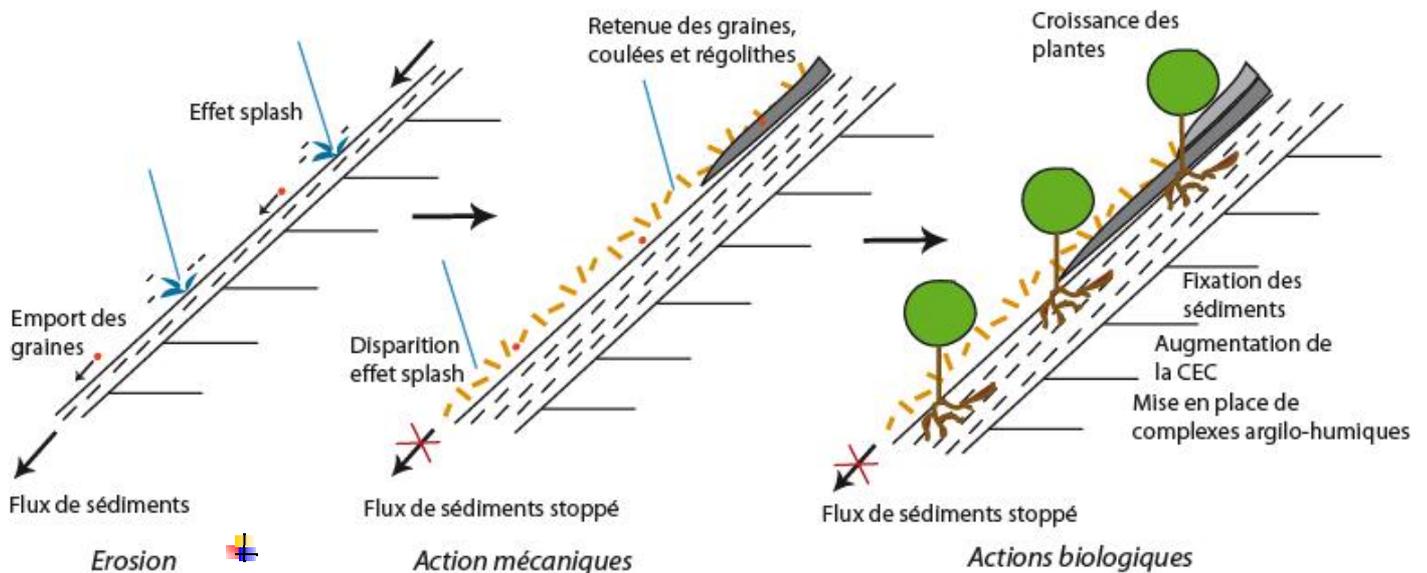


Figure n°6-Schéma du processus anti érosif escompté du BRF

Le BRF et la réglementation

➤ *Le BRF est une matière fertilisante*

L'alinéa 1 de l'article L255-1 du code rural précise que « *les matières fertilisantes comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols* ».

Or, les travaux scientifiques menés jusqu'à ce jour (Dodelin et al., 2007) montrent clairement que l'épandage de ce matériau sur le sol (avec ou sans incorporation avec le terrain récepteur, suivant les pratiques) modifie les propriétés du sol : par exemple l'amélioration des propriétés physiques (portance) et/ou biologiques (augmentation de la biodiversité micro-faunistique). Le BRF est donc sans nul doute une matière fertilisante.

➤ *Le BRF est un produit qui doit être conforme à la norme NF U44-051*

L'article L255-2 du même code indique également que :

- « *Il est interdit d'importer, de détenir en vue de la vente, de mettre en vente, de vendre, d'utiliser ou de distribuer à titre gratuit, sous quelque dénomination que ce soit, des matières fertilisantes et des supports de culture lorsqu'ils n'ont pas fait l'objet d'une homologation ou, à défaut, d'une autorisation provisoire de vente, d'une autorisation de distribution pour expérimentation ou d'une autorisation d'importation* ».

- « *Toutefois, sous réserve de l'innocuité des matières fertilisantes ou supports de culture à l'égard de l'homme, des animaux, ou de leur environnement, dans des conditions d'emploi prescrites ou normales, les dispositions du premier alinéa ne sont pas applicables aux produits dont la normalisation, au sens de la loi du 24 mai 1941, a été rendue obligatoire* ».

A l'instar des très grandes quantités de bois morts qui tombent chaque année au sol dans les forêts, l'innocuité des branches broyées à l'égard de l'homme, des animaux, ou de leur environnement peut manifestement être considérée comme vraie.

Or la norme NF U44-051 (avril 2006) relative aux amendements organiques et supports de culture (norme qui entre dans le cadre de la réglementation globale - articles L255-1 à L255-11 du code rural - applicables aux matières fertilisantes et aux supports de culture), fait entrer dans le champ normatif le type « *matière végétale (mono produit) sans addition, sans transformation autre que physique tels que marcs de raisin, pailles, tourteaux, broyats végétaux* ».

Le BRF est donc utilisable sans homologation ou, à défaut, d'une autorisation provisoire de vente, d'une autorisation de distribution pour expérimentation ou d'une autorisation d'importation puisque la norme NF U44-051 lui est applicable.

➤ *L'épandage du BRF doit se conformer à la norme NF U44-051*

La norme NF U44-051 précise en outre des flux maximaux par an et sur 10 ans (g/ha) à ne pas dépasser en ce qui concerne 9 ETM (éléments tracés métalliques) et 3 HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Ce sont les flux maximaux sur un an les plus contraignants.

La dose d'épandage de BRF est donc limitée ; la dose maximale annuelle épandable dépend des teneurs du BRF en ETM et HAP qui doivent être déterminées sur échantillons par des analyses effectuées en laboratoire.

II) Protocole expérimental

Matériels

- Les sites expérimentaux :

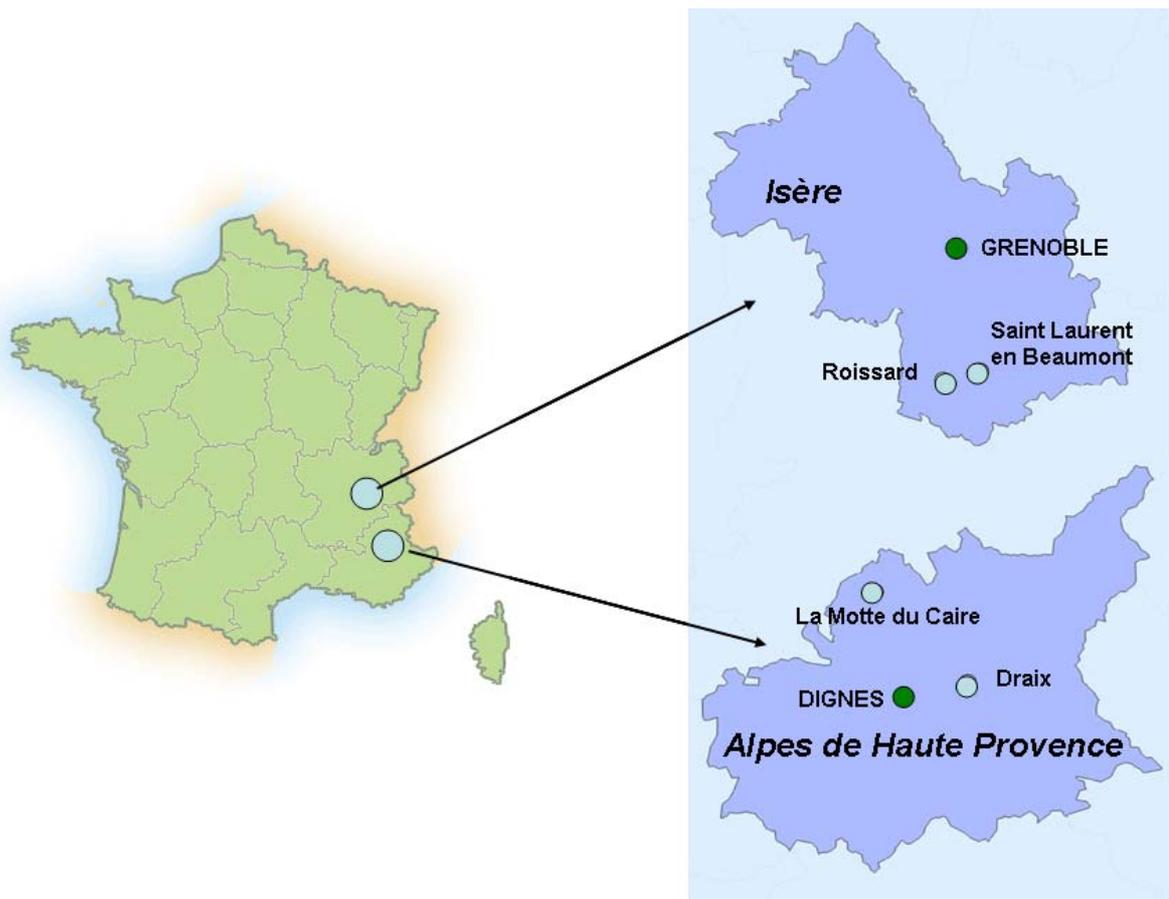
Les sites sélectionnés présentent des caractéristiques différentes (*tableau 1*), ce qui nous a permis de tester la capacité du BRF à lutter contre l'érosion en fonction d'un large choix de variables.

Ces sites sont situés dans les bassins versants du *Rif Fol* à Roissard et des *Garguettes* à Saint-Laurent-en-Beaumont dans le département de l'Isère, mais aussi dans ceux du *Brask* à La-Motte-du-Caire et du Bouinenc à Draix (*Col et Sévigné*) dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (*figure 7*).

Les sites expérimentaux retenus dans les Alpes du sud sont des sites dont les conditions environnementales ainsi que leur fonctionnement sont bien connus car suivis depuis des années par le Cemagref pour des problématiques d'érosion.

	Substratum	Climat	Orientation générale	Ensoleillement	Pente moyenne	Atterrissement issu d'ouvrage de génie biologique
Col	Marnes	Subméditerranéen montagnard	Sud	Très bon	Forte	Non
Sévigné	Marnes	Subméditerranéen montagnard	Sud	Très bon	Faible	Non
Brask	Marnes	Subméditerranéen montagnard	Sud Ouest	Très bon	Moyenne	Oui
Rif Fol	Alluvion fluvioglaciaire	Montagnard	Sud Est	Bon	Forte	Oui
Garguettes	Alluvion fluvioglaciaire	Montagnard	Nord Ouest	Moyen	Moyenne	Oui

Tableau n°1 - Caractéristiques des sites retenus pour l'expérimentation



- Le BRF utilisé :

L'approvisionnement d'un chantier en BRF est une problématique importante et soumise à deux paramètres interdépendants : d'une part l'éloignement entre la ressource initiale en bois et la localisation du chantier et d'autre part la rapidité dont il faut faire preuve pour broyer les branches, transporter et épandre le broyat.

Pour les 2 sites Isérois, la livraison en vrac du BRF (appelé BRF 38) a été réalisée par une entreprise paysagiste de la région Grenobloise spécialisée dans l'élagage des arbres, les essences broyées étant du marronnier et de l'érable (broyeur à couteaux). Pour les sites des Alpes de Haute Provence (BRF 04), il s'agit d'une autre entreprise paysagiste localisée à proximité de Dignes les Bains qui a livré en vrac sur le site de Draix du broyat de branches de peupliers (broyeur à marteaux). Le transport vers le site de la Motte du Caire a été effectué le lendemain par nos soins.

Dans les 2 cas, seule une participation au transport a été demandée et nous remercions ici ces deux entreprises pour leur disponibilité.

Le jour de la livraison sur site, un échantillon de BRF a été prélevé pour chacune des 2 origines et envoyé au laboratoire pour analyse des éléments suivants : MS, azote total, phosphore, potassium, et teneur pour les 9 ETM de la norme NF U44-051 (Cr, Cu, Ni, Zn, Cd, Pb, Hg, Se et As).

La totalité des épandages a été réalisée les 19 et 20 mars 2009.

- La métrologie :
 - Stations météo de Laval

Le centre d'étude sur l'érosion de Draix présente plusieurs stations d'enregistrement pour les différents paramètres météorologiques. Les données que nous utiliserons seront issues de la station de Laval 2.

- Les plages de dépôt

De part la réalisation d'expérimentations passées, il subsistait une plage de dépôt à l'exutoire de chacune des ravines Col et Sévigné à Draix. Ces ouvrages permettront de mesurer le flux de matériaux emportés (sédiments et/ou BRF) à l'aval des ravines (Crosaz, 1995).

Méthodes

➤ *La technique d'épandage :*

- Le mode d'épandage

Dans l'optique d'observer le meilleur rapport effort/efficacité, nous avons choisi d'effectuer un épandage le plus simple possible. Nous n'avons donc pas mélangé le BRF aux premiers centimètres du sol, comme certains agriculteurs le conseillent¹. Le besoin en main-d'œuvre et en outil mécanisé est limité, c'est un avantage pour son utilisation future. De plus la topographie des ravines rendait toute mécanisation impossible.

- La répartition spatiale du BRF

La configuration particulière de ces sites a permis de tester plusieurs variables représentées dans le tableau ci après. (cf. : Annexes 1)

	Fond de rigole	Versant à faible pente avec ouvrage du génie biologique	Versant à faible pente sans ouvrage du génie biologique	Versant à forte pente avec ouvrage du génie biologique	Versant à forte pente sans ouvrage du génie biologique
Col	Ok				Ok
Sévigné	Ok		Ok		Ok
Brask	Ok	Ok			
Rif Fol		Ok		Ok	
Garguettes		Ok		Ok	

Tableau n° 2-Répartition du BRF au sein de chaque site.

Les sites des Alpes de haute Provence

Rey (2002) a constaté qu'il suffit de végétaliser 20% de la ravine (notamment en fond de rigole) pour réduire significativement la production de sédiments à son exutoire. Nous avons donc choisi d'épandre le BRF en fond de rigole. Nous y avons testé le maintien du BRF face à un ruissellement de surface concentré.

A titre de comparaison, du BRF a été épandu sur les versants raides des rigoles, afin de tester son aptitude à se maintenir en place et à fixer les particules marneuses. Cette correction de versant empêche ainsi les particules marneuses de rejoindre le fond de rigole. L'inclinaison maximale du terrain pour une bonne tenue du BRF a été testée sur les sites où il est épandu sur des versants à forte déclivité.

Les sites en Isère

Pour étudier la retenue des sédiments entraînés par un ruissellement diffus, ainsi que l'évolution de la dynamique de revégétalisation des zones traitées, nous avons choisi de déposer le BRF sur des atterrissements issus d'ouvrages de génie biologique.

Du BRF a été disposé sur des atterrissements présentant des plantations, afin d'observer une évolution de la croissance des espèces plantées.

Dans l'ensemble, la proportion de surface recouverte par du BRF par rapport à l'ensemble de la ravine est resté faible.

CF annexes plan de répartition du BRF.

➤ *Suivis :*

- *Maintien du BRF*

Une cartographie initiale des surfaces couvertes par le BRF a été effectuée pour chaque site. Par la suite les déplacements de BRF constatés ont été répertoriés.

Les ravines de Col et de Sévigné nous ont permis d'observer si du BRF, mélangé à des sédiments marneux, a été emporté hors du site d'étude en cas de fortes pluies.

Il peut exister des déplacements non visibles directement. C'est le cas lorsque du BRF est arraché en amont et redéposé en aval, le long d'une ravine ou d'un versant. Pour observer ces déplacements, d'amont en aval, il faut pouvoir déterminer des profils en long de l'épaisseur du BRF.

Des clous fins ont été disposés à intervalle régulier dans la ravine (*figure 8*). Le diamètre des clous a été choisi le plus fin possible, pour éviter tous phénomènes de rétention des sédiments et de BRF. L'intervalle de distance entre chaque piquet a été choisi pour être ni trop court (effet rétention du BRF et des sédiments), ni trop long (perte de précision du profil en long). Un intervalle de 2 mètres a finalement été retenu.

La hauteur entre la tête du clou et la surface du BRF a été mesurée à chaque visite. La mesure de cette distance effectuée au temps T=0, lors de l'implantation des clous, a servi de référence pour l'élaboration des profils.

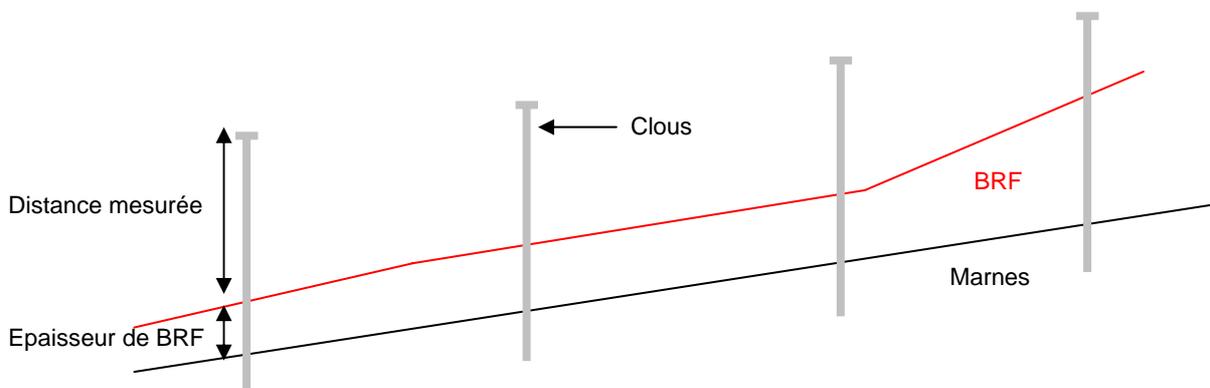


Figure n° 8 - Schéma du dispositif d'étude du profil en long du BRF

- *Quantification de l'érosion*

-L'observation des coulées de sédiments.

A chaque visite les coulées de sédiments ont été reportées sur un fond topographique. Il a également été noté quelques caractéristiques de la coulée (granulométrie, mélange avec le BRF,...).



Figure n°9 - Exemple de coulée de sédiments en fond de rigole

-Suivi des plages de dépôt

Les plages de dépôts de Col et de Sévigné ont permis de quantifier la perte de sédiments pour chacun des événements pluvieux.

Le volume de sédiments marneux déposés dans la plage de dépôt a été estimé de la même manière que pour le BRF dans le suivi de son maintien.

-Estimation du gain d'érosion

Le modèle mathématique de Borges permet d'estimer, avec cependant une marge d'erreur non négligeable, la quantité fournie de sédiments par une ravine à son exutoire, en fonction de l'intensité de la pluie. Lors de sa thèse, Yves Crosaz a appliqué ce modèle mathématique aux ravines de Col et de Sévigné (cf. : Annexe 3).

Ce modèle a été utilisé pour comparer le volume de sédiments prélevé dans les plages de dépôt, avec les volumes théoriques calculés. Une estimation de l'efficacité du traitement BRF sur les sites érodés a ainsi pu être effectuée.

- *Suivi de la dynamique végétale et fongique*

-Suivi du recouvrement du BRF par les basidiomycètes

Un plan d'échantillonnage (figure 10) a été réalisé pour chaque site expérimental. Des zones d'observation y ont été déterminées grossièrement afin de ne pas déranger la couche de BRF toujours au même endroit (précision de l'ordre du décimètre). Ces points d'observation n'ont pas été volontairement placés en bordure des placettes de BRF, afin de s'affranchir d'éventuels effets de bordure. La densité d'observation a été fixée à environ une par mètre carré.

Une valeur sur une échelle comprenant 4 degrés d'observation est donnée à chaque point :

0 : absence de mycélium.

1 : présence ponctuelle du mycélium.

2 : présence nette du mycélium, mais de façon discontinue.

3 : mycélium sur l'ensemble de la surface, assurant une cohésion du BRF.

Les fiches d'observation contenant le plan d'échantillonnage ont été complétées à chaque visite sur le terrain. Le nombre de visites de terrain a été limité à une par mois, elles ont été réalisées le plus précautionneusement possible de façon à ne pas perturber le milieu.

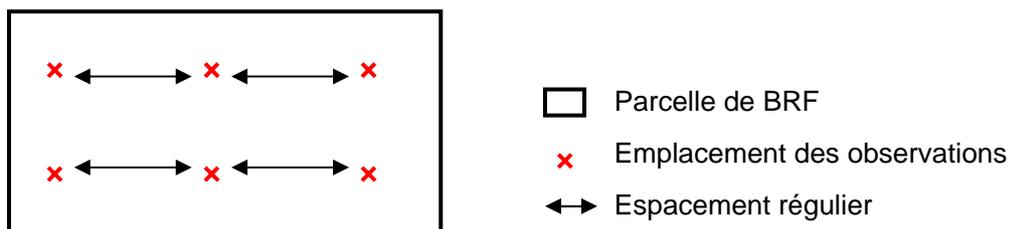


Figure n°10 - Exemple de plan de localisation des observations du BRF.

-Suivi de la dynamique végétale

La méthode classiquement utilisée pour effectuer un suivi de la dynamique végétale en fonction de différentes modalités est la méthode des quadrats. Elle s'applique à de grandes surfaces d'études, avec des quadrats de surfaces carrés (1m*1m) dont le placement s'effectue de manière aléatoire sur les différentes modalités. Un relevé exhaustif de la végétation y est effectué.

Pour respecter les critères d'analyses statistiques intra-sites, nous devons respecter au mieux 3 conditions :

- la même dimension de quadrats sur tout le site,
- un nombre suffisamment élevé de quadrats (meilleure fiabilité des analyses statistiques),
- le même nombre de quadrats dans les deux modalités (« sur BRF » et « hors BRF »).

Seul le site des Garguettes présentait les conditions nécessaires à la mise en place de ce protocole. En effet les autres sites ne permettent pas de disposer sur les surfaces recouvertes de BRF des quadrats suffisamment grands pour un bon suivi statistique.

En fonction de la surface du site des Garguettes, nous avons choisi de poser 20 quadrats (10 BRF + 10 hors BRF) de 80 cm de côté (*figure 11*). Ces quadrats sont de forme carrée afin de pouvoir prendre en compte les effets d'isotropie des recouvrements végétaux (orientation dirigée des recouvrements végétaux).

Les quadrats témoins ont été placés sur des surfaces aux conditions environnementales le plus homogène possible.

Les emplacements de ces quadrats ont été les mêmes à chaque relevé, puisque matérialisés in situ à l'aide de clous enfoncés dans la marne.

Afin d'éviter les phénomènes de bordures, les quadrats n'ont pas été placés directement sur les bords des surfaces recouvertes de BRF.

Pour chaque quadra, une estimation du pourcentage de recouvrement des différentes espèces végétales a été effectuée.

Un relevé botanique a été effectué sur tous les sites juste après la pose du BRF puis une fois par mois. Lorsqu'un événement pluvieux important a eu lieu, un relevé a été effectué (annexe 7).

A l'aide des cartographies de végétation réalisées, une comparaison de la densité de plantes en fonction de la modalité « BRF » a été effectuée.

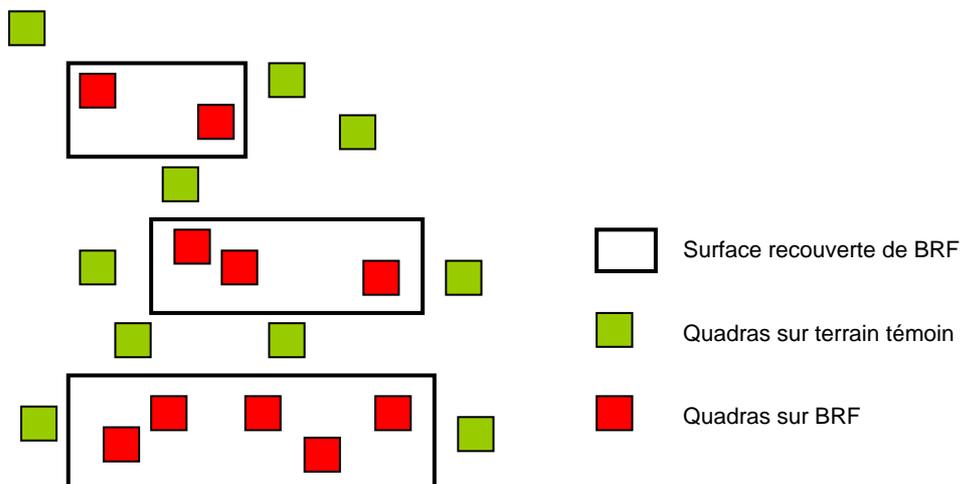


Figure n°11 - Exemple de placement des quadrats sur le site expérimental des Garguettes

-Suivi de l'accroissement de la végétation disposée sur les ouvrages de génie biologique en fonction de la variable BRF

Seul le site de Rif Fol présente des boutures de saules disposées sur des atterrissements issus d'ouvrage de génie biologique.

La disposition des saules plantés sur le site de Rif Fol lors de la mise en place des ouvrages de génie biologique ainsi que la disposition du BRF sur ce site permet d'établir une comparaison de l'accroissement des saules durant cette saison végétative en fonction de la modalité « BRF ».

Le saule émet une nouvelle série de ramification à chaque saison végétative.

Il a été effectué 2 mesures par saule :

- la longueur du rameau de l'année le plus long. (= l)
- la longueur maximale de la plante lors de l'année précédente (depuis la base du tronc jusqu'au niveau de l'insertion du rameau annuel le plus éloigné.) (= L)

Le taux d'accroissement annuel a été calculé par la formule suivante $\rightarrow (l / L) * 100$

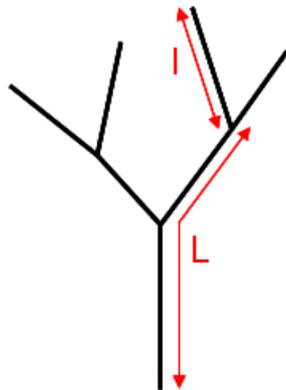


Figure n°12 - Mesures effectuées pour le suivi de l'accroissement des saules

Dans un premier temps, seuls les saules plantés sur les atterrissements ont été étudiés. En effet ceux situés sur du BRF (environ 20 plants) possèdent une emprise au sol entièrement recouverte de BRF. Leurs taux d'accroissements ont été comparés à ceux des saules situés sur atterrissement (environ 20 plants), mais hors de la zone de dépose du BRF. La variable BRF est alors étudiée de manière optimale.

La plupart des saules de ce site sont situés en bordure d'atterrissement. Leur emprise au sol n'est jamais couverte entièrement par du BRF. Cependant les mesures ont été prises sur l'ensemble des saules du site (atterrissement et barrière) pour d'éventuelles analyses et comparaisons futures.

- *Suivi de l'évolution du taux de matière organique*

La spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS) est une technique analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements (infrarouges) par la matière organique. Chaque molécule absorbe une longueur d'onde différente. L'analyse d'un spectre peut permettre de connaître la composition chimique de l'échantillon. Cette technique a déjà été testée pour étudier la décomposition du bois¹ (Mohebbi, 2004 ; Gelbrich, 2007).

-Suivi de l'évolution du taux de matière organique dans le BRF

L'évolution du taux de matière organique a été mesurée uniquement sur le site des Garguettes. La proximité de ce site, ainsi que la taille des parcelles recouvertes de BRF ont motivé ce choix.

Deux analyses NIRS ont été effectuées sur le site des Garguettes au moment de l'installation de l'expérimentation, l'une sur le BRF et l'autre sur le substrat marneux. Les prélèvements ont été réalisés à différentes positions sur les zones de dépose du BRF et ont ensuite été mélangés, séchés et broyés. Ils sont donc représentatifs de toute la zone de dépose du BRF au temps T=0. Le même type de prélèvements a été effectué tous les deux mois.

Sur ce site nous avons pu étudier l'évolution de la composition chimique du BRF sans qu'il y ait eu mélange avec des sédiments marneux.

-Suivi de l'évolution du taux de matière organique dans un mélange sédiments

+ BRF

La ravine de Col a présenté dès le mois d'avril une coulée de sédiments se mélangeant au BRF. C'est donc sur cette ravine que la technique de la NIRS a été utilisée afin d'étudier l'évolution du taux de matière organique dans un mélange de BRF et de sédiments.

Il était à prévoir que le BRF déposé soit recouvert par des coulées de sédiments. On peut penser que ces coulées se sont déposées successivement (la plus récente recouvrant les autres). Cette chronologie des événements a permis d'émettre l'hypothèse que la composition en matière organique a surtout évolué dans la partie amont de la zone de mélange BRF+sédiments, moins dans la partie aval. Ainsi avec un plan d'échantillonnage adéquat, nous avons cherché à mettre en évidence une évolution temporelle de la composition en matière organique dans le mélange (*figure 13*).

L'analyse NIRS nécessite seulement quelques grammes de matière. L'expérimentation n'a donc pas souffert de ce prélèvement de matériau.

Afin d'obtenir des échantillons représentatifs de l'ensemble d'une coulée de même âge, nous avons prélevé 5 échantillons sur la surface de la coulée. L'analyse a été effectuée après séchage, mélange (homogénéisation) et broyage de ces échantillons.

Trois zones de mélange ont été étudiées (d'amont en aval) afin d'obtenir un gradient horizontal de la composition en matière organique. Nous avons également observé la composition en matière organique à deux profondeurs différentes afin d'obtenir un gradient vertical.



Figure n°13 – mélange BRF+sédiments dans lequel le suivi de la composition en matière organique a été réalisé

	Suivi du maintien du BRF	Suivi des interacions avec les sédiments	Cartographie végétale	Méthode des quadras	Suivi de l'accroissement des bouture sur atterissements issu d'ouvrage du génie biologique	Suivi du taux de matière organique
Col	Ok	Ok	Ok			Ok
Sévigné	Ok	Ok	Ok			
Brask	Ok	Ok	Ok			
Rif Fol	Ok	Ok	Ok		Ok	
Garguettes	Ok	Ok	Ok	Ok		Ok

Tableau n°3-Attributions des différents suivis en fonction des sites étudiés

III) Résultats et interprétations

Qualité du BRF

Les résultats analytiques bruts sont donnés à l'annexe 2.

Il ressort de l'analyse comparée les éléments suivants :

- le taux de matière sèche est comparable entre les deux produits, de l'ordre de 57%.
- la fertilité est plus élevée pour le BRF 04 (+41% en azote total, +17% pour le phosphore, +58% pour le potassium)
- pour les teneurs en ETM, les écarts sont variables et dépendent de l'élément considéré : les teneurs en chrome, nickel, sélénium et arsenic sont inférieures aux seuils de détection pour les deux BRF. Mais on note 9 fois plus de cadmium, 3 fois plus de Zn et +30% de cuivre pour le BRF 04, alors qu'il y a 2 fois plus de mercure et au moins 50% de plus de plomb pour le BRF 38.

En regard des éléments analysés, les deux BRF sont conformes à la norme NF U44-051.

Maintien du BRF

Quantité de BRF emporté

- Sites en Isère

Rif Fol et Garguettes

Il a été constaté un très bon maintien du BRF. Seuls quelques fragments de bois se sont dispersés.

- Sites des Alpes-de-Haute-Provence

Brask

Malgré quelques orages le site du Brask ne présente pas de perte de BRF (orage le plus important, cumul = 14mm ; imax60=60mm/h le 3 août (cf. : Annexes 5).

NB : i max 60 = intensité horaire maximale extrapolée à partir de l'intensité minute la plus forte de l'événement pluvieux.

Draix

Les sites de Draix ont perdu une partie du BRF déposé au fond des rigoles, suite à un orage d'intensité moyenne survenu le 1 juillet (Cumul = 9mm ; I_{max60} = 66mm/h) (*figure 14*).

Suite à cet orage, il a été observé 75 litres de BRF dans la plage de dépôts de Col et 285 litres de BRF dans celle de Sévigné. Cet orage a ainsi emporté un volume de BRF compris entre 11% (Sévigné) et 15% (Col) du total du BRF déposé dans ces ravines (35% pour Sévigné et 28% pour Col en considérant uniquement le volume des rigoles d'ordre 1).

Le BRF retrouvé dans les plages de dépôts provient uniquement de la rigole principale de chaque site (rigole d'ordre 1). Ni les rigoles d'ordre 2 ou plus, ni les plaques de BRF déposé sur les versants n'ont perdu de matériau.

Les clous mis en place pour effectuer des profils en long de ces deux sites sont finalement les seuls éléments qui ont retenu du BRF lors de l'orage du 1^{er} juillet 2009 (*figure 15*). Le volume de BRF retenu par ces derniers a donc été additionné à celui mesuré dans les plages de dépôt pour avoir une estimation correcte du volume de BRF emporté lors de ces orages.



Figure n°14- Une zone de mobilisation du BRF à Col

Maintien du BRF en fonction de l'inclinaison de la pente suite à l'orage du 1^{er} juillet.

Sévigné

Pente moyenne rigole 2 = 17% → déplacement

Pente moyenne rigole 1 = 27% → stable

Pente moyenne plaque = 75% → stable

Col

Pente moyenne rigole 1 = 23% → déplac^t

Pente moyenne rigole 2 = 12% → stable

Pente moyenne plaque = 75% → stable

Suivi du profil en long de l'épaisseur de BRF sur les sites de Draix

Un événement pluvieux a fortement remanié la couche de BRF située au fond des rigoles principales sur les sites de Draix.

Ce remaniement s'est traduit soit par un apport de sédiments qui s'est superposé aux couches sous jacentes de BRF, soit par une mobilisation du BRF vers l'aval. Seules les rigoles principales sont concernées par ces remaniements.



Clou retenant du BRF dans la rigole principale de Sévigné

Figure n°15-Retenu du BRF par un clou

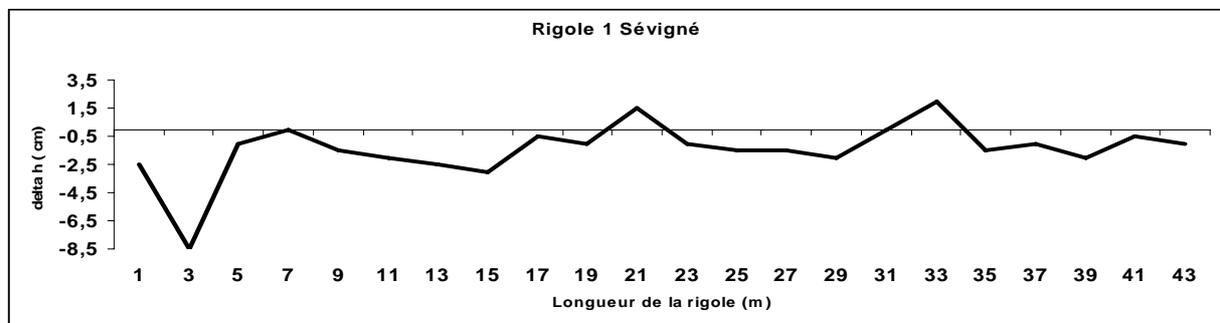


Figure n°16-Profil en long de la rigole principale de Sévigné après l'orage du 1^{er} juillet 2009

Les épaisseurs de BRF mesurées au niveau des clous (*figure 16*) indiquent un entraînement important au niveau de la rigole principale, le niveau zéro étant la hauteur du BRF avant l'orage. Les deux seules accumulations visibles (=delta h positif) représentent une retenue de BRF par les clous.

- **Discussion**

Cas d'un ruissellement diffus.

L'expérimentation a montré que le BRF peut se maintenir en place lors d'orages d'intensité moyenne dans les situations topographiques où il n'est soumis qu'à un ruissellement diffus. On peut donc préconiser la mise en place du BRF dans deux cas de figures : soit sur les versants des ouvrages (ravines, talus...), soit sur des atterrissements issus d'ouvrages du génie biologique. La pente des versants peut être forte (jusqu'à 75%) sur les sites expérimentaux, sans observer de mobilisation du BRF (*figure 17*).

Cas d'un ruissellement concentré.

Dans le cas du BRF disposé en fond de rigoles où les débits sont les plus importants, la tenue du BRF est mauvaise, même lors d'événements pluvieux d'intensité moyenne.

La surface du bassin versant (et par conséquent la quantité d'eau interceptée) semble être un critère plus important que la déclivité du fond de rigole pour expliquer les entraînements de BRF. En effet le BRF déposé au fond des rigoles d'ordre 2 ou supérieur, même inclinées jusqu'à 27%, n'a pas été emporté. Il existe vraisemblablement pour chaque situation un seuil d'intensité de pluie au-delà duquel le déplacement du BRF vers l'aval est enclenché.



Figure n°17-Stabilité des plaques de BRF sur versants soumis à un ruissellement diffus.

- **Points forts**

Le BRF se maintient en place face à des orages d'intensité moyenne s'il est soumis à un ruissellement diffus. Au contraire sa résistance à l'entraînement est très faible face à du ruissellement concentré. La concentration du ruissellement est le facteur d'entraînement du BRF le plus important.

- **Recommandations pour une utilisation du BRF**

Dans le cadre d'une utilisation de cette technique à plus grande échelle, la mise en place de BRF en fond de ravine ne semble pas réalisable, sauf si le BRF est déposé sur des atterrissements issus d'ouvrages de génie biologique. La mise en place de BRF en correction de versant reste possible mais les surfaces à recouvrir dans un contexte torrentiel sont potentiellement très importantes, par rapport à la quantité de BRF mobilisables rapidement. De plus le coût de tels aménagements pourrait être prohibitif. Ces résultats sont obtenus pour du BRF épandu au printemps (mi-mars). On a pu observer le développement d'une flore fongique dans les mois qui ont suivi la mise en place du BRF. Reste le questionnement suivant : est-ce que la résistance à l'emport du BRF en fond de ravine aurait peut pu être plus importante si l'épandage avait eu lieu à l'automne ; d'un côté la flore fongique aurait disposer de plusieurs mois supplémentaires, d'un autre coté il s'agit d'une période hivernale pendant laquelle les processus biologiques sont ralentis...

- **Perspectives**

La mise en place d'une nouvelle expérience permettrait d'estimer la surface maximale de bassins versants des rigoles au delà de laquelle le BRF est facilement emporté. Il permettrait de cibler et réduire le nombre de rigoles à équiper, apportant ainsi un gain de temps, de dépenses et d'efficacité. Par ailleurs, la bonne tenue du matériau sur versant laisse également entrevoir sa possible utilisation sur talus routiers, qui resterait à tester.

Interactions avec les sédiments

- **Quantité de sédiments emportés**

Profils

-Sites Isère

Des coulées de sédiments de faibles amplitudes (quelques dizaines de cm de long) qui proviennent des atterrissements situés juste en amont ont été constatées (*figure 19*). Un mélange très fin et superficiel de sédiments et de BRF a été observé. Les fragments de BRF situés en surface sont saupoudrés de particules sédimentaires très fines. Ce phénomène s'observe sur les 2 à 3cm les plus superficiels de la couche de BRF. Les sédiments marneux ne remplissent pas les espaces libres entre les fragments de bois.

La partie plus profonde de la couche de BRF reste densément colonisée par le mycélium des champignons, et ne présente pas ou très peu de particules sédimentaires.

A l'interface entre la couche de BRF et le substrat marneux existent des éléments de débris de bois très fin, de couleur brune.

-Sites Alpes de Haute Provence

Même lors de faibles pluies, des coulées de sédiments peuvent recouvrir le BRF en fond de rigoles sur de longues distances (parfois la totalité du fond de rigole). Des profils effectués au niveau de ces coulées révèlent que des sédiments se mélangent au BRF en comblant les espaces libres entre les différents fragments.

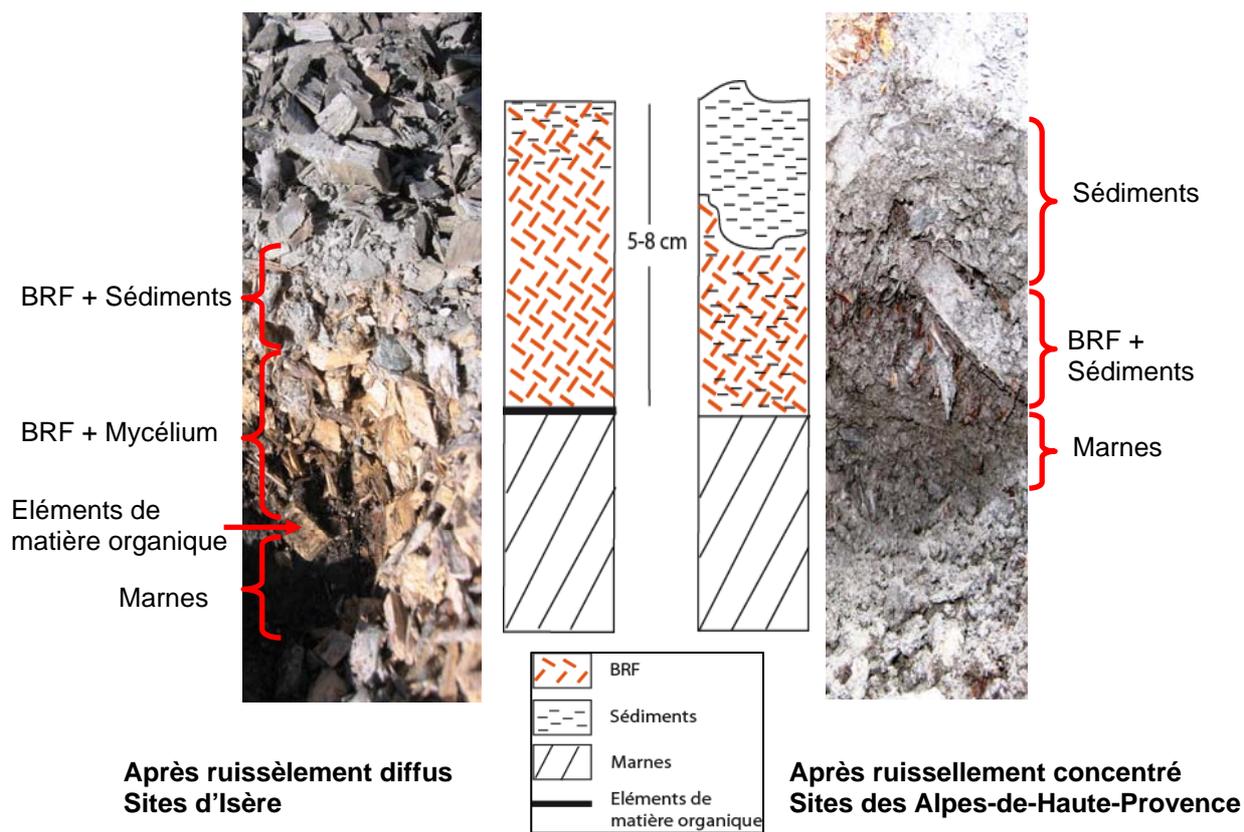


Figure n°18-Comparaison de profil

Quantité de sédiments emportés

-Site Isère

Rif Fol et Garguettes

L'absence de plages de dépôts n'a pas permis de quantifier une mobilisation de sédiments, cependant aucune coulée significative n'a été constatée.

-Site Alpes de Haute Provence

Col et Sévigné

A la suite de certains épisodes pluvieux, des sédiments ont transité vers l'aval des ravines. En effet, le premier orage d'intensité moyenne de la saison a engendré un charriage de sédiments depuis les rigoles jusqu'aux plages de dépôt.

L'estimation du volume des différentes fractions déposées dans les plages de dépôt s'est révélée plus aisée que prévu dans le protocole. En effet un tri naturel des fractions de BRF et de sédiments s'est effectué en fonction de la différence de densité de ces matériaux. Les sédiments se sont déposés directement dans la partie amont de la plage de dépôt, les fragments de bois (de densité plus faible) dans la partie aval (*figure 20*).

Brask

Il n'a pas été observé d'interactions avec les sédiments.

Selon le modèle mathématique (Cf. annexes) appliqué à Col, le volume estimé de sédiments déposés pour un orage avec $I_{max} = 66 \text{ mm/h}$ et $H \text{ cumul} = 10 \text{ mm}$ est de 56 litres. En réalité il a été relevé 125 litres de sédiments dans la plage de dépôt.

Pour Sévigné, le volume de sédiments calculé pour un orage avec $I_{max} = 66 \text{ mm/h}$ et $H \text{ cumul} = 9 \text{ mm}$ est de 50 litres, alors que la plage de dépôt n'a accumulé que 40 litres de sédiments.

Volume de sédiments mesurés Dans les plages de dépôts	Col	Sévigné
	125 L	40 L

Tableau n°4-relevées des plages de dépôts



Sédiments (amont)

BRF (aval du piège)

Figure n°19- Une coulée de sédiments après une pluie d'intensité $I_{max} = 12 \text{ mm/h}$ et cumul = 20mm (Col) 30 04 09

Figure n°20- Plage de dépôt de Col

- **Discussion**

Lors de l'orage du 1^{er} juillet, la ravine de Col a subi un entraînement de sédiments plus important que celui estimé par le modèle mathématique.

Cet orage est pourtant d'intensité moyenne mais il a emporté beaucoup de sédiments car il a été très tardif. En effet c'est durant la période hivernale que le gel/dégel permet la mise en place de la couche de régolithe, composée de fragments de marnes désolidarisés du substrat rocheux par l'alternance de gel/dégel. Plus le premier orage interviendra tard, plus il emportera de sédiments. En résumé les déplacements de sédiments sont les plus élevés lors de premiers orages. Cela peut expliquer les écarts observés entre les modèles de calcul (dépôts moyens) et les premières observations (forts dépôts lors des premiers orages). Il est également possible que le fonctionnement des 2 ravines ait un peu évolué avec le temps du fait d'un changement de profil dû à l'érosion. Les modèles ont en effet été établis dans les années 1993-1994 et ils ne sont peut-être plus aussi pertinents près de 15 années plus tard.

Par la suite, les modèles mathématiques estimaient les dépôts de sédiments sans les constater. Ainsi ce sont 80 % des sédiments attendus à Col et 30% des sédiments attendus à Sévigné qui ont été réellement retenus (cf. : Annexes 4).

	Col	Sévigné
Volume mesuré	40L	125L
Volume attendu	216L	187L

Tableau n°5-Comparaison des volumes totaux mesurés et estimés dans les ravines de Col et Sévigné

- **Points forts**

Le mélange de sédiments et de BRF se fait de façon progressive dans le cas de couches de BRF soumis à un ruissellement non concentré. Les sédiments ne créent pas de couche imperméable qui étoufferait les champignons. La couche de BRF semble ralentir et parfois empêcher les sédiments de s'écouler jusqu'aux plages de dépôt lors de pluies de faible et moyenne intensité.

- **Recommandations pour une utilisation du BRF**

L'intégration des sédiments à la couche de BRF en préservant le milieu, et ses capacités à démarrer au mieux une pédogenèse, ne peut se faire que sur les surfaces recouvertes de BRF non soumises à un ruissellement concentré. Il est donc inutile de traiter les fonds de rigoles principales. Cependant la rétention des sédiments (passive ou active) par le BRF disposés dans les rigoles d'ordre 2 ou supérieur semble être efficace. Ce traitement reste donc envisageable si l'on cible les rigoles à recouvrir de BRF.

- **Perspectives**

Equiper en plages de dépôt certaines rigoles concentrant les eaux de bassins versants de différentes importances permettrait d'estimer l'efficacité de tels traitements, et de mieux cerner les rigoles à traiter dans le cadre d'une utilisation à plus grande échelle.

Suivi de la dynamique végétale et fongique

A) Champignons

Sites Isère

Le recouvrement par le mycélium issu des basidiomycètes est très bon sur les 2 sites pendant la période d'avril à août.

Une trentaine de jours environ a été nécessaire pour observer une bonne densification du mycélium. Au cours des mois suivants, le mycélium a continué à se développer. Cependant, lors du dernier mois de l'étude, une régression du recouvrement a été observée (figure 21).

Sites des Alpes de Haute Provence

Le recouvrement par le mycélium issu des basidiomycètes est très faible voire inexistant en fond de rigole, mais il reste important sur les plaques de BRF déposées en versants ou bien sur les atterrissements issus d'ouvrages du génie biologique. Une régression est également observée au cours du mois d'août.

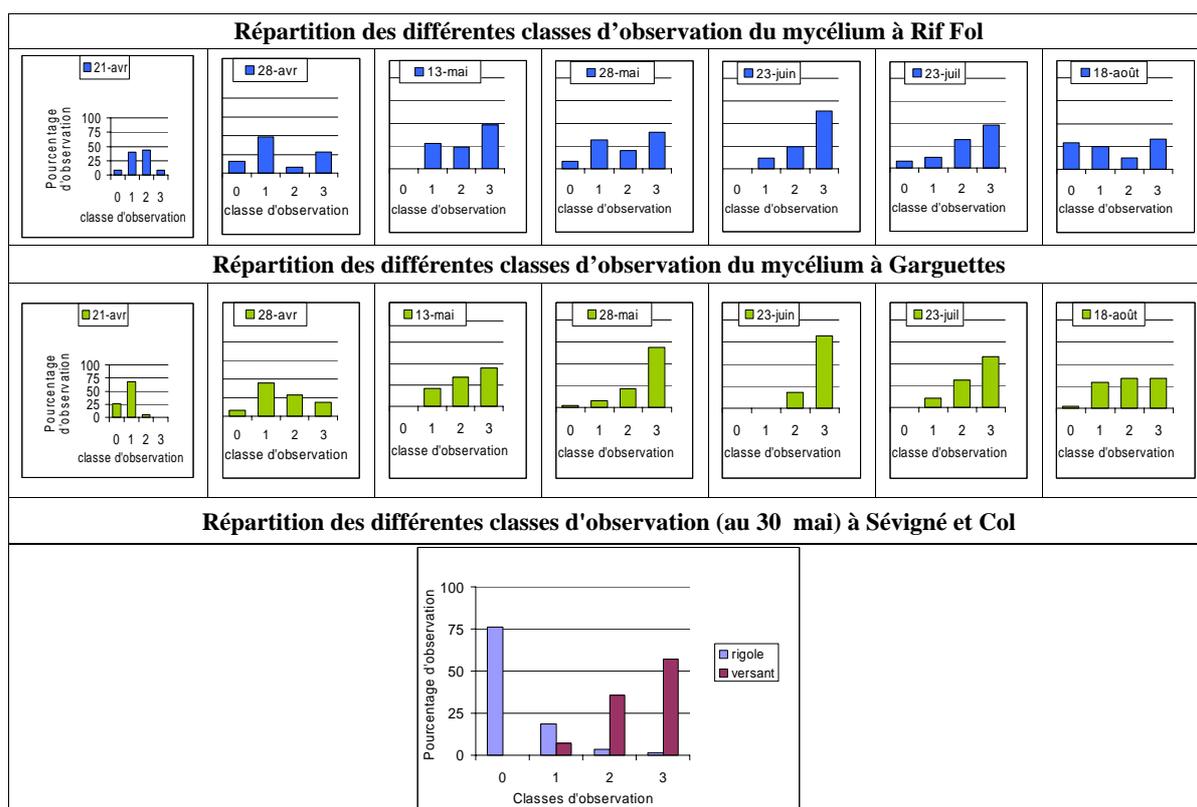


Figure n°21-répartition des différentes classes d'observations sur les différents sites de l'étude.

B) Flore

Dynamique végétale

-Sites Isère

Le suivi de la dynamique végétale sur le site des Garguettes a été effectué du mois de mai jusqu'au mois d'août. Trois paramètres ont été étudiés.

Le recouvrement :

Le recouvrement est faible sur ce site, il se situe entre 7 et 10 % de la surface observée. Le tussilage est la plante qui assure l'essentiel du recouvrement. On constate que le recouvrement diminue légèrement au fil des observations.

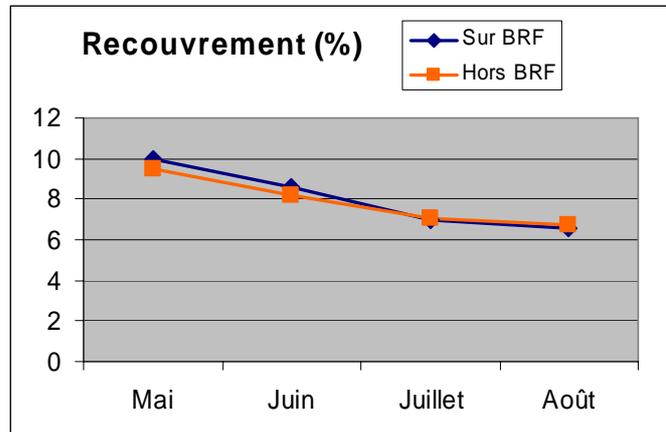


Figure n°22-évolution du taux de recouvrement

La densité :

La densité reste globalement stable pendant la période de l'étude. Elle est approximativement de 25 plants/m² sur le BRF et d'environ 15 plants/m² hors BRF. Les seules variations concernent la modalité « hors BRF » au mois de juin qui enregistre une augmentation de la densité.

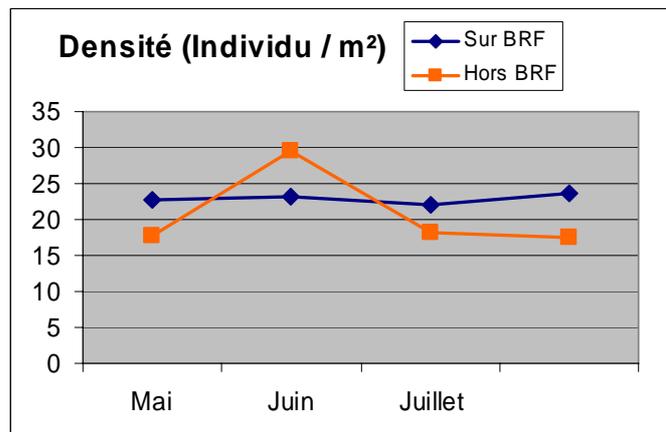


Figure n°23-Evolution de la densité

Biodiversité

Le nombre d'espèces différentes par quadrats est très faible (environ 2,2 hors BRF et 3,5 sur BRF).

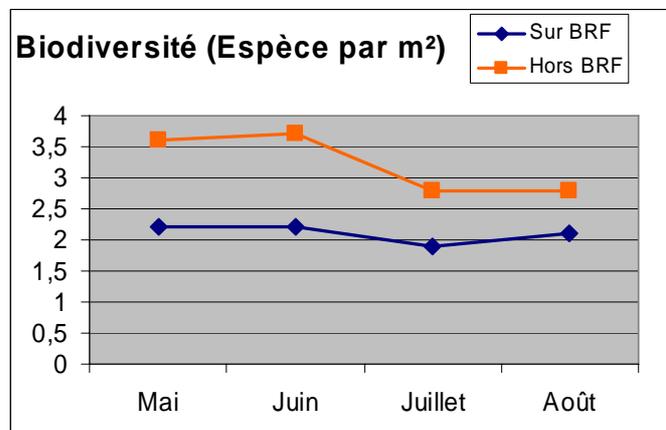
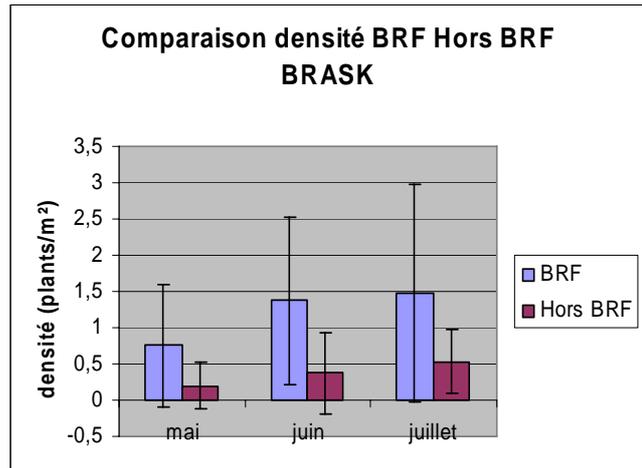


Figure n°24-Evolution de la biodiversité

-Sites Alpes de Haute Provence

Dans l'ensemble le taux de recouvrement reste très faible.

Figure n°25-Comparaison de l'accroissement des saules en fonction de la modalité BRF



Croissance des saules

Le suivi de l'accroissement en hauteur des saules en fonction de la modalité « présence de BRF » a été effectué sur le site du Rif Fol. Les analyses statistiques réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA (tableau 6) n'indiquent pas d'effet significatif du BRF sur la croissance des saules (accroissement relatif en hauteur).

Test U de Mann-Whitney (Feuille de données17)										
Par var. BRF										
Tests significatifs marqués à p <.05000										
variable	SommeRgs n	SommeRgs o	U	Z	niv. p	Z ajusté	niv. p	N Actif n	N Actif o	2*(1-p) p exact
Acc	127.0000	173.0000	49.00000	-1.32791	0.184210	-1.32791	0.184210	12	12	0.197808

Tableau n°6-Résultat du test de Mann Whitney sur la variable accroissement relatif des saules.

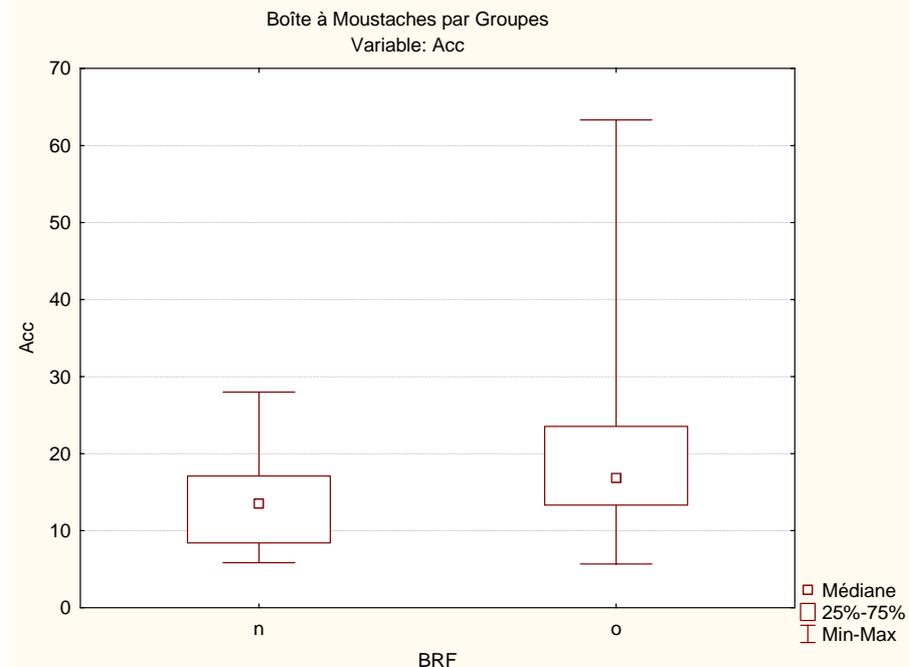


Figure n°26-Boîte à moustaches pour la variable accroissement relatif des saules.

Il a été observé une forte hétérogénéité des saules mesurés et donc des écarts types importants. Avec par ailleurs un nombre limité d'observations par modalité, il est difficile de mettre en évidence un effet significatif du BRF sur la croissance des saules.

- **Discussion**

A) Champignons

Dans cette expérimentation, la présence de champignons est surtout un indicateur de bon démarrage du processus de pédogénèse.

On a pu constater que le mycélium se développait très bien sur les atterrissements et sur les versants, mais très difficilement en fond de rigole. On peut émettre l'hypothèse suivante pour expliquer cette observation : le fond de rigole présente un taux d'humidité très élevé lors des premières visites (avril, mai), puis faible (juin). Ces conditions anaérobies sont défavorables aux basidiomycètes. Le pouvoir de rétention d'eau par la couche de BRF peut être un désavantage lorsqu'il est placé en fond de rigole. En effet, même en petites quantités l'eau peut y être concentrée et retenue par le BRF, à la manière d'une éponge. Le champignon est donc soumis à des conditions anaérobies, alors que ce n'est pas le cas lors de petites pluies sur du BRF en atterrissement ou sur versant, où il n'y a pas cet effet de concentration en eau, induits par le relief.

Hors contexte de fond de rigoles, l'épaisseur de BRF qui a été expérimentée (environ 5 cm) semble convenir. En effet, le mycélium a pu survivre et s'y développer malgré un été très sec (et, dans le cas de Rif-Fol, malgré une exposition Sud).

B) Flore

Il est intéressant de constater que certains taxons se sont développés exclusivement sur du BRF (Mélilot blanc) et d'autres exclusivement sur les marnes (espèces de la famille des Brassicacés). Cependant, elles n'ont pas survécu aux conditions environnementales difficiles du milieu (sécheresse estivale).

On peut supposer que le BRF est un milieu favorable à la germination et au développement de certaines espèces herbacées (microclimat frais et humide), contrairement aux situations de ravines sèches situées aux alentours où elles ne peuvent pas se développer.

La modalité « présence de BRF » ne semble pas influencer le taux de recouvrement, ni la densité d'individu, mais pourrait avoir un effet significatif sur le nombre d'espèces par unité de surface.

- **Points forts**

Le mycélium colonise rapidement et se maintient à un bon taux de recouvrement malgré des épisodes de sécheresse marquée. Il ne colonise pas le BRF disposé en fond de rigole. La présence de BRF n'a pas d'effet ni négatif, ni positif, sur le développement des végétaux en place, sur le pas de temps de cette étude (quelques mois). Une baisse de la concentration de la molécule de lignine est cependant observable dans la couche de BRF.

- **Recommandations pour une utilisation du BRF**

Le temps de l'étude ne permet pas le recul suffisant pour préconiser le BRF dans le cadre d'une utilisation à plus grande échelle. Cependant, la bibliographie évoquant les effets positifs

du BRF sur l'accélération de la dynamique végétale, ainsi que les tendances observées sur les sites étudiés encourage a priori l'utilisation du BRF en végétalisation.

- **Perspectives**

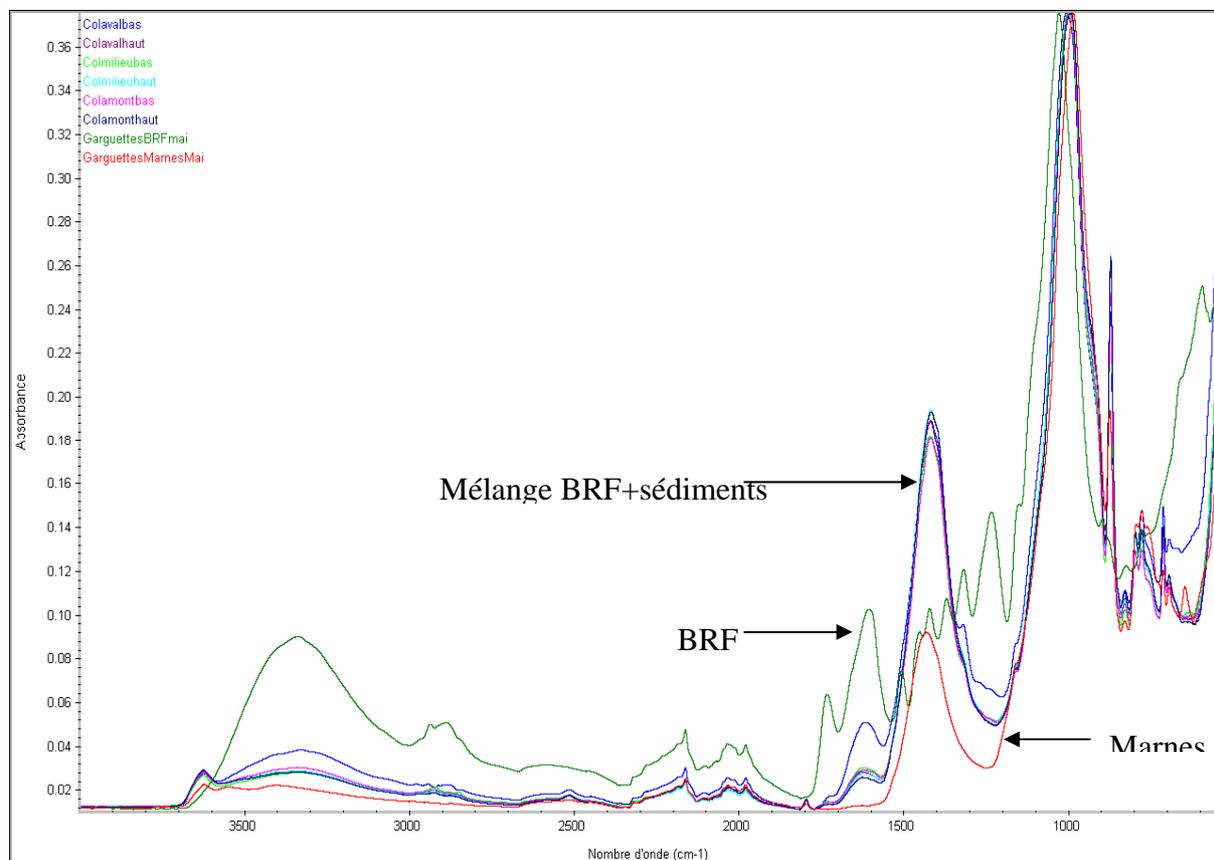
Dans le cadre de nouvelles expérimentations, on peut imaginer équiper les atterrissements issus d'ouvrages de génie biologique récemment mis en place avec du BRF. Ces atterrissements pourraient être avantageusement plantés, bouturés ou semés. Les atterrissements d'une partie des ravines disposeraient de BRF, l'autre non. Il conviendrait aussi de tester l'intérêt de cette technique pour la survie et la croissance des végétaux en situation de stress hydrique. En effet, les cas d'échec à la mise en place d'ouvrage de génie biologique sont souvent associés à des conditions stationnelles limitantes du point de vue de l'alimentation en eau du sol.

Les surfaces « en BRF » sur les versants pourraient également faire l'objet d'une poursuite des travaux de recherche qui consisterait en un ensemencement d'espèces végétales adaptées, l'objectif étant de déterminer si les conditions « de sol » rencontrées après traitement (épandage de BRF) sont favorable à l'implantation d'un couvert végétal perenne.

Suivi du taux de matière organique

Suivi de l'évolution du taux de matière organique dans un mélange sédiment+BRF

Les analyses NIRS effectuées sur les échantillons prélevés à Col selon le protocole établi n'indique pas de variations significatives du taux de matière organique en fonction de l'âge des coulées (*figure 27*).



*Figure n°27-Spectre d'un échantillon de BRF (courbe verte). (Garguettes)
 Spectre d'un échantillon de marnes (courbe rouge). (Garguettes)
 Spectres d'échantillon de mélange BRF+sédiments (autres courbes). (Col)*

Suivi de l'évolution du taux de matière organique dans le BRF

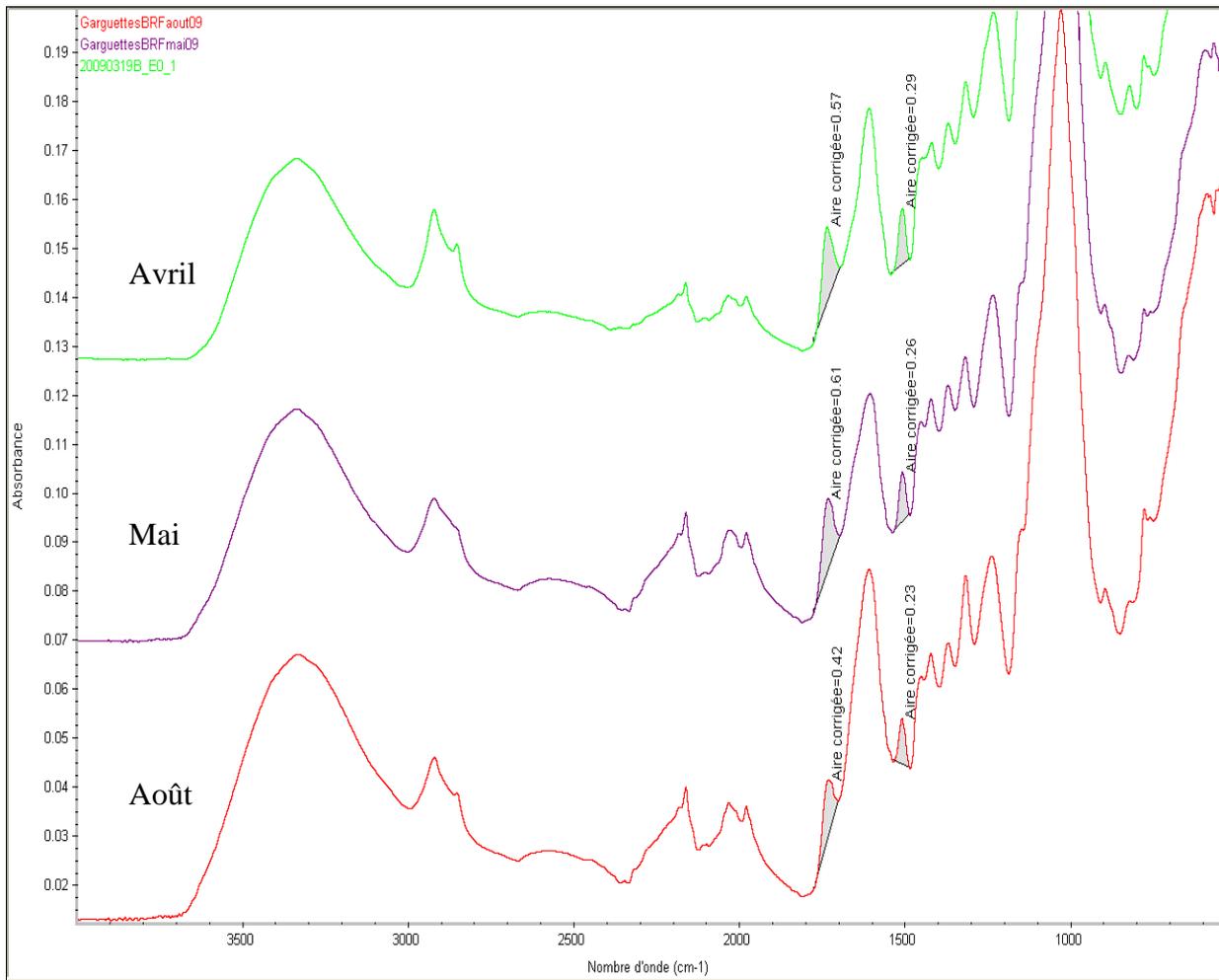


Figure n°28-Spectres des échantillons de BRF (Garguettes) aux mois d'avril, mai et

Les analyses NIRS effectuées à partir des échantillons prélevés sur le site des Garguettes indiquent des variations de surface des aires situées sous la cloche de certains pics d'absorbance (figure 28).

- **Discussion**

Suivi de l'évolution du taux de matière organique dans un mélange sédiment+BRF

On peut considérer que la durée qui a séparé les trois événements pluvieux à l'origine de nos différentes coulées (environ deux semaines) est trop faible pour pouvoir observer une évolution significative du taux de matière organique. En effet la dernière coulée a remanié légèrement les coulées précédentes, et donc modifié les différents mélanges BRF+Sédiments étudiés. De plus, la dernière coulée a remanié le mélange des coulées sous jacentes, et a donc modifié le mélange BRF/sédiments de ces dernières.

Suivi de l'évolution du taux de matière organique dans le BRF

Selon la bibliographie, le champ 1200 à 1600 cm^{-1} correspond aux régions d'absorbance des composés du bois tels que la lignine, la cellulose et l'hémicellulose. Le pic situé à 1505 cm^{-1} correspond au pic d'absorption de la molécule de lignine.

La diminution de l'aire sous ce pic indique une baisse de la concentration de cette molécule. On peut aisément penser que ce sont les basidiomycètes qui sont responsables de cette dégradation, même si d'autres explications restent possibles (dégradation par les UV, insectes, bactéries...).

- **Points forts**

Une baisse de la concentration de la molécule de lignine est observable dans la couche de BRF.

- **Perspectives**

Le recul sur cette technique n'est pour l'instant pas assez suffisant pour estimer l'enrichissement du substrat en matière organique.

Une analyse agronomique du sol est envisagée sur le site de Sévigné pour répondre à cette question.

Conclusion

Plusieurs résultats de cette étude montrent une partie des potentialités anti-érosives du BRF :

- le maintien du BRF a été très bon lorsque la couche de bois a été placée sur des surfaces non soumises à un ruissellement concentré, sur des atterrissements issus d'ouvrages de génie biologique (y compris en fond de ravine), ou encore sur des pentes à fortes déclivités ;
- lorsqu'il se maintient en place, le BRF est capable de retenir les sédiments en fond de ravine ou sur les versants ;
- la mise en place rapide du mycélium dans la couche de BRF, ainsi que son maintien à un bon taux de recouvrement durant toute la période de l'étude, indiquent que la première étape du processus de pédogénèse est effective. La durée de l'étude n'a cependant pas permis un recul suffisant pour évaluer l'impact du BRF sur la dynamique végétale naturelle.

D'autres points indiquent cependant des faiblesses dans l'utilisation de cette technique :

- en fond de ravine, le champignon ne s'est pas développé en raison probablement d'une trop grande quantité d'humidité retenue ;
- la mise en place du BRF a mobilisé du temps et une main d'œuvre importante. De plus, il apparaît difficile de se fournir en matériau de bonne qualité et en grande quantité, puis de le déposer dans un délai très court.

Ainsi, au vu des résultats obtenus jusqu'à présent, l'utilisation du BRF peut être préconisée soit en association avec la mise en place d'ouvrage du génie biologique, soit dans des lits de ravines de petite taille. La bonne tenue du matériau sur versant laisse également entrevoir sa possible utilisation sur talus routiers. Une utilisation à grande échelle du BRF dans les deux situations énumérées permettrait une valorisation des déchets d'élagage - matériau renouvelable et disponible en quantité - dans une optique de lutte contre l'érosion. Le suivi des sites expérimentaux va se poursuivre pendant au moins 2 ans et permettra de confirmer les résultats et les tendances observés durant cette première année. L'étude de l'évolution du matériau « BRF + sédiments » apparaît également nécessaire pour bien rendre compte de l'action de la flore fongique puis de la micro-faune.

Résumé

L'érosion de surface constitue un phénomène naturel aux conséquences souvent préoccupantes et dommageables. Si la végétation peut jouer un rôle très efficace de protection des sols contre l'érosion, les conditions de milieu ne permettent pas toujours son bon développement. L'une des pistes entrevues serait d'utiliser le Bois Raméal Fragmenté (BRF). L'objectif de ce projet était de déterminer l'efficacité de ce matériau pour : 1/ la lutte contre l'érosion en contexte torrentiel ; 2/ la facilitation du développement végétal dans ces milieux pour une efficacité durable de la protection contre l'érosion. Les expérimentations ont été implantées sur 4 sites dans 2 départements soumis à des contraintes climatiques différentes (Isère et Alpes-de-Haute-Provence). Les résultats ont mis en évidence le maintien possible du BRF sur des surfaces non soumises à un ruissellement concentré, sur des atterrissements issus d'ouvrages de génie biologique et sur des fortes pentes. Le BRF est alors capable de retenir les sédiments en fond de ravine ou sur les versants. La mise en place rapide du mycélium dans la couche de BRF indique que la première étape du processus de pédogénèse est effective. La durée de l'étude n'a pas permis de vérifier l'impact sur la dynamique végétale. Le BRF n'est cependant pas utilisable partout (lit de ravines sans ouvrage de stabilisation) et son utilisation apparaît contraignante (approvisionnement et pose). Les résultats scientifiques de cette étude ont été traduits sous forme d'une fiche d'information et de recommandations concernant l'utilisation pratique du BRF pour la protection des sols.

Abstract

In view of the current economic context, works of civil engineering for erosion control is not adequate anymore. One of the Cemagref's research in ecological engineering is to estimate the interest of the Ramial Chipped Wood (Bois Raméal Fragmenté : BRF) against erosion. This study concerned the implementation and the follow-up of experiments allowing having a better knowledge about the BRF's properties, when it is implanted in eroded fields. The aims were encouraging information on the technology of BRF in revegetation for erosion control, when it is deposited on surfaces not subjected to concentrated flow. However this technology remains delicate to set up. Other studies seem necessary to define zones to be treated firstly and foremost for a benefit of effectiveness.

Table des illustrations

Listes des figures

- Figure n°1-Un paysage composé de Bad-lands
Figure n°2-Bois raméal
Figure n°3-BRF fraîchement broyé
Figure n°4-Mycélium
Figure n°5-Schéma simplifié de l'action du BRF sur le sol.
Figure n°6-Schéma du processus anti érosif escompté du BRF
Figure n°7-Localisation des sites expérimentaux
Figure n°8 - Schéma du dispositif d'étude du profil en long du BRF
Figure n°9 - Exemple de cartographie d'une coulée de sédiments en fond de rigole
Figure n°10 - Exemple de plan de localisation des observations du BRF.
Figure n°11 - Exemple de placement de nos quadrats sur le site expérimental des Garguettes
Figure n°12 - Mesures effectuées pour le suivi de l'accroissement des saules
Figure n°13 – Protocole d'échantillonnage pour le suivi de la composition en matière organique.
Figure n°14-Une zone d'emport du BRF à Col
Figure n°15-Retenu du BRF par un clou
Figure n°16-Profil en long de la rigole principale de Sévigné après l'orage du 1^{er} juillet 2009
Figure n°17-Stabilité des plaques de BRF sur versants soumis à un ruissellement diffus.
Figure n°18-Comparaison de profil
Figure n°19-Une coulée de sédiments après une pluie d'intensité $I_{max}=12$ mm/h et cumul = 20mm (Col) 30 04 09
Figure n°20-Plage de dépôt de Col
Figure n°21- répartition des différentes classes d'observations sur les différents sites de l'étude.
Figure n°22-évolution du taux de recouvrement
Figure n°23-Evolution de la densité
Figure n°24-Evolution de la biodiversité
Figure n°25-Comparaison de l'accroissement des saules en fonction de la modalité BRF
Figure n°26-Boîte à moustaches pour la variable accroissement relatif des saules.
Figure n°27-Spectres d'échantillon de mélange BRF+sédiments. (Col), Spectre d'un échantillon de BRF. (Garguettes), Spectre d'un échantillon de marnes. (Garguettes)
Figure n°28-Spectres des échantillons de BRF (Garguettes) aux mois d'avril, mai et août.

Liste des tableaux

- Tableau n°1-Caractéristiques des sites retenus pour l'expérimentation
Tableau n°2-Répartition du BRF au sein de chaque site.
Tableau n°3-Attributions des différents suivis en fonction des sites étudiés
Tableau n°4-relevées des plages de dépôts
Tableau n°5-Comparaison des volumes totaux mesurés et estimés dans les ravines de col et Sévigné
Tableau n°6-Résultat du test de Mann Whitney sur la variable accroissement relatif des saules.

Liste des sigles

- BRF : Bois Raméal Fragmenté
RTM : Restauration des Terrains de Montagnes
ONF : Office National des Forêts
Cemagref : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts
NIRS : Near Infra Red Spectroscopy

Annexes

Table des annexes

Annexe n°1-Répartition du BRF et cartographie des sites étudiés.

Annexe n°2-Analyses chimiques des deux lots de BRF mis en place

Annexe n°3-Extrait de la thèse d'Yves Crosaz concernant le modèle mathématique d'estimation des dépôts de sédiments à l'exutoire des ravines de Col et Sévigné.

Annexe n°4-Détail du bilan sédimentaire durant la durée de l'expérimentation à l'exutoire des ravines de Col et Sévigné.

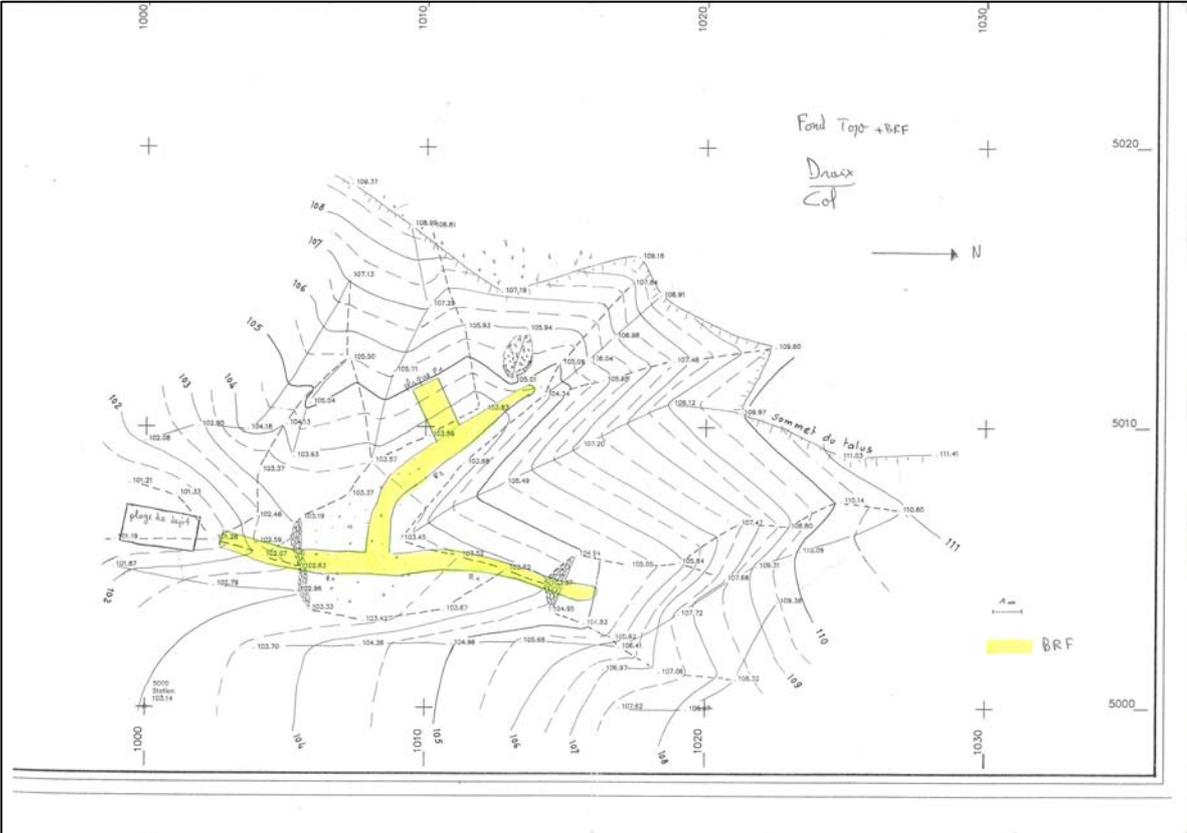
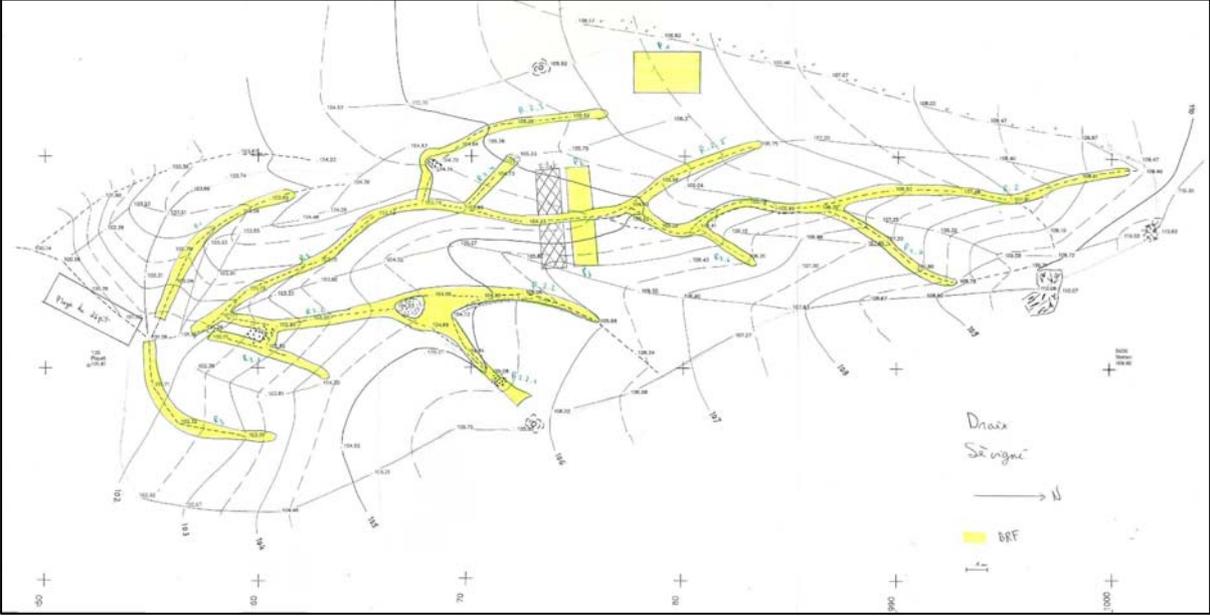
Annexe n°5-Histogrammes des précipitations journalières sur les différents sites étudiés

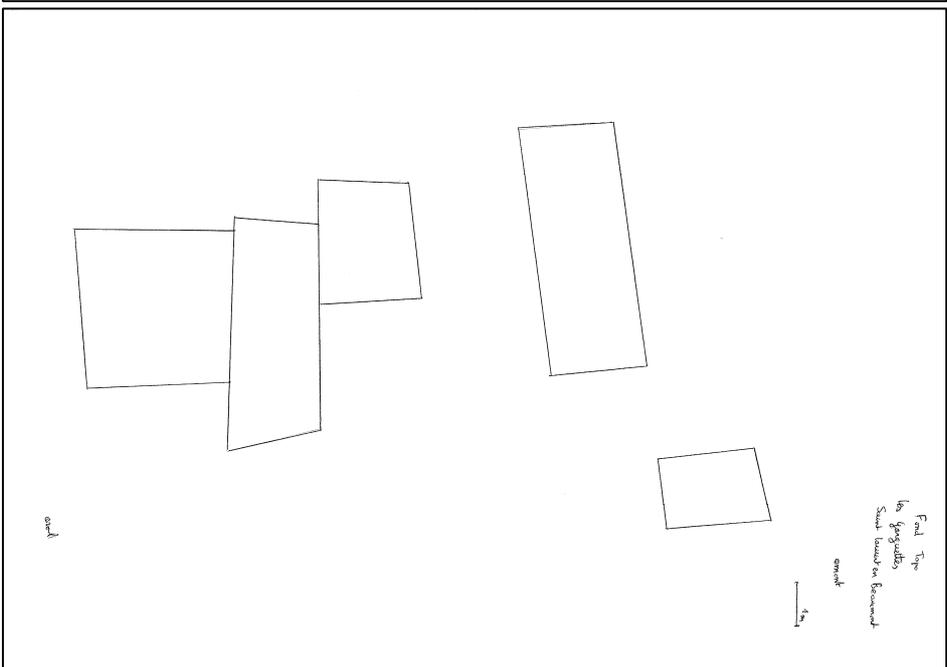
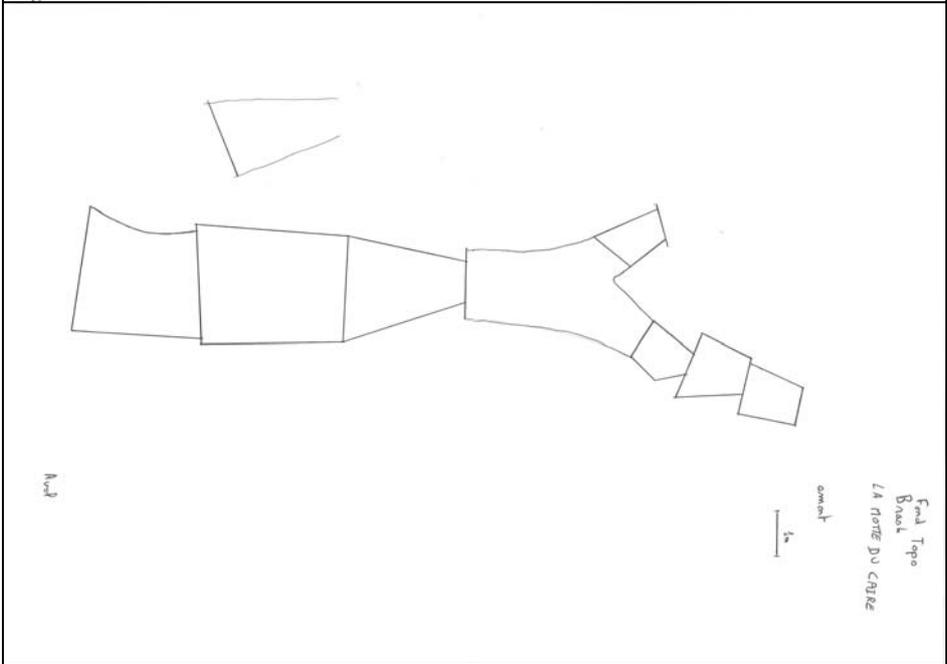
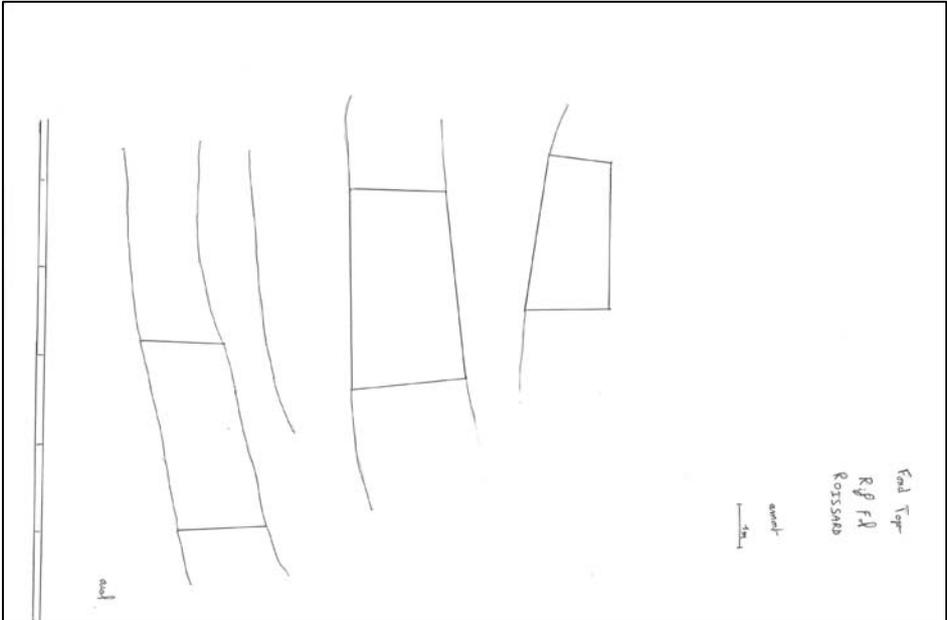
Annexe n°6-Exemple de compte rendu terrain

Annexe n°7-Relevé botanique sur le site du Brask

Annexe n°8-Fiche d'information et de recommandations concernant l'utilisation pratique du BRF dans une optique de protection des sols

Annexe n°1-Répartition du BRF et cartographie des sites étudiés.





Annexe n°3-Extrait de la thèse d'Yves Crosaz concernant le modèle mathématique d'estimation des dépôts de sédiments à l'exutoire des ravines de Col et Sévigné.

4.3.6.2. Extrapolation du modèle aux ravines col et sévigné

La formule (1) est modifiée suivant les formules (2) et (3) en fonction des facteurs suivants :

Facteurs	Ravine		
	Roubine	col	sévigné
surface dénudée (m ²)	1020	287.5	606
pente moyenne (%)	59	43	18

Le modèle à utiliser pour estimer les volumes déposés à la ravine col devient :

$$V_{\text{dép}} = 7.93 \cdot 10^{-3} \times H^{0.916} \times I^{1.638} \quad (10)$$

Le modèle à utiliser pour estimer les volumes déposés à la ravine sévigné devient :

$$V_{\text{dép}} = 7.05 \cdot 10^{-3} \times H^{0.916} \times I^{1.638} \quad (11)$$

4.3.6.3. Validation des modèles

La figure 76 permet de constater que le modèle prédit de manière relativement satisfaisante les volumes déposés à la ravine col ($R^2_{aj}=0.892$) mais qu'il est moins performant pour estimer ceux de la ravine sévigné (0.509).

Avec:

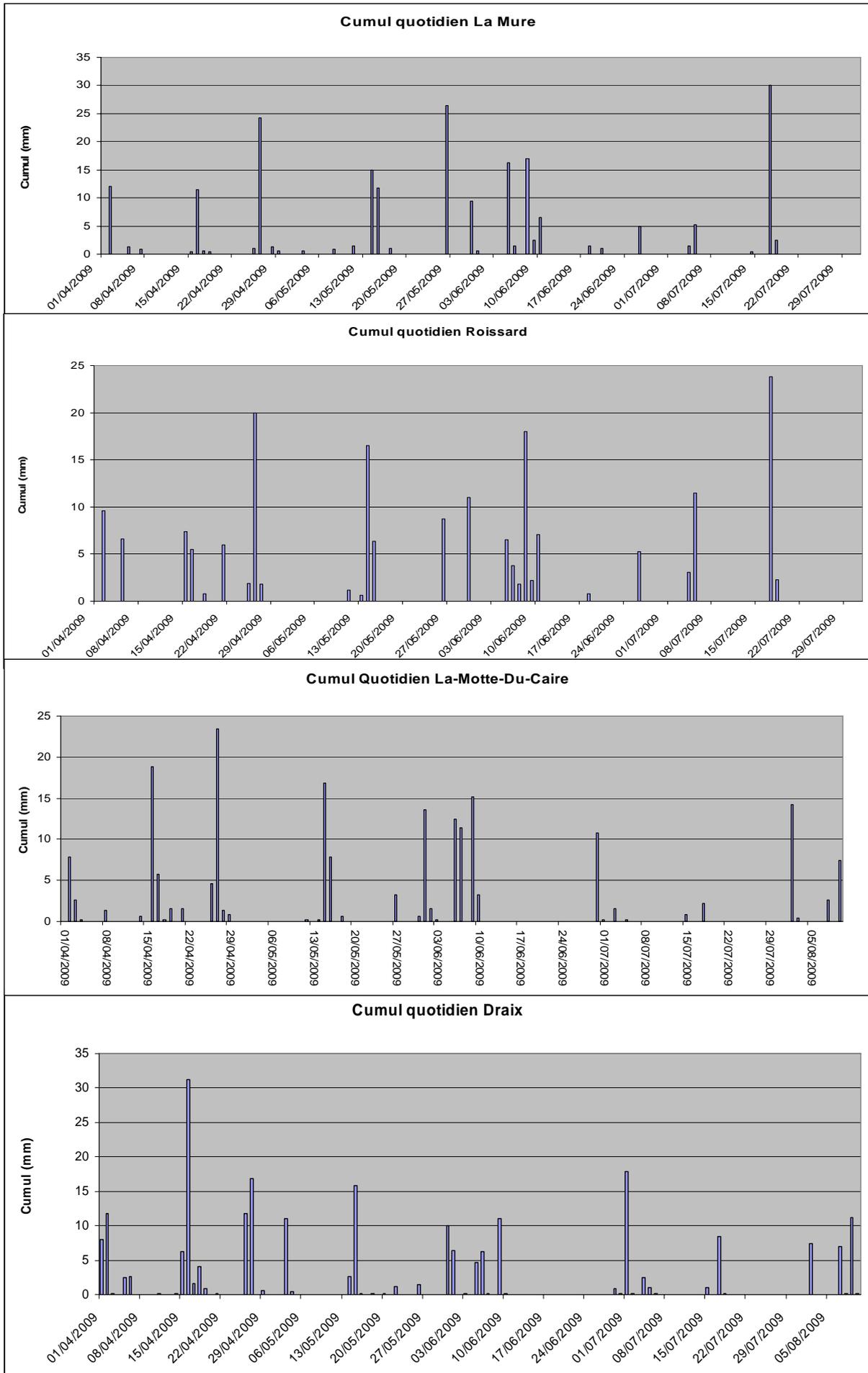
H = Cumul en mm de l'évènement pluvieux

I = intensité en mm/h calculé sur l'intensité minute maximale.

Annexe n°4-Détail du bilan sédimentaire durant la durée de l'expérimentation à l'exutoire des ravines de Col et Sévigné.

	COL			SEVIGNE			
	H (mm)	I (mm/h)	Volume (L)	H (mm)	I (mm/h)	Volume (L)	
Principaux événements pluvieux	10,6	24	13	10,6	24	11	
	3	24	4	3	24	4	
	6,4	24	8	6,4	24	7	
	10	66	62	9	66	50	
	1	36	3	1	36	2	
	8,4	24	10	8,4	24	9	
	7,4	48	28	7,4	48	25	
	7	36	17	7	36	15	
	7,6	84	72	7,6	84	64	
Total			217	Total			188

Annexe n°5-Histogrammes des précipitations journalières sur les différents sites étudiés



Compte rendu de la visite de terrain à Saint Laurent en Beaumont (13 05 2009)

Ravine des Garguettes

Temps couvert, environ 20°

Relevé botanique des 20 quadras

Observation des déplacements et du maintien du BRF.

Observation du mycélium.

Observations.

Déplacement

La parcelle de BRF la plus en amont présente un abaissement de sa limite amont.

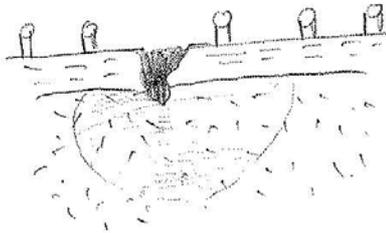
Pédologie

A l'interface sol/BRF il existe une importante humidité ainsi qu'une grande fraîcheur. Pas de processus de fermentation observé. Mélange immédiatement sous les coulées les plus récentes de BRF et de sédiments.

Trace d'érosion

Les coulées sont stables. Les blocs sur le BRF semblent plus nombreux.

Sous les principales coulées, le BRF semble se charger en sédiments très fins, « nappant » très légèrement ce dernier. Le BRF ne présente ce phénomène que sur sa partie la plus superficielle.



dessin de la zone
recouverte de sédiments
très fins en surface

Activité biologique observée

Densification du mycélium. Il s'homogénéise.

De nombreux insectes ainsi que quelques larves sont clairement visibles sur les différentes parcelles. (Myriapodes, fourmis, moucheron...)

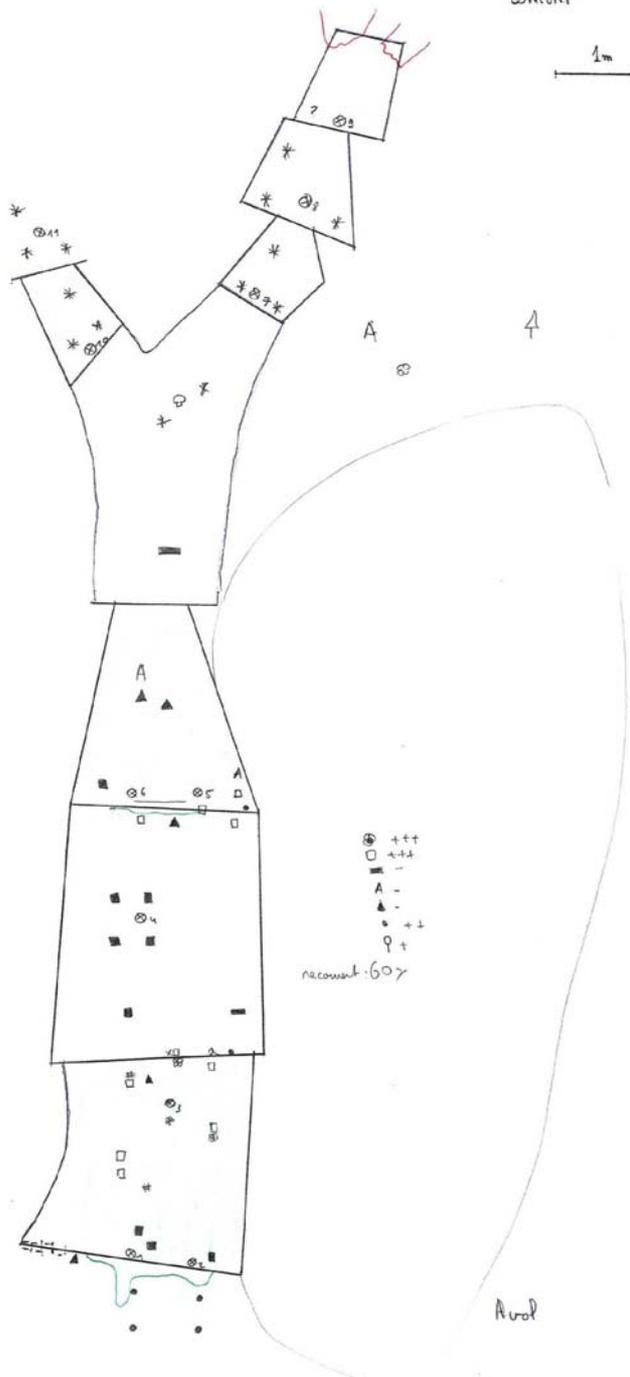
Annexe n°7 Relevé botanique sur le site du Brask

relevé botanique
29-04-09

Fond Topo
Brask
LA MOTTE DU CAIRE

amont
1m

- Légende**
- Coulée**
BRF
- ♀ Alisier blanc
 - * Angouvier
 - ↑ Rim
 - o Genêt à balais
 - Calama grossière argenté ?
 - ▲ fenouille
 - Euphabe sp.
 - ⊕ Aphyllante de Mont pellier
 - A Laccosyrium
 - Osorant
 - o Peuplier (napier)
 - Saule
 - # Saifoin
 - x Salsola ?
 - ⊙ caryopse
 - ? indéterminé
 - ⊗ piquet



⊕ +++
□ +++
—
A -
▲ -
o +1
♀ +
recomant: 607

Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) en végétalisation pour la lutte contre l'érosion

Définition et propriétés

Le principe

Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) est un matériau végétal composé de branches de moins de 7 cm de diamètre fraîchement broyées.

Il fait intervenir la strate pionnière fongique dans l'objectif de modifier les propriétés physiques, physico-chimiques et biologiques du terrain et donc de préparer la colonisation des plantes.

Itinéraire de production et conditions d'utilisation

Le BRF doit être frais : éviter une période de stockage de plus de 48 heures qui induirait un phénomène de compostage et dégraderait la flore fongique naturelle.

Le BRF doit être issu pour l'essentiel de bois de feuillus (la part de résineux ne doit pas dépasser 15 %). Il ne doit pas contenir de feuilles, le broyage des branches doit donc être réalisé hors saison de végétation.

Exemple de filière de production : les branches issues des travaux de taille et d'élagage (platanes, tilleuls, ...) en période hivernale, généralement broyées sur place et encore peu ou pas valorisées.

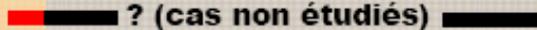
Cadre réglementaire

Le BRF peut être considéré comme une matière fertilisante et doit à ce titre répondre aux exigences des articles L255-1 et L255-2 du code rural. Il ne nécessite pas d'homologation pour sa commercialisation et doit se conformer à la norme NF U44-051 qui impose des flux d'éléments polluants à ne pas dépasser (éléments tracés métalliques, hydrocarbures aromatiques polycycliques). Les doses d'apport doivent donc être raisonnées en fonction de la qualité du BRF.

Utilisation pour la lutte contre l'érosion

⇒ Enseignements apportés par les expérimentations *Cemagref-Géophyte* de 2009

Dans quelles situations ?

			
Talus	Bassins torrentiels	Berges de rivières	Pistes de ski
	Versants	Lits de ravines	
 OUI			 ? (cas non étudiés)

Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) en végétalisation pour la lutte contre l'érosion

Utilisation pour la lutte contre l'érosion

⇒ Enseignements apportés par les expérimentations Cemagref-Géophyte de 2009

Comment ?

Talus et versants



Installation de 5 cm d'épaisseur de BRF directement sur le substrat. Tenue observée sur fortes pentes (jusqu'à 100 %)

Lits de ravines



Installation de 5 cm d'épaisseur de BRF sur des ouvrages de génie biologique, sur matériaux meubles. En cas de ruissellements concentrés, ne pas installer sans ouvrage.

Effets observés

- ❑ Le BRF se maintient en place face à des orages d'intensité moyenne lorsqu'il est soumis à un ruissellement diffus.
- ❑ Le mélange de sédiments et de BRF se fait de façon progressive. Les sédiments ne créent pas de couche imperméable qui étoufferait les champignons. La couche de BRF ralentit et retient les sédiments lors de pluies de faible et moyenne intensité.
- ❑ Le mycélium colonise rapidement et se maintient à un bon taux de recouvrement, même en cas d'épisodes de sécheresse marqué.



A l'installation



3 mois après

Et après ?

D'autres expérimentations seront prochainement menées. L'objectif sera d'évaluer les effets d'un épandage de BRF sur la qualité du sol et sur la croissance des végétaux, toujours dans un contexte de terrains soumis à de fortes contraintes érosives.

Bibliographie

Asselineau E., Domenech G. 2007. *De l'arbre au sol, les Bois Raméaux Fragmentés*, éditions du Rouergue, 190p.

Burylo M., Rey F., Delcros P. 2007. Abiotic and biotic factors influencing the early stages of vegetation colonization in restored marly gullies (Southern Alps, France). *Ecological engineering*, vol. 30, pp. 231-239.

Crosaz Y. 1995. *Lutte contre l'érosion des terres noires en montagne méditerranéenne*, Université d'Aix-Marseille III, 244 p.

Dupety J. 2007. *Le BRF vous connaissez ?*, Edition de Terran, 128p.

Gelbrich J. 2007. Chemical changes in wood degraded by bacteria, *International biodeterioration and biodegradation*.

Lemieux G. 1988. *L'importance du bois raméal dans la synthèse de l'humus*, Université Laval, 26p.

Maricato C. (à paraître). Le bois raméal fragmenté pour corriger l'érosion ravinaire", *Revue forestière française*.

Mohebbby B. 2004. *Attenuated total reflection infrared spectroscopy of white-rot decayed beech wood*, International biodeterioration and biodegradation.

Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, vol. 50, pp. 91-133.

Rey F. 2002. *Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du sud*, université Joseph Fourier

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