

# Programme GESSOL

projet :

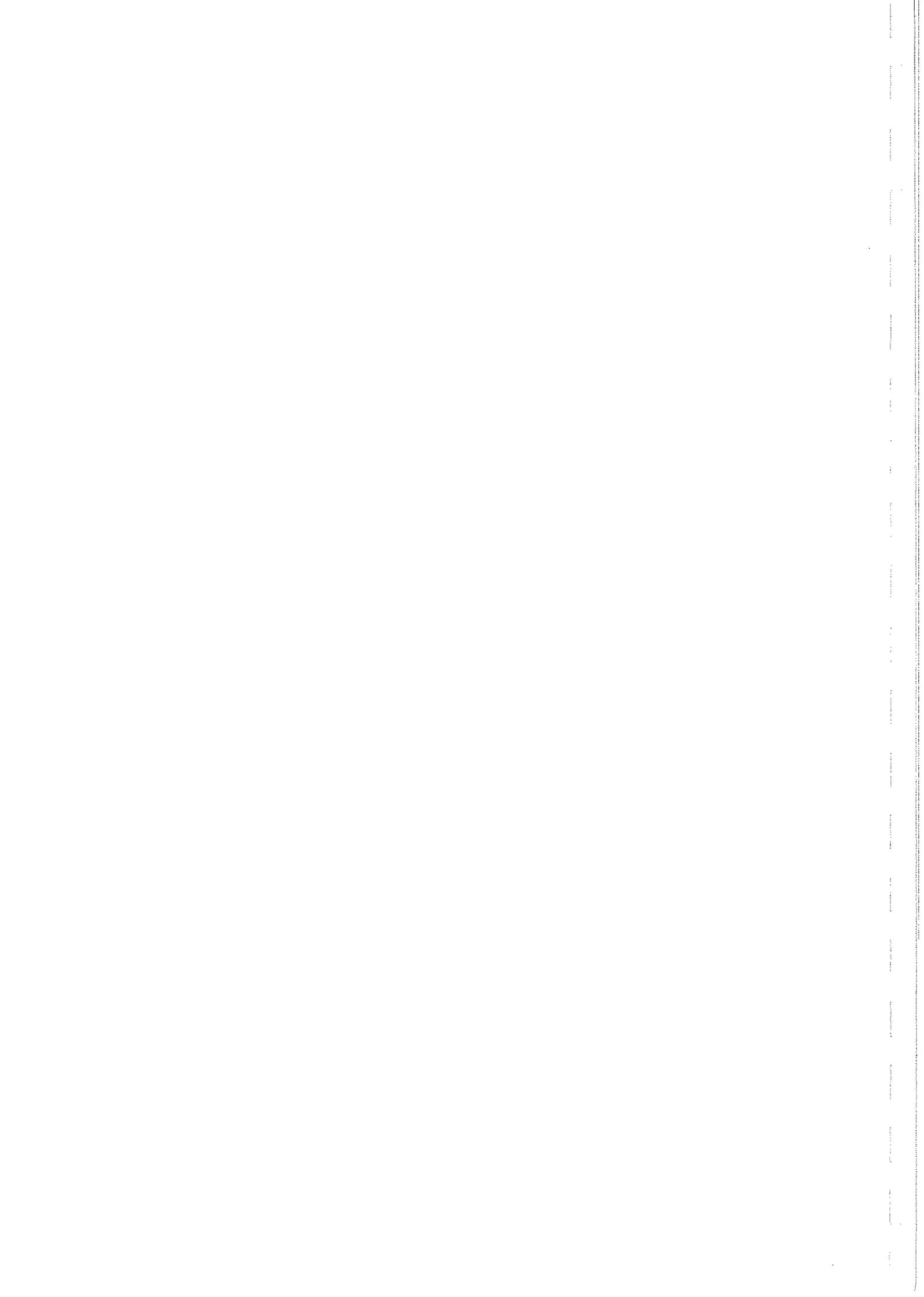
## **Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés** *phénomènes physiques et dispositifs d'action*

Coordinateur : Yves Le Bissonnais  
INRA, Science du Sol, Orléans

RAPPORT FINAL  
Mars 2003

---

Yves Le Bissonnais, Alain Couturier, Olivier Cerdan., INRA Science du sol Orléans  
François Papy, Philippe Martin, Véronique Souchère, INRA SAD APT / INA- P G  
Jean-François Bruno, Pélagie Lebrun, INRA SAD Toulouse  
Denis Fox, Jean Morschel, Université de Nice, Géographie  
Bernard Elyakime, INRA Toulouse Economie



## Programme GESSOL

**projet :**  
**Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés**  
*phénomènes physiques et dispositifs d'action*

Coordinateur : Yves Le Bissonais  
INRA, Science du Sol, Avenue de la Pomme de Pin, B.P. 20 619, Ardon, 45 166 OLIVET cedex. - FRANCE  
tel : 33 (0)2 38 41 78 82  
fax : 33 (0)2 38 41 78 69  
Email : lebisson@orleans.inra.fr

RAPPORT FINAL  
Mars 2003

---

Yves Le Bissonais, Alain Couturier, Olivier Cerdan. INRA Science du sol Orléans  
François Papy, Philippe Martin, Véronique Souchère, INRA SAD APT / INA- P G  
Jean-François Bruno, Pélagie Lebrun. INRA SAD Toulouse  
Denis Fox; Jean Morschel. Université de Nice, Géographie.  
Bernard Elyakime. INRA Toulouse Economie



## Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b>p 3</b>
<b>Partie 1 : Evaluation du potentiel érosif d'un territoire à l'échelle régionale.....</b>	<b>p 7</b>
<b>Partie 2 : Evaluation du potentiel érosif et de l'efficacité des mesures anti-érosives à l'échelle locale (parcelle, bassin versant ou versant).....</b>	<b>p 17</b>
<b>Partie 3 : Evaluation économique des actions anti-érosives.....</b>	<b>p 31</b>
<b>Partie 4 : Modélisation et simulation de scénarios d'actions anti-érosives.....</b>	<b>p 44</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>p 67</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>p 68</b>



## Introduction

### *L'érosion hydrique des sols cultivés : une question d'actualité*

L'érosion hydrique est une des **causes majeures de la dégradation des sols** dans le monde. L'irréversibilité du phénomène justifie qu'on lui accorde une attention particulière. Ce phénomène entraîne une **perte de potentiel** de production du sol là où il est décapé et, au-delà, des **dégâts nombreux** : coulées boueuses, parfois violentes, détérioration de la voirie, d'ouvrages d'art, pollution de l'eau par des molécules dissoutes, des particules en suspension, eutrophisation... L'érosion hydrique est influencée par les façons culturales pratiquées et les aménagements qui se trouvent sur le territoire cultivé.

L'évolution de l'agriculture des dernières décennies a contribué à aggraver les phénomènes érosifs. L'opinion publique en donne des raisons qui ne sont pas toutes avérées. Cependant, deux caractéristiques de cette évolution ont un effet manifeste : le retournement des prairies et l'agrandissement des parcelles, même quand il n'est pas accompagné de la suppression de haies ou de talus. La première est le fruit d'une spécialisation des systèmes de production à partir d'un type polyculture élevage, jadis fréquent, et d'une évolution des systèmes fourragers, dans lesquels le maïs prend partiellement la place de l'herbe. La seconde constitue une façon efficace d'accroître la productivité du travail, objectif premier de l'agriculture française au cours de l'époque récente. Cette évolution fait de l'érosion des sols cultivés **une question d'actualité**. Au niveau européen, une **stratégie thématique pour la protection des sols** est en train de se mettre en place sous l'égide de la Direction de l'Environnement de la Commission, avec en particulier un groupe technique sur l'érosion chargé d'élaborer des propositions d'action sur ce thème.

La France présente une grande diversité de situations érosives des territoires agricoles dont il est important de tenir compte. La nature des sols et du climat, la morphologie, les modes d'occupation du sol, les systèmes de culture et le parcellaire induisent **différents systèmes érosifs** qui se caractérisent par des combinaisons spécifiques de processus physiques de détachement, de transport et de dépôt (Figure 1, d'après Le Bissonnais et al., 1998).

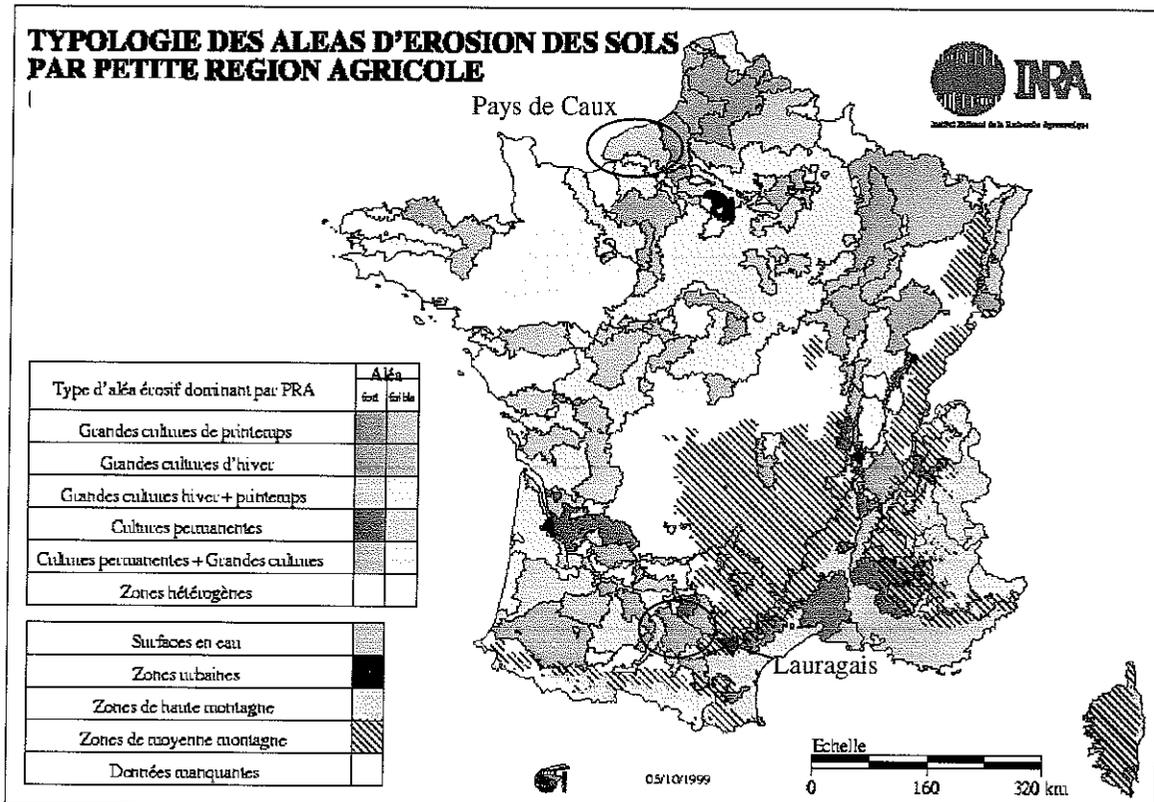


Figure 1 : Typologie de l'érosion des sols cultivés en France

Par ailleurs, les **conditions de maîtrise**, par des actions individuelles ou collectives, de phénomènes érosifs se développant sur un territoire agricole n'ont pas été suffisamment étudiées.

Ce sont ces conditions de maîtrise que nous nous proposons d'étudier dans une démarche qui allie étroitement Science du Sol, Agronomie, disciplines économiques et sociales.

Nous y voyons plusieurs intérêts :

- en tout premier lieu, celui de faire des propositions d'action, conçues d'emblée pour contrôler un processus physique (le ruissellement, l'érosion, le dépôt), mais aussi pour s'intégrer à un dispositif d'action agricole (un itinéraire technique, un calendrier de travail, un contrat territorial d'exploitation) en explorant les marges de manœuvre actuelles.
- autre intérêt : harmoniser les découpages spatiaux ayant une pertinence physique (versant, bassin versant) avec ceux qui représentent une réalité socio-économique (territoire d'une exploitation, d'une commune, d'un syndicat de communes). Enfin, les premières études économétriques entreprises montrent l'intérêt d'harmoniser les variables entre modèles physiques et modèles économiques.

#### *L'approche socio-économique de la gestion du territoire à des fins de maîtrise de l'érosion hydrique*

L'état de l'art en matière d'analyse économique du phénomène de l'érosion hydrique met en évidence une abondante littérature américaine. Les solutions économiques préconisées le plus souvent consistent à taxer les agriculteurs de manière à ce qu'ils ne dépassent pas une certaine quantité de terre érodée. Ce faisant on ne tient pas compte de la diversité des situations érosives : dans certains cas les mesures n'ont d'efficacité que si elles sont mises en œuvre de façon collective, mais dans d'autres ce n'est pas nécessaire ; très souvent des combinaisons de mesures différentes sont à envisager selon les situations des agriculteurs concernés (Govindasamy & Huffman, 1995). Des auteurs canadiens préconisent, au contraire, la prise en compte de cette diversité par des contrats impliquant l'agriculteur sur un objectif environnemental (Fox et al., 1995). A partir de notre expérience sur les phénomènes

érosifs rencontrés en France, qui nous a apporté une bonne connaissance de cette diversité, c'est dans cette dernière perspective que nous nous situons.

Les différentes formes d'érosion inventoriées mettent en jeu des territoires et des acteurs différents, et impliquent des dégâts, des coûts et des conséquences environnementales très variés.

Notre projet est ainsi centré sur deux situations érosives très tranchées. Il s'agit des deux régions agricoles où nous avons travaillé jusqu'à présent : le Lauragais et le Pays de Caux, qui peuvent être considérées comme des **situations modèles**.

*Dans le Lauragais*, l'unité fonctionnelle du point de vue physique est le versant qui était jadis subdivisé en plusieurs parcelles. Il est maintenant cultivé d'un seul tenant, labouré dans le sens de la pente. Il constitue donc une seule parcelle appartenant à une unité économique : l'exploitation agricole. Dans la situation type choisie, le bas du versant débouche sur un bien public : une route ou un cours d'eau.

Ces versants cultivés et pentus donnent lieu à un processus érosif continu : l'érosion mécanique due à la descente de la terre par les outils de travail du sol. Les sommets sont décapés. Les bas de versant s'épaississent. Assez rapidement, le potentiel productif du champ est affecté. Mais les dépôts de terre n'atteignent pas le domaine public. A ce premier processus se surimpose une érosion hydrique de versant, phénomène discontinu et aléatoire. Les orages de printemps sur de jeunes semis ou des terres fraîchement préparées (parfois des orages d'été sur des sols plus rassis et quelque peu protégés par un couvert végétal) produisent une érosion en rigoles parallèles ou en nappe. La terre est alors souvent entraînée au-delà du champ, dans le domaine public. La réparation des dégâts d'orage peut être très coûteuse quand il faut reprendre les fossés éboulés, curer les fossés, refaire les accotements de routes. La pollution de l'eau, sa turbidité entraînent des surcoûts pour le traitement de l'eau potable.

*Dans le Pays de Caux*, l'unité fonctionnelle est le bassin versant. Il s'agit, plus précisément de bassins versants emboîtés les uns dans les autres, avec des talwegs secs, sauf tout à fait à l'aval. Même les bassins versants les plus élémentaires contiennent plusieurs parcelles et sont souvent cultivés par plusieurs agriculteurs. Le domaine public est diversement affecté. Rarement, mais gravement des zones d'habitat peuvent être atteintes par des inondations boueuses. Plus fréquemment des routes sont coupées et couvertes de terre ou encore les captages d'eau potable, au débouché d'un réseau karstique sous-jacent, deviennent brusquement turbides.

Ces sols, limoneux, sont très sensibles à la battance. Soumis à des systèmes de grande culture (c'est à dire dans lesquels les plantes cultivées à cycle annuel occupent une grande place), ces sols acquièrent vite, après semis, même sous des pluies de faible intensité, une forte aptitude à ruisseler, qu'ils conservent jusqu'au prochain travail du sol. Le ruissellement chemine et se concentre dans les talwegs où il peut entailler des rigoles et des ravines parfois très profondes. La terre ainsi arrachée peut être entraînée très loin. Ce système érosif, combine donc érosion diffuse et érosion par ruissellement concentré. Il existe deux catégories d'événements érosifs : les longues séquences pluvieuses en hiver, et les orages de printemps et d'été, moins violents cependant qu'en Lauragais. Les dégâts, hors territoire agricole, sont très importants. Malgré le développement d'équipements de protection à l'amont des zones habitées, les inondations boueuses catastrophiques sont fréquentes. Les interruptions d'alimentation en eau potable se multiplient. La lutte anti-érosive est désormais une des priorités des instances régionales (DRAF, Conseil régional).

Trois volets, correspondant aux trois premières parties de ce rapport, ont été abordé simultanément par les partenaires du projet:

1. **l'évaluation du potentiel érosif des territoires**, qui permet de hiérarchiser et localiser les zones à risques au sein d'un territoire donné, qui permet aussi l'identification des principaux facteurs de ce risque, et donc l'orientation vers un type de mesures anti-érosives ;

2. **l'évaluation technique des mesures anti-érosives**, par la mise en place d'expérimentations et l'analyse d'indicateurs dans chacun des secteurs étudiés, à partir d'un inventaire de mesures déjà testées ou envisagées ;
3. **la formalisation et l'évaluation économique des actions anti-érosives**, qui a consisté à développer une démarche d'analyse économique de cette question, puis à l'appliquer dans chacun des secteurs étudiés, à partir de l'étude de cas observés sur le terrain.

La **synthèse** (partie 4) de ces trois volets nous a conduit à identifier des combinaisons de mesures adaptées à chaque type de situations érosives, puis à évaluer ces mesures par simulation au moyen des **modèles physiques et économiques** afin d'en estimer l'efficacité et l'utilité socio-économique. Ces modèles constituent ainsi des outils pour tester l'impact de différents scénarios d'aménagements ou de changements d'occupation des sols.

## Partie 1 : Evaluation du potentiel érosif d'un territoire à l'échelle régionale

Il s'agit dans ce volet de hiérarchiser les problèmes d'érosion à l'échelle d'une région : c'est à dire d'une part de localiser les zones à risques pour cibler les zones d'action prioritaire, et d'autre part, d'identifier le rôle des facteurs régionaux : pluie, topographie, sols et occupation des sols, afin de définir des stratégies d'action adaptées.

Vis à vis des problèmes d'érosion, il est nécessaire de bien distinguer entre :

- un état de dégradation des sols par érosion (niveau de troncature par rapport à un profil pédologique de référence, appauvrissement en matière organique par rapport à une situation initiale), dont les conséquences peuvent être très variables en fonction du type de sol et du milieu;
- un fonctionnement érosif actuel probable (aléa), qui peut éventuellement être quantifié pour une unité spatiale donnée (T/ha/ an) ;
- un risque lié à un fonctionnement érosif, qui dépend de la combinaison de l'aléa avec une vulnérabilité (turbidité ou pollution des captages d'alimentation en eau potable, coulées boueuses...)

Dans le cadre de l'approche envisagée, le potentiel érosif d'un territoire correspond plutôt à la deuxième définition, c'est à dire au **fonctionnement érosif actuel probable**. Dans le cas du Pays de Caux, le territoire concerné est le bassin versant élémentaire (BVE) (env. 1 à 10 km<sup>2</sup>) et il faut donc tenir compte de l'organisation spatiale et des interactions entre les éléments constitutifs des BVE (parcelles et chemins d'eau). Dans le cas du Lauragais, c'est plutôt le versant, souvent occupé par une seule parcelle. Ce sont donc des modèles différents qui ont été utilisés dans les 2 cas.

### 1.1 Cartographie de l'aléa érosion en Haute-Normandie

La cartographie de l'aléa érosion en Haute-Normandie par bassin versant élémentaire a été réalisée parallèlement au projet Gessol, dans le cadre du pôle de compétence Sol et Eau de Haute-Normandie, en collaboration avec le BRGM (financement par la Conseil Régional de Haute-Normandie, la DIREN HNO, les fonds FEDER et la mission de service publique du BRGM)(Souadi et al., 2000). Cette cartographie est le résultat de la combinaison de plusieurs couches de données selon le modèle "érosion", mis en place par l'INRA et déjà testé pour l'ensemble du territoire français (Figure 2 d'après Le Bissonnais et al., 2001). A partir des données de bases disponibles pour la région, différentes couches ont été générées pour servir de données d'entrée au modèle:

- synthèse géologique des formations géologiques et superficielles (en l'absence d'une carte pédologique suffisamment précise) à partir de laquelle deux autres cartes ont été générées : érodibilité et sensibilité à la battance ;
- occupation du sol d'après la base Corine Land Cover, mise à jour à partir d'images SPOT récentes ;
- cartes des pentes et des aires drainées, et limites Bassin versant élémentaires et hydrographiques pour la région ;
- précipitations cumulées et fréquences de pluies de fortes intensités.

Le modèle est appliqué sur l'ensemble de la région avec une résolution de 50 m correspondant à la maille élémentaire du MNT. Les résultats sont ensuite intégrés pour différentes unités spatiales : Petites régions agricoles, communes et bassins versants élémentaires.

Une enquête de terrain a été effectuée sur une dizaine de bassins versants élémentaires de la région puis confrontée aux résultats du modèle afin d'en évaluer la validité.

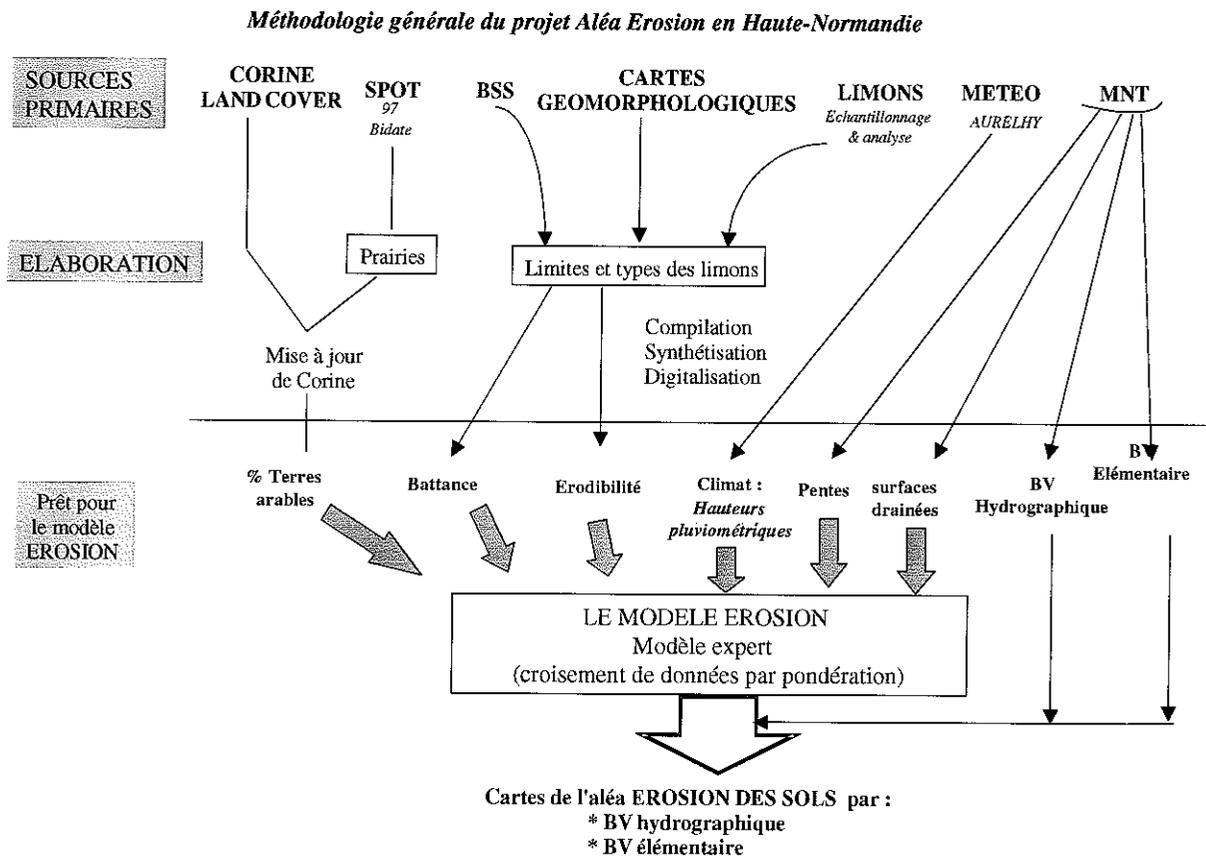


Figure 2 : Méthodologie pour la modélisation de l'aléa érosion des sols en Haute-Normandie

Le résultat global de ce projet est une cartographie de l'aléa érosion en Haute-Normandie par bassin versant élémentaire qui permet de hiérarchiser et de localiser les principaux bassins à risques en distinguant trois zones fonctionnelles par bassin : impluvium amont (érosion diffuse), zones de pentes > 5% (érosion en rigoles), et thalwegs (érosion en ravines), ce qui permet d'orienter dans chaque cas vers un type de mesure anti-érosive, et en considérant à chaque fois cinq classes d'aléa (carte). La cartographie réalisée met en évidence un contraste important entre les deux parties de la région situées respectivement au nord et au sud de la vallée de la Seine, avec un aléa nettement plus élevé au nord dans les petites régions du Pays de Caux et du Vexin. Ce contraste s'explique par la combinaison de plusieurs facteurs : sols plus battants, pluies plus importantes et relief un peu plus marqué.

Il s'agit cependant d'une approche qualitative qui ne permet pas d'évaluer des volumes de ruissellement ou de terre érodée.

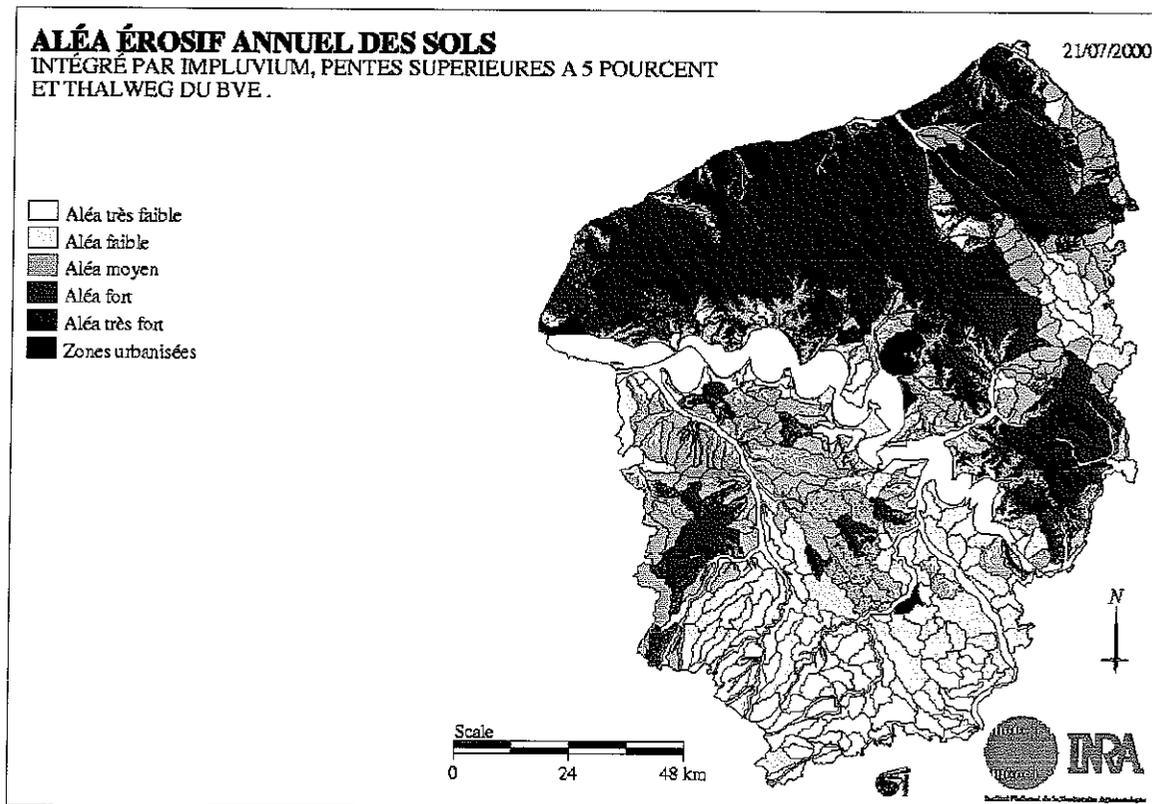


Figure 3 : Cartographie de l'aléa érosion des sols en Haute Normandie (Lecour, 2000)

Nous avons ensuite pu affiner cette approche par l'utilisation d'une version simplifiée du modèle bassin versant STREAM (voir 4<sup>ème</sup> partie) qui permet de **quantifier** les phénomènes au pas de temps de l'événement, et de simuler des aménagements anti-érosifs à l'échelle intra-bassin versant en s'appuyant sur des données d'entrée de type télédétection. Ceci a été réalisé dans le cadre d'un stage de DESS en collaboration avec le BRGM, pour un contrat avec le pôle de compétence sol et eau de la Haute Normandie.

Les résultats permettent de quantifier les ruissellements au exutoires des BV. La figure 4 montre clairement la très forte relation entre l'occupation du sol et l'intensité du ruissellement pour différents types d'événements pluvieux. Elle permet également de mettre en évidence des effets de seuil sur l'influence du facteur occupation du sol sur le risque de ruissellement : par exemple pour un événement de 40 mm en 6 h, il n'y a quasiment jamais de ruissellement si le taux de surface en terre arable du bassin versant est inférieure à 60%. De plus ce graphique montre que la variabilité résiduelle de la relation étudiée est d'autant plus forte que l'événement est peu ruisselant, ce qui indique que pour des événements de fréquence de retour élevée, d'autres facteurs peuvent jouer un rôle important sur le contrôle du ruissellement, et en particulier la localisation des zones infiltrantes (prairie) ou la présence d'aménagements (Dubreuil, 2001).

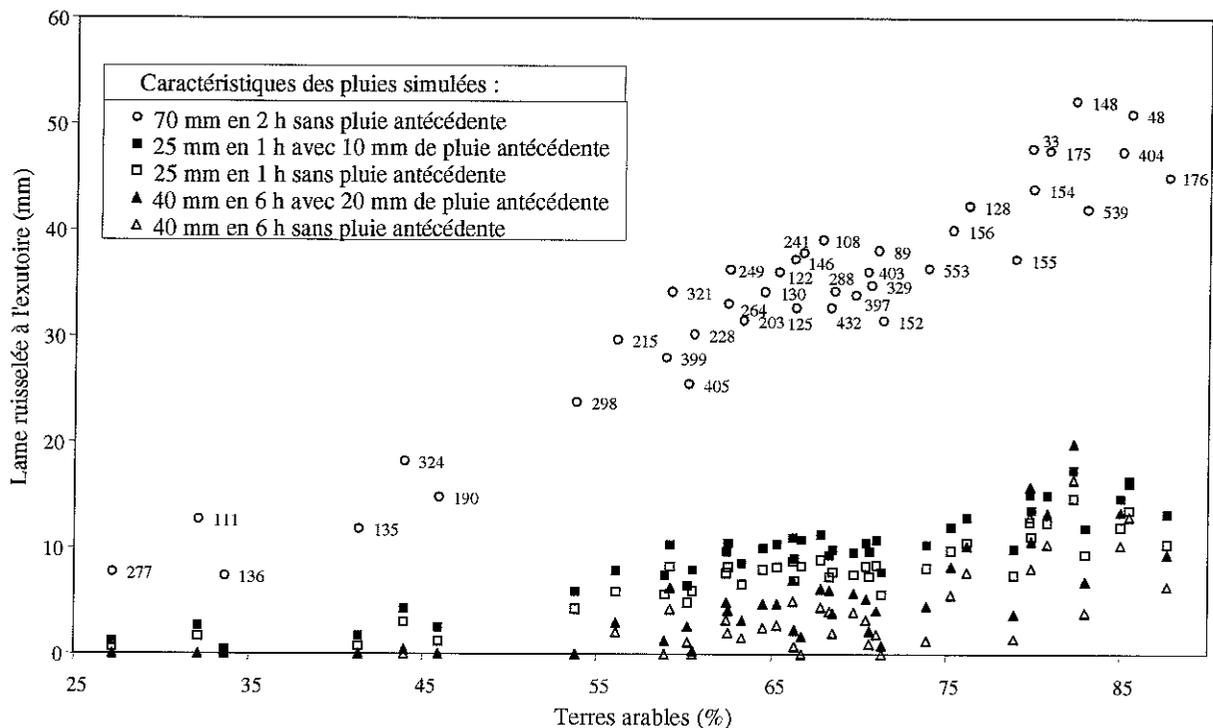


Figure 4 : Relation entre la proportion de terres arables et la lame ruisselée à l'exutoire pour 5 événements pluvieux types et pour 40 BV de Haute Normandie (DESS N. Dubreuil)

## 1.2 Cartographie de l'aléa érosion dans le Lauragais

Dans le Lauragais, la caractérisation du milieu physique et la modélisation de la sensibilité aux coulées boueuses a été réalisée dans le cadre du mémoire de DEA de J. Morschel. La carte des risques réalisée dans cette étude résulte de la spatialisation de la « Revised Universal Soil Loss Equation » (RUSLE) établie par Renard et al. (1997).

Cette technique offre la possibilité de connaître, malgré les problèmes inhérents à ce type d'exercice (Bonn, 1998), les quantités de sols (en t/ha) pouvant être détachées annuellement pour chaque pixel d'un secteur donné. De ce fait, il est possible de localiser les secteurs de forte érosion nécessitant une intervention prioritaire.

### *Présentation et description du Lauragais et définition du secteur d'étude.*

Le Lauragais s'est formée dans les dépôts marneux et molassiques Stampien issus de l'érosion des Pyrénées. Le relief a été sculpté par le creusement différentiel des cours d'eau au cours des différentes morphogénèses du quaternaire (Revel et Rouaud, 1985). Il en résulte une succession d'ensembles de collines aux formes arrondies. Ces coteaux, organisés en lanières par un réseau hydrographique principal orienté est/ouest, sont entaillés par un réseau dense de cours d'eau temporaires, orientés nord/sud ou sud/nord, donnant aux paysages un aspect vallonné. Les altitudes sont généralement comprises entre 120 et 350 m. Les coteaux du Lauragais sont marqués par des pentes pouvant dépasser localement 30 % et par la dissymétrie de leurs versants.

Dans ces reliefs vallonnés des sols brun calcique se sont formés durant les inter-glaciations du quaternaire sur le substrat Stampien ainsi que sur les formations solifluées des versants. Revel et Rouaud (1985), les sols actuels découlent principalement de la pédogenèse post-Würm IV. Ils ont cependant été remaniés récemment par la pratique des labours avec déversement aval conduisant à une inversion des profils pédologiques par abrasion des sommets et comblement progressif des ravines. Malgré leur diversité, tous ces sols contiennent une part importante d'argiles. Ce caractère fait que leur structure est stable (Bruno et Fox, 2002). Leur implication dans les problèmes d'érosion hydrique semble donc uniquement liée à leurs localisations sur des versants en forte pente. A l'inverse, dans les

vallées alluviales et dans les secteurs de faible pente se trouvent des sols podzoliques prenant parfois le caractère de bouldènes. Ces sols sont acides et battants. Leurs caractéristiques les rendent théoriquement très sensibles au ruissellement, mais leur localisation en zones planes les exclue des problèmes d'érosion.

En raison de la fertilité de ses sols, la région a été mise en valeur pour l'agriculture très tôt dans l'histoire. Les premiers défrichements datent de l'époque romaine. Au cours du temps, les structures agraires n'ont pas beaucoup évolué. Morschel (2000) souligne que l'espace était, jusque dans les années 60, occupé par un bocage. Actuellement, cette structure n'existe plus : le bocage a laissé place à l'openfield et l'agriculture céréalière intensive a remplacé la polyculture. Les parcelles occupent désormais la totalité des versants et seuls quelques espaces boisés, limités en superficie, apparaissent rythmiquement rompant la monotonie du paysage. Cette nouvelle forme de production agricole se divise en deux composantes : les cultures d'hiver (blé dur) semées en octobre et récoltées en juillet de l'année suivante et les cultures d'été (tournesol) semées en avril et récoltées en août de la même année. Les observations montrent que les parcelles agricoles sont occupées, en moyenne, une année sur deux par des cultures d'été.

Les problèmes d'érosion hydrique sont apparus avec ces modifications de structures agraires et paysagères. Le Lauragais se caractérise par un climat océanique tempéré subissant toutefois des influences méditerranéennes. Celles-ci se traduisent, au printemps, par des précipitations orageuses violentes pouvant décaper localement de 20 à 300 tonnes de terre (Sicoval, 2000). Au cours de cette période, les parcelles mises en valeur par des cultures d'été présentent un sol nu ou peu végétalisé. Les sols de ces parcelles sont alors facilement mobilisables par le ruissellement (Bruno et Fox, 2002). La coïncidence sols nus au printemps et orages est la cause principale des problèmes d'érosion. Ceux-ci sont ensuite amplifiés par les fortes inclinaisons de pente.

Compte tenu de la superficie de la PRA, un secteur plus restreint (couvrant 486 km<sup>2</sup>) est défini pour l'étude. Il correspond au canton de Villefranche-de-Lauragais et aux cantons qui lui sont limitrophes. Les caractéristiques physiques et humaines de ce secteur sont identiques au reste de la région. La figure 5 en montre la topographie et le réseau hydrographique. Cet espace se compose de deux groupes de collines légèrement différents l'un de l'autre, répartis de part et d'autre de la vallée alluviale de l'Hers orientée sud-est/nord-ouest.

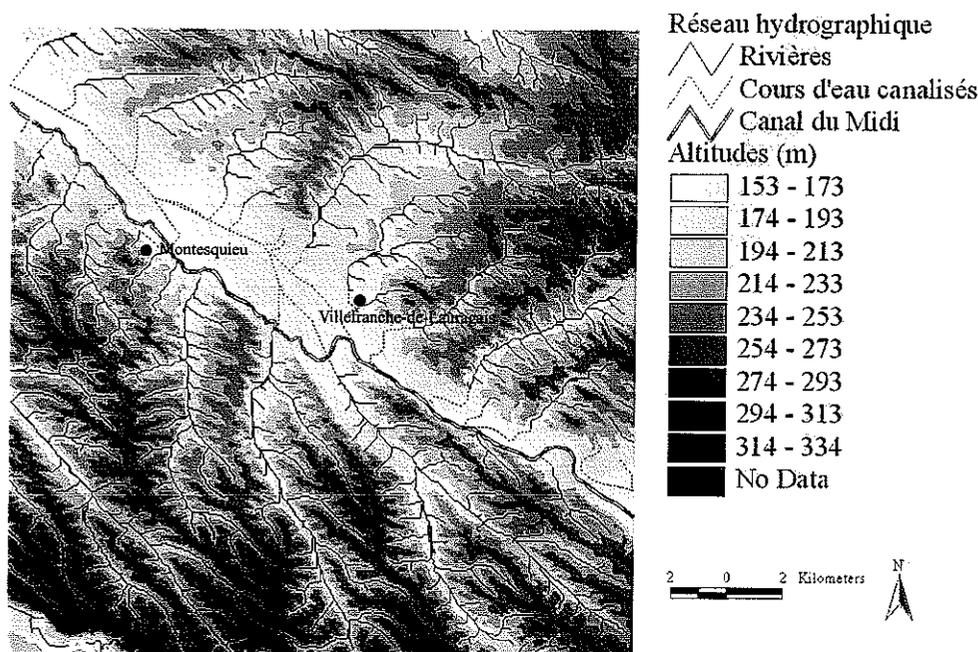


Figure 5 : Topographie et réseau hydrographique du secteur de Villefranche de Lauragais

*Méthode de cartographie de l'aléa érosif*

L'équation "Revised Universal Soil Loss Equation" (RUSLE) a été établie par Renard et al (1997) d'après les travaux de Wischmeier et Smith (1965). Il s'agit d'un modèle empirique dans lequel l'érosion (A), exprimée en t/ha/an, est le produit de 6 facteurs : érosivité de la pluie (R), inclinaison de pente (S), longueur de pente (L), érodibilité du sol (K), couverture végétale (C), mesures de prévention (P). Ce modèle, basé sur un ensemble de régressions, fonctionne à partir de profils topographiques et permet de connaître l'érosion à l'échelle de la parcelle agricole.

Le facteur R se présente sous la forme d'une moyenne calculée sur une période d'au moins 20 ans. Ces données sont rarement disponibles sur une telle durée. Renard et Freimund (1994) proposent une méthode de substitution établie sur une régression entre R et P qui est la hauteur de pluie annuelle moyenne (mm) :  $R = 0,04830 P^{1,610}$

Avec  $r^2 = 0,81$  pour 132 postes répartis sur l'ensemble des Etats-Unis. Cette méthode est employée pour quantifier R dans le Lauragais.

Spatialiser le facteur R nécessite de connaître la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles. Aucune carte de ce type n'existe pour le Lauragais. De ce fait, R est calculé pour une seule valeur de P puis est appliqué de manière indifférenciée à l'ensemble de la zone. Revel (1982) donne  $P = 664,3$  mm (moyenne de 30 années d'observations pour la station de Toulouse-Blagnac), dans ce cas,  $R = 1692,3$ .

Le facteur S est traité à partir du MNT converti en carte des pentes. Il se compose de deux régressions simples permettant d'estimer S à partir du sinus de l'angle de la pente ( $\sin \theta$ ). Cette double représentation est induite par la croissance exponentielle de l'érosion avec l'augmentation de la pente. De cette manière, les pentes supérieures à 9 % ont un poids plus important dans les résultats. La croissance exponentielle n'est donc pas formulée directement mais ses effets sont pris en compte dans le modèle. La formulation du facteur S est :

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \text{ si la pente est inférieure à } 9 \%$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \text{ si la pente est supérieure à } 9 \%$$

L'analyse du facteur S montre que les coteaux situés au sud de la vallée de l'Hers présentent une part plus importante de valeurs élevées de S (environ 85 % des valeurs comprises entre 1,91 et 4,2). Cet ensemble comprend aussi 47 % de la seconde et 60 % de la troisième classe du facteur S. Les coteaux du nord sont donc moins affectés par l'érosion et la vallée de l'Hers présente très peu de risque puisque S ne dépasse pas 0,5.

Les longueurs d'écoulement sont intégrées dans le modèle en rapportant la longueur ( $\lambda$ ), calculée entre le sommet du versant et le début de la zone concave (Renard et al, 1997), à la longueur de la parcelle expérimentale de RUSLE. L'ensemble est élevé à l'exposant m, sans dimension, intégrant l'inclinaison de la pente ( $\theta$ ) et la rugosité du sol ( $0,5 < \beta < 2$ ) aux calculs du facteur :

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^m \text{ avec } m = \frac{\xi \beta}{(1 + \beta)} \text{ et } \beta = \frac{(\sin \theta / 0.0896)}{3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56}$$

Le facteur K qui caractérise l'érodibilité est fonction de la texture des sols (M), de la teneur en matières organiques (MO), de la structure du profil ( $1 < b < 4$ ) et de la capacité d'infiltration ( $1 < c < 6$ ) avec :  $M = (\% \text{ limons} + \% \text{ sables})(100 - \% \text{ argiles})$

La spatialisation du facteur K nécessite une carte des sols renseignée par les informations citées précédemment. Aucune carte n'est cependant disponible pour cette région. Les informations nécessaires sont extraites d'études réalisées précédemment par Charruyer (1996) et Klein (1997). La représentation cartographique des sols correspond donc au découpage du MNT suivant les 4 ensembles qui ressortent de ces études. Les résultats fournis ne sont, par conséquent, pas d'une grande

précision spatiale mais permettent de réaliser quelques distinctions. Compte tenu des paramètres disponibles, les valeurs de K obtenues sont comprises entre 0,043 et 0,076. Les valeurs les plus fortes correspondent aux sols les moins résistants à l'érosion. Ainsi, les sols limoneux battants des vallées alluviales ont un indice K plus élevé. En revanche, les coteaux, composés de sols à fortes teneurs argileuses ont un indice plus faible, témoin de leur plus grande résistance au ruissellement et à l'érosion.

Enfin, la prise en compte des couvertures végétales (facteur C) se fait par intégration de la surface couvrante de la végétation et de la hauteur de chute de la goutte d'eau après impact sur les feuilles. Ainsi, les zones boisées ont un indice plus faible que les espaces couverts par une végétation agricole naissante. Lors de la multiplication de tous les facteurs, les parties couvertes par une végétation plus dense ressortent donc comme moins sensibles à l'érosion.

Pour faire figurer ce facteur dans l'étude, une carte des couvertures végétales est créée à partir de cartes topographiques. Cette couche d'information ne comporte que deux éléments : les espaces boisés et les zones agricoles. Ce manque d'informations n'est cependant pas un grand handicap. En ce qui concerne les zones agricoles, elles sont considérées dans le modèle comme protégées si elles sont occupées par des cultures d'hiver et nues lorsque l'espace est occupé par des cultures d'été. Les observations des itinéraires techniques des cultures montrent que, pour une parcelle donnée, l'alternance des cultures se fait une année sur deux. Si on considère que  $C = 1$  pour les sols nus, alors du fait de la rotation inter-annuelle des cultures, la valeur attribuée au facteur C pour les espaces agricoles est de 0,5. On prend pour les espaces boisés  $C = 0,001$ .

Les 5 facteurs pris en compte et multipliés entre eux permettent d'obtenir la carte de l'aléa érosif.

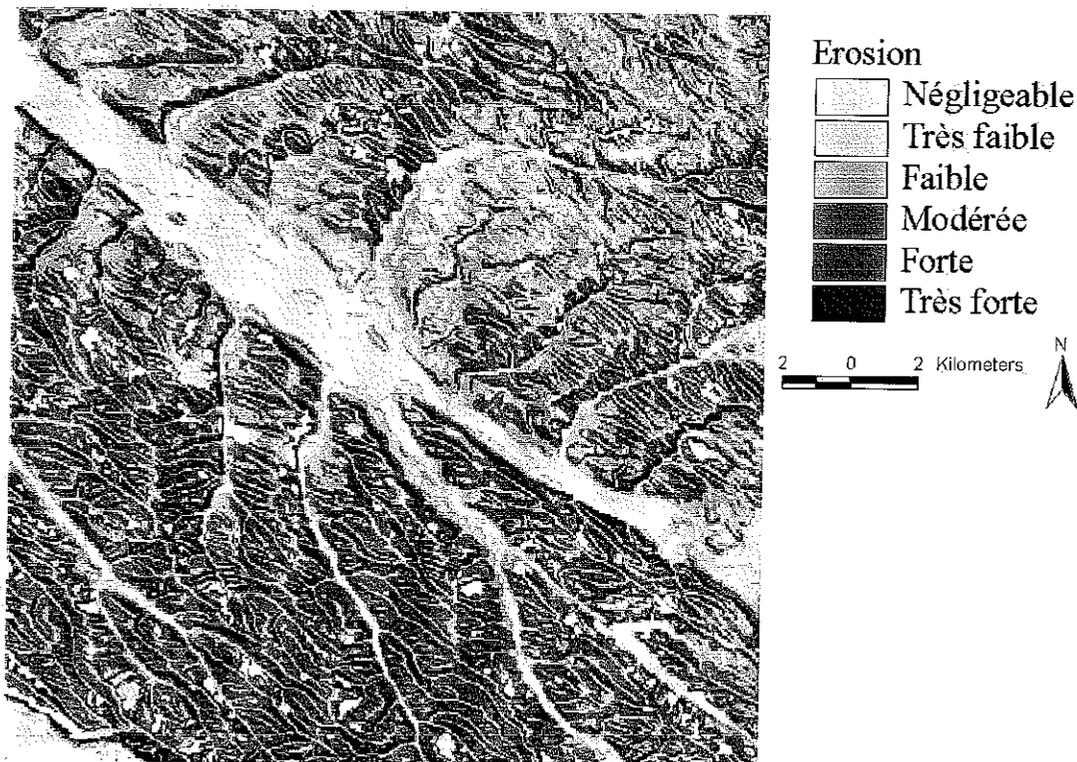


Figure 6 : La carte de l'aléa érosif du secteur de Villefranche de Lauragais

La carte de l'aléa érosif est présentée en figure 6. L'érosion, pour ce secteur, varie entre 0 et 261 t/ha/an. Les valeurs d'érosion obtenues, malgré leur apparente hétérogénéité, présentent une structure spatiale définie par la localisation topo-paysagère dans laquelle elles s'inscrivent (figure 7). De ce fait, les versants présentent toujours une érosion plus forte. Des valeurs moyennes s'observent

pour les parties amont des versants. Enfin les valeurs les moins élevées se trouvent sur les replats sommitaux, dans les concavités aval et dans les vallées alluviales.

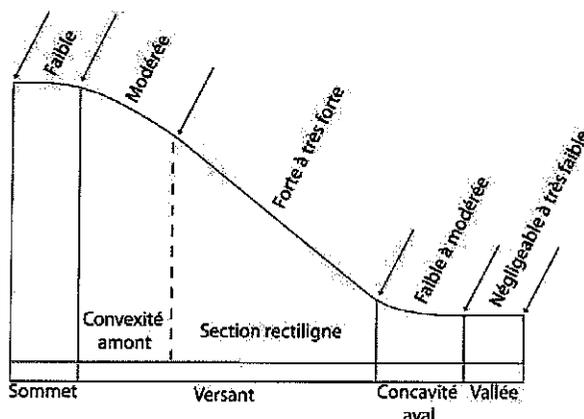


Figure 7 : représentation schématique d'un profil de versant et érosion associée aux entités topo-paysagères.

D'une manière générale, on constate que l'érosion est omniprésente dans ce secteur du Lauragais : même si 51 % de la superficie est occupée par des valeurs d'érosion faibles, près de 37 % de l'espace est soumis à une forte érosion. Cette description générale doit être nuancée. En effet, la vallée de l'Hers présente des valeurs toujours inférieures à 23 t/ha/an. Les classes « négligeable » et « très faible » occupent 90 % de cette entité. Les problèmes d'érosion sont donc marginaux dans ce secteur. Les coteaux du sud de la vallée, en revanche, sont les plus fortement soumis à l'érosion. En effet, 81 % des valeurs supérieures à 60 t/ha/an et 70 % des valeurs comprises entre 31 t/ha/an et 60 t/ha/an se localisent dans ce sous-ensemble. Ceci représente environ 51 % de sa superficie. Hormis les valeurs « négligeables » (11 %), induites par la présence de forêts, les classes « très faible » et « faible » ne couvrent que 25 % de l'espace. Dans ce secteur, les sommets et les parties aval sont en effet très restreintes et les versants sont abrupts. Le nord de la vallée de l'Hers est lui aussi soumis à l'érosion mais de manière atténuée. Les pentes sont moins inclinées, les vallons et les parties sommitales sont plus larges qu'au sud de la vallée. Dans ces deux sous-ensembles, la classe d'érosion « modérée » correspond aux parties concaves amont des versants. Ces valeurs occupent 13 % de l'espace.

La topographie est essentiellement responsable des variations spatiales des valeurs d'érosion. En effet, mis à part le facteur S, tous les facteurs pris en compte présentent une relative homogénéité spatiale. De ce fait, ils ne peuvent pas introduire de différenciations majeures dans les résultats. Le facteur S en revanche est fortement hétérogène tant en terme d'indice qu'en terme de répartition spatiale. Ainsi, présentant des indices plus élevés dans le secteur situé au sud de la vallée de l'Hers, l'érosion estimée par la carte de l'aléa érosif est aussi plus importante dans cette zone.

La carte de l'aléa érosif fournit donc de nombreuses informations concernant le risque de départ de sédiment. Ces informations sont à la fois quantitatives puisque les résultats donnent des mesures de l'érosion, exprimées en t/ha/an pour chacun des pixels de la carte et qualitatives du fait de la connaissance générale de la répartition spatiale du risque de détachement des sédiments. La comparaison des résultats avec d'autres études (Charruyer, 1996 ; Klein, 1997 ; Morschel, 2000) montre que les conclusions de l'analyse de la carte de l'aléa érosif sont correctes.

### Validation

Plusieurs méthodes sont employées pour quantifier l'érosion hydrique et localiser les risques. Charruyer (1996) et Klein (1997) estiment, suivant une adaptation de la méthode volumétrique de Ludwig (1992), les pertes de sol pour huit parcelles. Les valeurs d'érosion mesurées dans ces secteurs servent donc aussi d'élément de comparaison.

En 1996, des mesures de volumes de sols évidés dans les rigoles formées sur les versants sont effectuées suite à 4 épisodes pluvieux. Les orages, d'intensité 6 mm/h, 30 mm/h (Montesquieu), 35 mm/h (Maureville) et 58 mm/h (Deyme), ont entraîné des pertes en sol sur les trois sites étudiés. L'érosion mesurée sur ces parcelles est de (respectivement) 3 t/ha, 24 t/ha, 7,5 t/ha et 112,5 t/ha. En 1997, les pertes en sol des parcelles du sites de Montesquieu, mesurées suite à un seul épisode orageux particulièrement violent (95 mm/h), sont comprises entre 39 t/ha et 282 t/ha.

En terme de détachement des sédiments, la carte de l'aléa érosif propose, pour les parcelles du site de Montesquieu (intégrées au SIG), des valeurs comprises entre 6 t/ha/an et 124 t/ha/an. Bien entendu, ces valeurs sont calculées à partir de précipitations moyennes pour une longue période contrairement aux deux études où l'érosion est mesurée à la suite d'évènements pluvieux ponctuels. Malgré tout, les résultats fournis par ces méthodes différentes sont proches. En terme de quantité de sédiments érodés, il existe donc une bonne adéquation entre la carte de l'aléa érosif et les valeurs mesurées sur le terrain.

En outre, ces études font ressortir un second élément. Les mesures réalisées de part et d'autre de la vallée de l'Hers montrent des différences sensibles entre les deux sous-ensembles. Les parcelles de Montesquieu et de Deyme sont associées au sous-ensemble sud. Leurs caractéristiques topographiques (notamment pour Deyme) sont identiques à ce qu'il est possible d'y observer. En terme de détachement de sédiments, ceux-ci atteignent 112,5 t/ha pour des orages d'intensité moyenne et 199,5 t/ha pour un orage violent. Le site de Maureville en revanche est associé au sous-ensemble topographique situé au nord de la vallée de l'Hers. Dans ce secteur, l'érosion mesurée suite à un orage de 35 mm/h est beaucoup plus faible que celle mesurée au sud suite à un orage de 30 mm/h. Ces différences font ressortir la dichotomie nord / sud observée à partir de la carte de l'aléa érosif. Cette analyse est renforcée par les résultats de Morschel (2000). Les différences spatiales observées se manifestent aussi en ce qui concerne les routes présentant des risques de recouvrement par les sédiments. En effet, sur les 112 km de route à risque estimées par cet auteur, 73 km (soit 65 %) se situent au sud de la vallée de l'Hers. Compte tenu du fait que le réseau routier est spatialement homogène, ces différences proviennent uniquement de la configuration topographique différenciant ces deux sous-ensembles.

Ces quelques éléments de comparaison nécessiteraient d'être complétés par d'autres mesures réalisées sur le terrain. Cependant, l'adéquation entre la carte de l'aléa érosif et les résultats d'autres études permettent une première validation de cette méthode pour localiser et quantifier l'érosion dans le domaine agricole.

### *Conclusion*

Cette étude apporte une connaissance à la fois globale et précise sur les zones présentant des risques de départ des sédiments. La cartographie de l'aléa érosif est donc un instrument complémentaire à la mesure sur parcelle expérimentale et un apport de connaissance concernant les risques d'érosion dans les régions agricoles. Cette connaissance est cependant partielle. En effet, la carte de l'aléa érosif présente uniquement le risque de détachement des sédiments. Les secteurs de dépôt n'apparaissent pas. Or, il paraît important de savoir où ces secteurs se situent et de connaître les quantités de sol qui risquent de s'y déposer. Ces informations sont capitales puisqu'elles permettent de localiser plus précisément l'emplacement des dispositifs de prévention et surtout de les calibrer. Ces problèmes sont liés à l'absence de connaissance sur les écoulements (en terme de quantité et de direction) à l'échelle du versant. L'intégration, à la méthode de cartographie, d'un modèle d'écoulement remplaçant le facteur L semble être une piste à suivre pour affiner les résultats. Dotée d'un tel modèle, la carte de l'aléa érosif pourrait devenir un outil de prospective intéressant pour l'implantation des dispositifs de prévention.

### 1. 3 Conclusion sur l'évaluation de l'aléa érosion à l'échelle régionale

Les deux études présentées ci-dessus présentent un certain nombre de caractéristiques communes : prise en compte des mêmes facteurs, difficultés d'acquisition des paramètres nécessaires

au modèle à l'échelle régionale, problèmes de validation. Elles diffèrent sur le choix de la méthode de modélisation, c'est à dire la paramétrisation des différents facteurs et leur combinaison, ainsi que sur l'expression des résultats : qualitatifs dans le cas de la Normandie et quantitatifs pour le Lauragais, mais sur la base d'une calibration effectuée sur des données des Etats Unis et dont il n'est pas certain qu'elle soit valide dans notre région. Une autre différence réside dans le choix d'une spatialisation et d'une intégration à l'échelle des petits bassins versants pour la Normandie.

Dans les deux cas les résultats apportent une information à la fois globale, homogène et précise sur les zones présentant des risques d'érosion des sols et permettent d'identifier les facteurs ou combinaisons de facteurs en cause. Ils permettent une première analyse des situations à risque qui peut ensuite conduire à une approche plus fine de sites représentatifs et à l'étude de mesures susceptibles de limiter ces risques à l'échelle locale. C'est cette démarche qui est présentée dans la deuxième partie de ce rapport.

## Partie 2 : Evaluation du potentiel érosif et de l'efficacité des mesures anti-érosives à l'échelle locale (parcelle, bassin versant ou versant)

Il s'agit dans cette partie, d'analyser le rôle des facteurs locaux (pente locale, occupation des sols et propriétés des sols) et l'efficacité des différentes mesures anti-érosives déjà testées ou envisagées dans chacune des régions étudiées, avec une vision critique et hiérarchisé des différentes mesures possibles et la quantification des effets quand les données existent (efficacité relative).

Nous avons procédé à un inventaire des méthodes et techniques de lutte et de protection dans les deux situations étudiées, et nous avons cherché à analyser leurs conditions d'applications et les marges de manœuvre au niveau des exploitations et des collectivités.

### 2.1 Evaluation technique de mesures anti-érosives dans le Pays de Caux

#### *Etat de la situation érosive*

La situation érosive dans le Pays de Caux est bien connue. Les problèmes proviennent à la fois des phénomènes d'érosion par ruissellement diffus et par ruissellement concentré. Les dégâts les plus importants se manifestent en dehors du territoire agricole (qualité des eaux, voirie et habitations). Sur le territoire agricole les ravines générées par l'érosion concentrée perturbent aussi fortement la circulation des engins agricoles sur les parcelles tout en induisant des pertes de récolte localisées. Contrairement au Lauragais, du fait de l'épaisseur des sols, on ne constate pas encore de baisse de fertilité due à l'érosion en Pays de Caux.

#### *Les différents types de méthodes de lutte possible dans le Pays de Caux*

L'inventaire qualitatif des méthodes de lutte anti-érosives est bien avancé.

Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes :

- un premier groupe de méthodes dont l'objectif est de réduire la production de ruissellement et d'éviter que ce ruissellement ne se charge en terre. Ce premier groupe de mesures concerne uniquement le territoire agricole. Les changements d'itinéraires techniques et de successions de culture visent essentiellement à réduire le ruissellement. La modification des parcelles et la création de fossés limitent la concentration des eaux de surface. Enfin les bandes tassées ou enherbées en fond de talweg limitent la charge en terre du ruissellement.
- un deuxième groupe dont l'objectif est de canaliser et « épurer » le ruissellement boueux pour réduire les impacts négatifs sur les infrastructures aval. Dans ce deuxième groupe on peut avoir des bandes enherbées implantées perpendiculairement au sens d'écoulement en aval de parcelles érodables. On trouve aussi dans cette catégorie des ouvrages de rétention des eaux boueuses tels que les mares, les talus, ou les bassins secs.

#### *Efficacité des méthodes de lutte*

- **Les acquis antérieurs à 1999 (antérieurs au programme GESSOL)**

Ces acquis portent sur l'aménagement des fonds de talwegs et des bas de pente.

Si les bandes tassées en fond de talweg sont efficaces dans des situations faiblement érosives, en revanche elles peuvent aggraver les problèmes lorsque les phénomènes sont plus marqués. De façon empirique il apparaît que si le talweg n'est érodé qu'une fois tous les 2 ou 3 ans alors la bande tassée peut suffire, en revanche si l'érosion se produit tous les ans la bande enherbée est nécessaire. Par ailleurs, les bandes enherbées en bas de pente sont très efficaces pour réduire la charge en terre du ruissellement pour peu que le ruissellement ne circule pas de façon concentrée sur ces bandes (Lecomte et al., 2003).

Les bandes enherbées, implantées à l'aval d'une parcelle de 60 m de long cultivé en blé, permettent une réinfiltration importante du ruissellement, en moyenne pour deux années de mesures : de l'ordre de 85 % pour une bande d'herbe de 3 m de large (représentant 5 % de la surface émettrice) et de 90 % pour une bande d'herbe de 6 m de large (représentant 10 % de la surface émettrice). De plus la charge solide du ruissellement traversant la bande enherbée est réduite d'un facteur 2 à 4 (figure 8). De ce fait, l'érosion et les coefficients de perte en pesticides sont réduits de façon significative par les bandes enherbées (98 % de réduction de l'érosion, 97 % de réduction du coefficient de perte en herbicide (Isoproturon) après 6 m d'herbe). L'infiltration des bandes enherbées a été évaluée à 50 mm/h. Cependant des ruissellements peuvent survenir à l'aval de bandes enherbées alors que la capacité d'infiltration théorique était suffisante pour réinfiltrer l'ensemble du ruissellement. Le phénomène est dû à l'existence, dans l'herbe, de chemins préférentiels qui empêchent une sollicitation de l'ensemble de la surface enherbée lors de faibles débits (Lecomte et al., 2003).

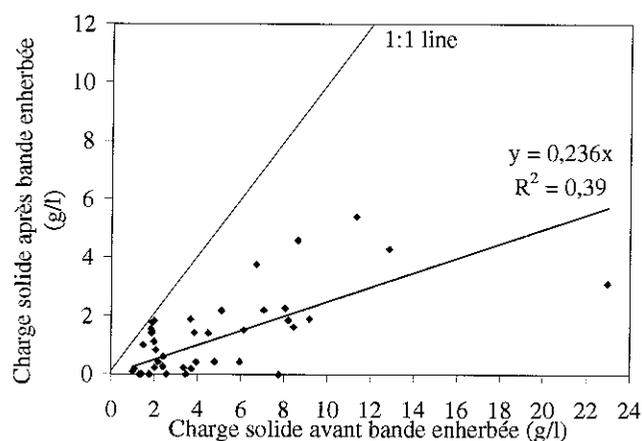


Figure 8 : Mesure de la charge solide avant et après bande enherbée

- **Travail réalisé entre 2000 et 2003**

Les bassins de rétention ont fait l'objet d'une évaluation par l'AREAS (2001) partenaire du programme GESSOL. Cette évaluation a été conduite dans le cadre d'un financement FEDER géré par le pôle de compétences « Sol et eaux Haute-Normandie ». Cette évaluation a montré que le volume initial des ouvrages n'était pas toujours adapté (sous et sur dimensionnement). Par ailleurs le volume de stockage tend à diminuer au cours du temps du fait de la sédimentation en fond de bassin de la charge solide du ruissellement. Ce comblement progressif tend aussi à obstruer les canalisations assurant le débit de fuite, réduisant d'autant plus l'efficacité. Un curage des ouvrages tous les 5 ans est souvent nécessaire. La fréquence de ce curage est d'autant plus importante que les ouvrages sont situés en amont du bassin versant. Ceci s'explique par une moindre possibilité de sédimentation sur le chemin de circulation de l'eau.

Les pratiques culturales sont à la fois plus simples et plus difficiles à évaluer dans le Pays de Caux que dans le Lauragais. L'évaluation est plus simple, du fait de la prédominance des phénomènes d'érosion concentrée, on peut négliger l'érosion diffuse en sortie des parcelles et se limiter, dans une

première approche, à l'évaluation du risque de ruissellement. L'évaluation est aussi plus complexe du fait que le ruissellement diffus ne laisse pas de trace visible sur les parcelles (contrairement à l'érosion) et qu'il est donc nécessaire de le mesurer en temps réel lors des épisodes pluvieux. Par ailleurs on note dans le Pays de Caux une grande diversité des cultures et des techniques mises en œuvre qui complique autant le diagnostic (6 à 8 cultures différentes par exploitation)

L'évaluation des risques de ruissellement avait été amorcée dans le cadre du travail de thèse de P. Martin (1997). L'objectif du travail réalisé dans le cadre de GESSOL était de valider ces premiers résultats obtenus en périodes d'interculture, tout en cherchant à obtenir des résultats complémentaires pour les périodes de culture.

#### *Un besoin en dispositif de mesure du ruissellement*

Les premiers résultats (Martin, 1997) avaient été obtenus avec des dispositifs de type bac totalisateur qui bien que peu coûteux à l'achat se révélaient très consommateurs en main d'œuvre et en coût de mise en place (creusement puis rebouchage de trous pour implanter les bacs). Par ailleurs, les bacs totalisateurs débordent fréquemment, il est donc quasi impossible avec ce système de connaître l'effet des pratiques culturales pour des événements pluvieux trop importants. Un des objectifs majeurs du programme GESSOL en Pays de Caux a donc été de mettre au point des dispositifs techniquement plus performants et moins coûteux à l'utilisation. Dès le départ on a aussi cherché à rassembler les agents de développement locaux (chambres d'agriculture, Instituts techniques) afin qu'ils prennent une part active à la mise au point du matériel et des méthodes de mesure. Les conditions de faible pente locale interdisaient l'utilisation de dispositifs existants décrits dans la bibliographie (Hudson, 1993) A partir de 1999, l'UMR SAD APT et la chambre d'agriculture de l'Eure ont amorcé une collaboration informelle afin de mettre au point un dispositif automatique de mesure du ruissellement facilement montable et démontable par une seule personne sur une parcelle d'agriculteur. Dès le départ les recherches se sont orientées vers un dispositif à augets basculeurs. Dès 2000, une première série de 16 « prototypes » a été acquise par les chambres d'agriculture de Seine-Maritime (12 appareils) et de l'Eure (4 appareils) pour réaliser des mesures de ruissellement sur parcelle de 20 m<sup>2</sup> sous pluie naturelle. Toutefois le suivi et l'analyse des résultats ont montré que ces appareils présentaient de nombreux défauts et qu'il était nécessaire de les améliorer avant d'espérer produire des références fiables. Courant 2001, tous les problèmes techniques liés aux augets ont pu être résolus grâce au travail réalisé par C. Legout (2001) dans le cadre de son stage de fin d'études. Ce travail a permis de signer un contrat de licence exclusive entre l'INRA (Agri-Obtentions) et JPCL (PME basée à Brionne dans l'Eure) visant la multiplication de ces appareils. Au printemps 2001, du fait de conditions climatiques très particulières, (longue période sans pluie après les semis associée à des températures élevées) les cultures ont rapidement protégé la surface sans que celle-ci soit dégradée...en conséquence aucune parcelle n'a ruisselé. Entre temps, le cercle des producteurs de données de ruissellement s'est élargi. L'Institut Technique de la Betterave (ITB) ainsi que l'Association Régionale des Producteurs de Pomme de Terre de Haute-Normandie (ARPTHN) ont voulu faire l'acquisition d'appareils (6 par organisme) pour effectuer des mesures chacun sur la culture dont il était en charge (betterave et pomme de terre). S'est alors posé le problème de la normalisation des protocoles de mesure afin de permettre des comparaisons entre tous les résultats acquis par les différents organismes. Cette «normalisation» qui va de la délimitation des parcelles de mesure jusqu'à la collecte des résultats sur les centrales d'acquisition a été amorcée par Mangenot (2002) dans le cadre de son stage de 2ème année de l'INA P-G. Le dernier point technique qui restait à traiter était la mise au point d'une procédure informatique permettant de traiter rapidement les données issues des centrales d'acquisition (ruissellement + pluviométrie) afin de produire des pré-résultats de même nature pour les différents producteurs de données. Ce point est en cours de traitement via une collaboration entre l'UMR SAD APT et l'AREAS (Belotte et Foray, 2003).

Les premiers résultats obtenus avec des appareils dont on est sûr du bon fonctionnement ne datent que du printemps 2002. Les résultats antérieurs sont partiellement utilisables mais nécessitent de nombreuses vérifications des données qui n'ont pas pu être faites jusqu'alors. Le tableau suivant

présente l'ensemble des essais qui ont été mis en place entre 2000 et 2003. Ce tableau est structuré selon les 2 périodes de mesure automne-d'hiver d'une part et printemps-été d'autre part. Les points testés se rapportent :

- à l'implantation de la culture (affinement du lit de semence, labour ou non labour préalable au semis...),
- aux techniques sur culture en place (binage buttage ou semis sous couvert...)
- à la conduite des intercultures.

Chaque date (2000, 2001, 2002) présente dans une case correspond à un essai mis en place une année donnée par l'un ou l'autre des organismes utilisant les appareils de mesure du ruissellement (Chambre d'agriculture de Seine-Maritime ou de l'Eure, ITB, ARPTHN, INRA).

Tableau 1 : Inventaire des essais mise en place de parcelles expérimentales pour la mesure du ruissellement en Haute Normandie

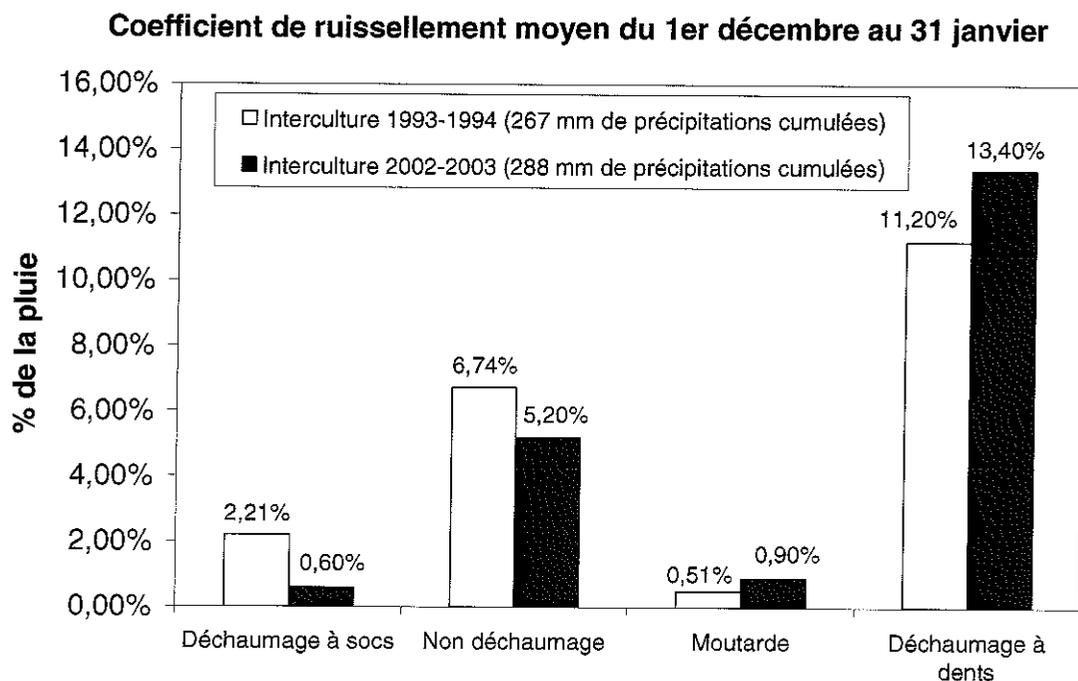
		Implantation culture				Culture en place		Interculture
		Test de l'effet du précédent	Comparaison Labour/Non labour	Semis sous Couvert/Non couvert	Lit semence affiné/Non affiné	Binage/Non binage	Rebutage traditionnel/ Avec roues anti-ravines	Déchaumage /Cultures intermédiaire /non déchaumage
AUTOMNE	Blé	2001 2002	2001		2000			2000 2001 2002
	Blé	2002 2003						
PRINTEMPS	Pois				2001			
	Lin							
	Betterave		2002			2002		
	Pomme de terre				2002		2002	
	Maïs		2000	2000 2001 2002		2001		

• **Les acquis du réseau de mesure de ruissellement :**

Ce réseau n'est pleinement fonctionnel que depuis le printemps 2002. Malgré cela il a déjà permis de produire des résultats intéressants.

*Validation des acquis pour l'interculture*

la figure ci-dessous établit une comparaison entre les résultats obtenus dans le cadre de la thèse de P. Martin (mesure avec des bacs totalisateurs) et ceux obtenus en collaboration avec la chambre d'agriculture de Seine-Maritime durant l'automne hiver 2002-2003. Pour chaque traitement la valeur indiquée est la moyenne de 2 répétitions. On constate que pour la même période de référence, le classement des pratiques culturales est identique (moutarde et déchaumage à soc significativement différent du non déchaumage, lui-même différent du déchaumage à dents). Ceci confirme l'intérêt des techniques de déchaumage à soc ou de culture intermédiaire pour la limitation du ruissellement.



Source : INRA et Chambre d'agriculture Seine-Maritime

*Figure 9 : Coefficients de ruissellement moyens pour différentes pratiques culturales d'intercultures en Pays de Caux*

#### *Résultats nouveaux pour les cultures de printemps*

La pomme de terre est une culture souvent mise en cause dans les problèmes de ruissellement printaniers. Or, il n'y avait pas de références de ruissellement disponibles en Haute Normandie pour cette culture. La collaboration avec l'ARPTHN a permis de mettre en place une série de d'essais visant à préciser l'impact de la culture de pomme de terre sur le ruissellement.

Un premier type d'essai vise à tester l'impact des nouvelles techniques de production sur le ruissellement. Une de ces nouvelles techniques est le tamisage. Il vise à éliminer les cailloux avant implantation des pommes de terre. La question est de savoir si ce tamisage augmente ou pas le risque de ruissellement du fait de la totale destruction des mottes. Les premiers résultats sont très intéressants car ils semblent indiquer que le tamisage n'entraîne pas d'accroissement de ruissellement par rapport aux itinéraires techniques classiques (résultats à confirmer par de nouvelles mesures en 2003).

Un deuxième type d'essai vise à vérifier l'effet précédent de la pomme de terre sur un suivant blé (situation la plus fréquente en Haute-Normandie). A nouveau la question est de savoir si le tamisage n'entraîne pas un accroissement de ruissellement sur la culture suivante. Les premiers résultats semblent indiquer que ce n'est pas le cas (résultats à confirmer en 2003).

#### *Mise en place d'une dynamique régionale*

L'acquis le plus significatif du programme GESSOL concernant l'évaluation technique de mesures anti-érosive n'est pas tant l'obtention de résultats sur telle ou telle technique culturale que la mise en place d'une dynamique régionale sur ce thème. En effet la mise au point des appareils de mesure de ruissellement puis la définition d'un protocole de mesure commun a permis de rassembler autour d'une même table et d'un même projet des organismes qui s'ignoraient et travaillaient jusqu'alors chacun de leur côté, au risque de produire des résultats contradictoires. Cette dynamique n'a pas été évidente à mettre en place du fait que le pôle de compétences sur lequel on comptait s'appuyer est sans animateur depuis fin 2001. La dynamique collective initiée par le pôle a donc été difficile à maintenir du fait que chaque acteur (chambres, institut technique...) était tenté de faire son

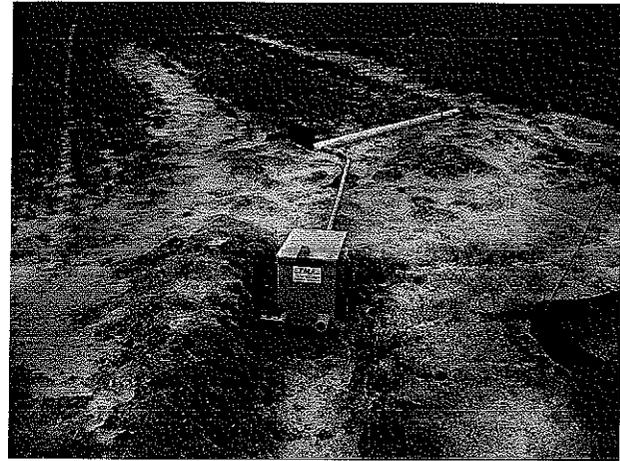
travail de son côté sans forcément voir a priori l'intérêt de se coordonner avec les autres. Il a donc fallu déployer de l'énergie et du temps pour initier une nouvelle dynamique autour de la question de l'acquisition des références ruissellement (2 à 3 réunions par an en Haute-Normandie à l'initiative de l'UMR SAD APT). Cette dynamique étant maintenant en place on peut espérer obtenir rapidement de nouvelles références qui permettront d'orienter le conseil auprès des agriculteurs de façon coordonnée entre les différents organismes de recherche et de développement.



Etalonnage des appareils de mesure du ruissellement Source : JPCL

<http://st.jpcl.free.fr/index.php3?l=content/auget.i>

nc



Appareil de mesure du ruissellement en place.

Photo : P. Martin

## 2.2 Evaluation technique de mesures anti-érosives dans le LAURAGAIS

### *Etat de la situation érosive*

L'analyse de la situation érosive dans les coteaux molassiques du Lauragais en Midi-Pyrénées, a mis en évidence un processus bien spécifique à cette région (EcoSpace, 1996-1998). Si les dégâts peuvent nuire au domaine public sous la forme de coulées boueuses, ils sont plus préoccupants pour le maintien de la fertilité des sols. La faible épaisseur de la couche arable sur les versants les plus pentus diminue au fil des ans provoquant un appauvrissement des sols et une perte de fertilité irréversible.

Si la topographie et le régime climatique sont les principaux facteurs intrinsèques de l'érosion, l'analyse montre que l'agriculteur a aggravé cette potentialité par les modifications parcellaires qui ont conduit à la mise en culture d'un seul tenant de versants entiers. Les systèmes de culture ainsi que les pratiques culturales sont également un facteur aggravant. Le ruissellement affecte un versant, qui correspond en général à une parcelle. Il est rare que plusieurs parcelles interfèrent entre elles, que ce soit sur une même exploitation ou entre exploitations différentes. Le ruissellement provoque des déplacements de terre à l'intérieur de la parcelle, qui recouvrent les jeunes semis, entraînant dans certains cas des re-semis, mais aussi des départs de terre hors de la parcelle qui comblent les fossés et la voirie, provoquant des coûts pour la collectivité. L'importance des dégâts peut atteindre, dans le cas d'orages de forte intensité, jusqu'à  $180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de terre déplacée sur un versant ayant une pente de 20%.

Les résultats de travaux réalisés sur quelques versants montrent que la répartition spatiale de l'érosion liée à la topographie ainsi que les caractéristiques du sol doivent être prises en compte dans les aménagements de maîtrise de l'érosion. Il a aussi été mis en évidence que le redécoupage parcellaire, dans certains cas, permettait de réduire le ruissellement hors de la parcelle en limitant la longueur de pente. L'occupation d'un versant par une culture d'hiver et une culture d'été,

éventuellement associée à un semis en travers de pente réduit considérablement le ruissellement en rigoles.

D'un point de vue pédologique, le haut des versants qui peut apparaître relativement stable vu sa pente faible, est une zone qui se décape facilement et qui génère beaucoup de ruissellement à cause de sa faible infiltrabilité. Le décapage du profil pédologique se fait autant par le travail du sol que par l'érosion hydrique, et des techniques culturales qui suppriment le labour sont à explorer. Les quelques observations réalisées sur des parcelles conduites en « non labour » depuis quelques années ont fait apparaître des taux de matière organique en augmentation, un état de surface qui se fermait moins vite avec des débris végétaux en surface, et peu de ruissellement suite à des orages érosifs.

Le travail réalisé dans le cadre de Gessol, avait pour objectif de tester certaines mesures anti-érosives susceptibles de réduire le ruissellement érosif. Nous avons retenu trois mesures qui nous semblaient les plus efficaces, aussi bien en matière d'aménagements qu'en modifications de techniques culturales. Il s'agit de la redistribution des soles de cultures sur le versant pour éviter l'alternance culture d'hiver/culture d'été, de l'implantation d'une bande enherbée en courbe de niveau et de l'adoption des techniques culturales simplifiées, ou plus précisément ce que l'on appelle désormais les techniques sans labour (TSL).

### *Les mesures étudiées*

#### 1- Le redécoupage parcellaire avec aménagements.

Nombreux sont les versants dont le risque érosif est élevé qui occasionnent des dégâts sur le domaine public. Dans la mesure où les sorties de terre restent localisées sur le domaine de l'agriculteur (bas de parcelle, fossé, autre parcelle...), les recherches de mesures pour limiter le ruissellement restent relativement rares. En revanche, lorsque la sollicitation provient d'une demande expresse de la part de collectivités ou d'organismes subissant directement les nuisances, la pression oblige l'agriculteur à réagir. C'est le cas de figure du site qui a été étudié.

#### *Présentation de la situation avant aménagement.*

Il s'agit d'une exploitation de 158 ha de SAU, dont 22 ha en propriété dans les coteaux argilo-calcaires du Lauragais. Le système de production est la polyculture-élevage, l'exploitation compte 24 têtes de bétail, destinées à la production de viande. Les bêtes entretiennent les bordures des bois. L'exploitant touche des primes pour la pâture, primes à la vache allaitante et primes à la désintensification. Chaque année, une vingtaine d'hectares sont consacrés à des cultures fourragères (ray-grass et prairies temporaires, parfois un peu de sorgho) ; le reste se partage entre blé dur, tournesol, pois, colza, soja. Le blé dur concerne 50 % des cultures autres que fourragères, les autres cultures se partagent les 50 % restants. Il s'agit en fait d'une rotation sur deux ans (un an blé dur, un an autre culture).

La parcelle la plus touchée par les problèmes d'érosion occupe tout un versant, soit 24 ha. Avant aménagement, elle était travaillée uniquement dans le sens de la pente. A son arrivée en 1974, l'agriculteur a comblé un fossé qui coupait la parcelle dans le sens de la pente et rasé un talus de 50 cm environ, perpendiculaire à la pente. A cheval sur le fossé, une mouillère a dû être drainée. En dehors de ces drains, le versant ne comporte ni système d'irrigation, ni système de drainage. Sur le haut du versant, la pente est faible (5 à 6 %), mais suffisamment longue pour que l'eau de ruissellement acquière une vitesse lui permettant d'inciser le sol à la rupture de pente. En dessous, la pente atteint 25 %, avant de s'atténuer en un replat, sur les derniers mètres avant la route. Il y a donc ici conjugaison du facteur longueur de pente (425 m en moyenne sur tout le versant) et du facteur valeur de pente, ce qui rend ce versant particulièrement sensible à l'érosion. De plus, une microdépression persistante sur l'emplacement de l'ancien fossé constitue une zone de concentration des eaux de ruissellement, d'autant

plus que le sens de plus grande pente n'est pas uniforme sur la partie inférieure du versant et oriente une partie des eaux de ruissellement provenant de la partie supérieure vers la microdépression. A cet endroit, on assiste donc à de l'érosion par ravinement.

#### *Les dégâts sur le versant et la route en contrebas avant aménagement*

Les principales manifestations d'érosion sont des rigoles parallèles qui se creusent tous les 15 à 20 m et peuvent atteindre 15 cm de large et 10 cm de profondeur. Dans le bas de la parcelle, qui constitue la zone la moins en pente, la terre s'accumule et si l'orage est violent, la terre remplit le fossé situé en aval et recouvre la route départementale (D18). La D18 est d'ailleurs la route sur laquelle la DDE intervient le plus souvent dans la région, pour curer le fossé et déblayer la chaussée parfois recouverte par les coulées boueuses. Enfin, l'exploitant a observé que l'incision des rigoles démarrait plus rapidement dans les traces d'engins (moissonneuse ou tracteur). Il faut noter que le travail du sol dans le sens de la pente, qui augmente la quantité de terre déplacée, était pratiqué systématiquement avant aménagement.

La fréquence des orages n'est pas constante sur une longue période. En effet, il y a plus de 5 ans, ce versant n'essuyait pas plus d'un orage tous les 2 ans, tandis que sur les trois dernières années, les orages se sont multipliés jusqu'à atteindre 2 à 3 orages significatifs par an. Par conséquent, il est difficile de tabler sur une fréquence régulière des épisodes pluvieux conduisant à des manifestations d'érosion sur ce versant. A titre indicatif, on considère généralement que la fréquence de retour des orages sur une même parcelle est de 5 ans.

En septembre 1997, un orage de force moyenne (30 mm en 20 mn) a eu lieu sur le versant, dont la terre était alors entièrement nue. De nombreuses rigoles se sont creusées, ainsi qu'une petite ravine au niveau de la microdépression (sur l'ancien fossé). Le fossé en contrebas de la route a été à moitié comblé sur 200 m (pour 700 m de longueur en bordure de la D18) et a débordé sur la route par endroits (notamment en face du talweg).

En octobre 1997, un orage particulièrement violent (65 mm d'eau en un quart d'heure) a eu lieu sur le versant, qui était alors tout juste semé de colza et de ray-grass. La route en contrebas a été recouverte d'une grande quantité de terre (qui a également entièrement comblé le fossé) et de profondes rigoles se sont creusées dans les deux parcelles, entraînant une perte de 10 % du ray-grass et 20 % du colza. Le plus important aux yeux de l'agriculteur a été la perte de terre fertile, difficilement évaluable mais néanmoins importante, au vu de la quantité de terre qui a recouvert la route (sur 5 cm d'épaisseur en moyenne). Il n'a pas ressemé.

#### *L'aménagement du versant*

A la suite de pressions de la part de la DDE (des accidents dus aux coulées boueuses s'étaient produits), de la mairie et des riverains (les coulées de boues atteignaient le lac de loisirs situé 300 m en contrebas du versant), l'agriculteur a décidé d'adopter des mesures anti-érosives en 1998.

Suite à une étude diagnostic réalisée par la Chambre Régionale d'Agriculture et une consultation de la part de l'INRA-SAD de Toulouse, les solutions retenues ont été les suivantes :

- division du versant en 4 parcelles, occupées par des soles de cultures ayant des dates de semis différentes afin que le versant ne soit pas entièrement exposé à l'érosion, en favorisant de préférence les cultures d'hiver,
- mise en place de deux bandes enherbées en travers de la pente, de 6 m de large ; la première se situe à la rupture de pente, l'autre est au bas du versant. Il s'agit d'une combinaison de fétuque, de ray-grass anglais et de pâturin, qui a l'avantage de rester vert l'été et ne nécessite pas obligatoirement d'engrais,
- mise en place d'une haie arbustive en haut du talus (pour le maintenir en place) entre la route et la bande enherbée inférieure,
- réserver une large fourrière (travail du sol perpendiculairement à la pente sur les 40 derniers mètres du versant).

De plus, l'agriculteur essaye d'adopter des pratiques culturales limitant le compactage du sol : il ne passe qu'une fois le tracteur, lors du labour à 25 cm avant l'hiver ; son tracteur possède d'ailleurs des roues jumelées, mais pas de tasse-avant ; la reprise se fait à 5 cm à la herse plate. Sur ses 158 ha, 85 sont dorénavant semés en cultures d'hiver, soit 54 % de sa SAU. Enfin, dès 2000, sur les sections les plus en pente (20 ha au total sur son exploitation), il a supprimé le déchaumage.

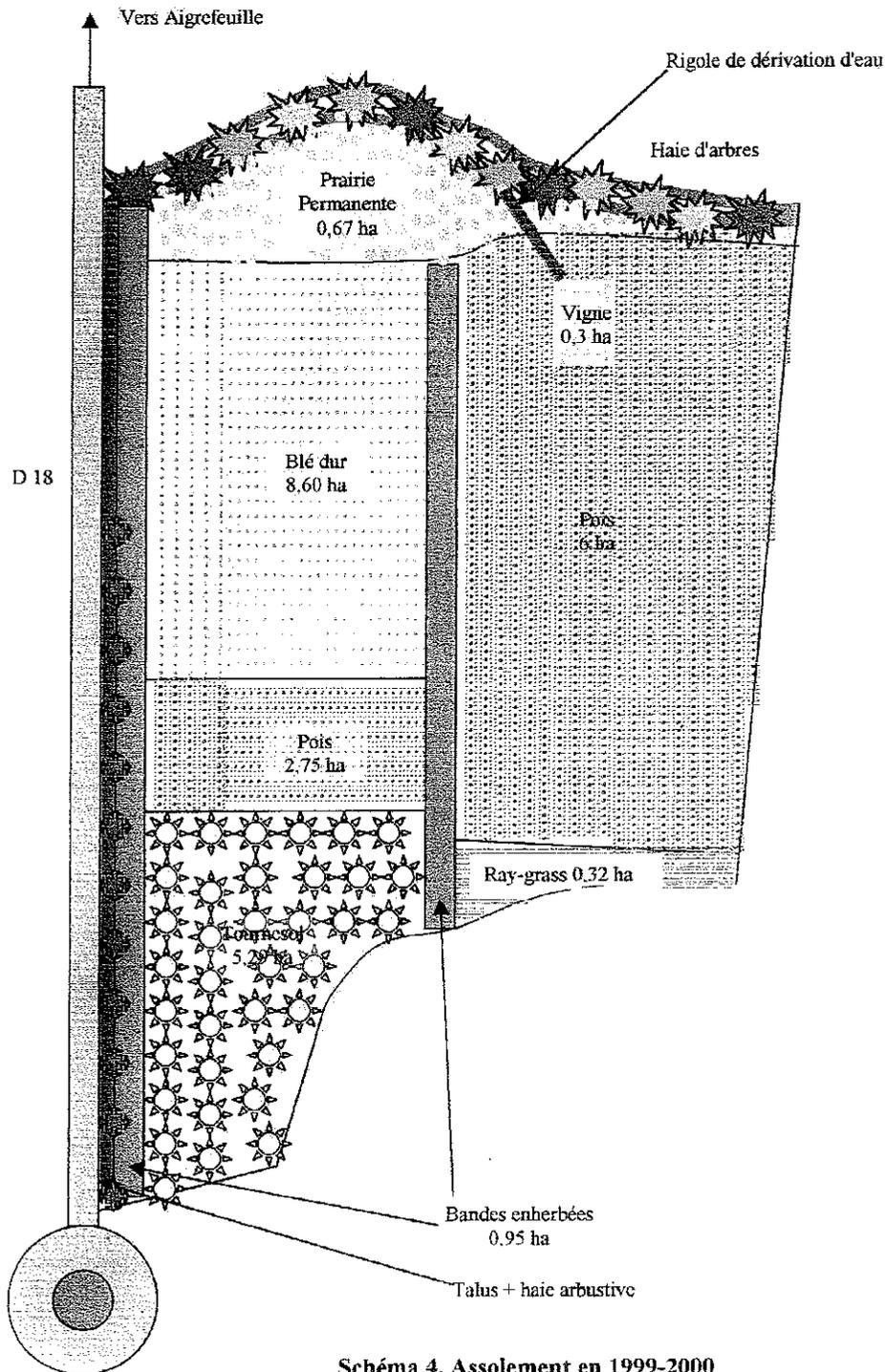


Figure 10 : Schéma du versant après mise en place de l'aménagement

*Les dégâts sur le versant et la route en contrebas après aménagement.*

Depuis l'aménagement, un seul orage a occasionné des dégâts, en septembre 1999. Pour 30 mm tombés en un quart d'heure, les dégâts sur la route ont été moins importants qu'auparavant (le fossé ne contenait que la valeur d'un camion de terre). En 2000, lors des inondations ayant eu lieu dans le Sud-Ouest au cours du printemps, plus de 100 mm sont tombés sur le versant en 48 h sans que des traces d'érosion apparaissent. Le couvert végétal a parfaitement joué son rôle de protection du sol, de même que l'ensemble des aménagements. En 2001, l'assolement était constitué de Tournesol, blé dur et ray-grass. Aucune trace de ruissellement n'a pu être notée sur la culture de tournesol.

*Des résultats encourageants*

Grâce à l'augmentation du taux de cultures d'hiver sur le versant, les risques de dégâts sont fortement diminués au cours du printemps, qui représentait auparavant une période de risque majeur lors d'une année de culture de tournesol, soit une année sur deux. Il serait cependant souhaitable de faire un bilan technique sur une plus longue période, 10 ans au moins, de manière à avoir une diversité dans les événements orageux. Néanmoins, les risques ne disparaissent pas totalement, du fait de la nudité forcée des sols au moment du labour et avant le semis, en automne, lorsque les orages peuvent se manifester intempestivement. En effet, l'orage de septembre 1999, de forte intensité et de faible durée, qui avait eu lieu sur un sol labouré nu, avait entraîné une intervention de la DDE, mais pour des quantités de terre peu importantes. Un orage plus violent entraînerait probablement davantage de dégâts, malgré les dispositifs tels que la haie et le talus...

La redistribution des soles de cultures sur les grands versants est une mesure à encourager pour réduire les risques de ruissellement. Les contraintes rencontrées par l'agriculteur dans ce cas de figure sont négligeables. Dans le cas où l'élevage n'est pas présent sur l'exploitation, la contrainte demeure au niveau de la bande enherbée dont la prime n'est que de 380 €/ha. Dans la mesure où cette prime n'est pas revalorisée, seuls les sites présentant des dégâts érosifs très coûteux pourront être aménagés. Une évaluation économique de ces mesures a été réalisée (voir 3.2)

## 2- La bande enherbée

L'aptitude des bandes enherbées à piéger les particules solides et les fertilisants présents dans le ruissellement a été largement étudiée. Les dispositifs enherbés permettent de réduire significativement le ruissellement grâce à l'infiltration de l'eau dans la zone enherbée. Ils limitent également le transfert des particules solides en jouant le rôle de filtre et en favorisant leur sédimentation. Le dépôt de ces particules s'effectue dans les premiers mètres de la zone enherbée, mais dans le cas des particules fines (argiles), l'efficacité du dispositif augmente avec sa longueur. D'une manière générale, l'efficacité du dispositif est étroitement liée à sa taille et plus particulièrement au rapport entre la surface enherbée et la superficie de la zone contribuant au ruissellement, à la pente du terrain et aux caractéristiques du ruissellement intercepté (ruissellement concentré diffus, vitesse et épaisseur du flux). Les travaux réalisés par le CORPEN- Groupe « dispositifs enherbés » juillet 1997- à la Station de la Jaillièrre, sont concordant avec les mesures réalisées dans le Pays de Caux, et montrent qu'une bande de 12 m retient 97% du ruissellement et 99% des particules solides, alors qu'avec une bande de 18 m on arrive à 100% de rétention.

L'installation de bandes enherbées dans les coteaux molassiques du Sud-Ouest n'a pas connu un réel succès. Quelques mises en place ont été réalisées dans le cadre des Mesures Agri-Environnementales (1995). Cependant, ces bandes enherbées ont toujours été installées en protection de cours d'eau, en bas de versant.

Dans le but d'obtenir des références sur l'efficacité des bandes enherbées disposées selon les courbes de niveau, à mi-versant, pour limiter le ruissellement érosif sur les cultures d'été, nous avons mis en place un dispositif destiné à mesurer le flux hydrique et les sédiments interceptés.

Notre dispositif a été mis en place « in situ », sur le versant d'un agriculteur qui réalise un assolement blé/tournesol. Il est représentatif des coteaux molassiques de la région avec une inclinaison de 25 % au plus fort de la pente et une longueur de 300 mètres.

La bande enherbée, composée d'un mélange jachère (60% fétuque, 30% ray-grass anglais, 10% lothier), est semée après la rupture de pente, à mi-versant et perpendiculairement à la pente. Elle a une largeur de 12 mètres sur 50 mètres de long.

Le dispositif destiné à capter le ruissellement est une conception du Laboratoire de Sciences du Sol d'Orléans. Il est constitué d'une gouttière enterrée au niveau de la surface du sol dans laquelle sont captés les flux hydriques. Les flux sont ensuite récupérés dans des bidons partiteurs lesquels se déversent dans des fûts totalisateurs. La collecte se fait avant passage au travers de la bande enherbée et après. Le dispositif comprend deux répétitions. La surface ruisselante, délimitée par des rigoles, est de 75 m de long sur 2 m de large.

La mesure des flux retenus dans les collecteurs en amont et en aval de la bande enherbée (eau et sédiments) permet, par différence, de connaître l'efficacité de celle-ci.

### *Les résultats*

Les observations ne sont faites que sur la culture de tournesol, le ruissellement sur blé en hiver est insignifiant. En place depuis 2000, le dispositif a connu deux cultures de tournesol et une culture de blé.

En 2000, un évènement pluvieux d'une intensité exceptionnelle (130 mm sur deux jours, les 11 et 12 juin), a fait déborder le dispositif. Avant cette date, aucun orage significatif n'a provoqué de ruissellement. Toute exploitation de données chiffrées a donc été impossible.

En 2002, pendant la période à risque il n'y a pas eu d'orages sur le site, et le dispositif n'a pas capté de ruissellement.

Seules, des observations qualitatives réalisées en 2000 ont permis toutefois de porter un jugement sur l'efficacité de la bande enherbée :

- Les rigoles de creusement, nombreuses en amont, s'arrêtent dès le premier mètre de la bande et déposent leurs sédiments,
- En amont de la bande enherbée les récipients de captage étaient pleins de terre sur les deux répétitions, tandis qu'en aval l'eau était juste turbide,
- Sur une grande partie de la bande enherbée, une sédimentation de 5 cm a été mesurée,
- Sous la bande enherbée, quelques incisions réapparaissent après 100 m environ, alors que sur le reste de la parcelle les rigoles continuent de creuser jusqu'en bas du versant avec des dépôts de sédiments .

Même si les aléas climatiques n'ont pas permis d'atteindre les objectifs fixés au départ, ces observations permettent de valider l'efficacité de la bande enherbée pour piéger le flux hydrique et limiter le transfert de sédiments hors de la parcelle. Cette efficacité a déjà été confirmée dans l'aménagement du versant qui a été décrit ci-dessus.

Ce dispositif, mis au point pour capter des ruissellements qui se produisent en hiver, avec des intensités plus faibles, est certainement moins bien adapté dans les conditions d'orages de fortes intensités, tels qu'ils se produisent dans le Lauragais. Néanmoins, il reste en place pour poursuivre les observations, et il permettra peut-être de mesurer de manière plus précise les quantités de flux retenus.

### 3- Les techniques sans labour (TSL)

Les techniques culturales simplifiées sont nombreuses, mais elles ont un point commun qui est le non-retournement d'une bande de terre avec une charrue, comme c'est le cas pour le labour. Désormais, on parle de « Techniques Sans Labour ».

Les itinéraires techniques pratiqués en TSL sont très diversifiés ; en général, ils dépendent du type de sol de l'exploitation, de la culture à implanter, et du type d'exploitation.

On peut classer les TSL en trois grandes catégories :

\* *le semis direct*, qui est une implantation de la culture en un seul passage sans travail du sol ou avec un travail à faible profondeur, soit sur toute la surface, soit uniquement sur la ligne de semis,

\* *le travail superficiel*, qui ne s'intéresse qu'aux dix premiers centimètres : les exploitants réalisent un déchaumage avec des outils à disques ou à dents avant le semis,

\* *le pseudo-labour* : le travail est dans ce cas assez profond, jusqu'à 30 cm et est réalisé par des décompacteurs à lames droites ou courbes et un semis pouvant être en combiné avec une herse rotative.

Des observations réalisées sur quelques exploitations ainsi que des témoignages d'agriculteurs qui ont adopté les TSL font apparaître que le ruissellement érosif a diminué de manière significative.

Afin d'obtenir des références sur les modifications subies par les différents constituants du sol, la démarche consiste à réaliser des observations, des mesures et des analyses sur des parcelles couples *labour/non labour* chez des agriculteurs ayant adopté les TSL. Les variables observées sont : la **matière organique**, l'**activité biologique** (vers de terre et biomasse microbienne), la **stabilité structurale**, le **profil cultural** et les **manifestations du ruissellement de surface**.

Ce travail est conduit en collaboration avec la Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées et l'ITCF. Le réseau est constitué de vingt couples de parcelles répartis dans le bassin central de Midi-Pyrénées. Certains couples sont différenciés depuis plusieurs années, d'autres ont été formés au cours de la campagne 2001/2002. Ces parcelles en couple permettent la comparaison entre le labour et le non-labour. Dix autres parcelles entrent dans le réseau mais ne constituent pas des couples. Elles permettent d'étoffer les résultats des TSL sur la qualité des sols.

Les effets de l'arrêt du labour sur la structure du sol ne sont perceptibles et surtout mesurables qu'au bout de quelques années. De ce fait, les sites mis en place depuis moins de 5 ans ne sont pas en mesure d'être évalués de manière significative, ce qui sera réalisé à échéance. Cependant, une étude des caractéristiques des sols des parcelles en TSL depuis plus de quatre ans a été réalisée. Ce travail a mis en évidence des différences significatives entre des parcelles dont l'itinéraire technique est conduit en techniques sans labour (NL) et des parcelles en labour classique (L).

Ces différences se situent au niveau :

-des analyses physico-chimiques: les taux de matière organique, les valeurs de la capacité d'échange cationique et les taux de certains éléments minéraux (P), augmentent nettement en surface dans les parcelles en TSL,

-des profils culturaux, qui sont plus homogènes et moins compacts avec une structure plus grumeleuse,

-du dénombrement des galeries de vers de terre, qui sont beaucoup plus nombreuses, pour les parcelles en TSL (Tableau 2)

-des analyses de biomasse microbienne dont les valeurs augmentent en surface des parcelles en TSL (Tableau 3)

-des tests de stabilité structurale qui montrent, dans certains cas, une amélioration (Tableau 4)

Ces premiers résultats montrent bien une amélioration de la qualité des sols cultivés par les TSL. Cette amélioration se traduit par une meilleure infiltration de l'eau qui réduit considérablement les dégâts de ruissellement en situation de coteaux, phénomène qui a pu être constaté dans la plupart des situations. Néanmoins, l'ensemble de ces résultats devra être confirmé par une deuxième campagne d'analyses qui s'effectuera dans quatre ans. On pourra alors comparer les résultats entre les différents itinéraires techniques, mais aussi examiner l'évolution de la qualité des sols.

Tableau 2 : Nombre de galeries de vers de terre au m<sup>2</sup> en fonction du travail du sol des couples de parcelles différenciées depuis plus de quatre ans

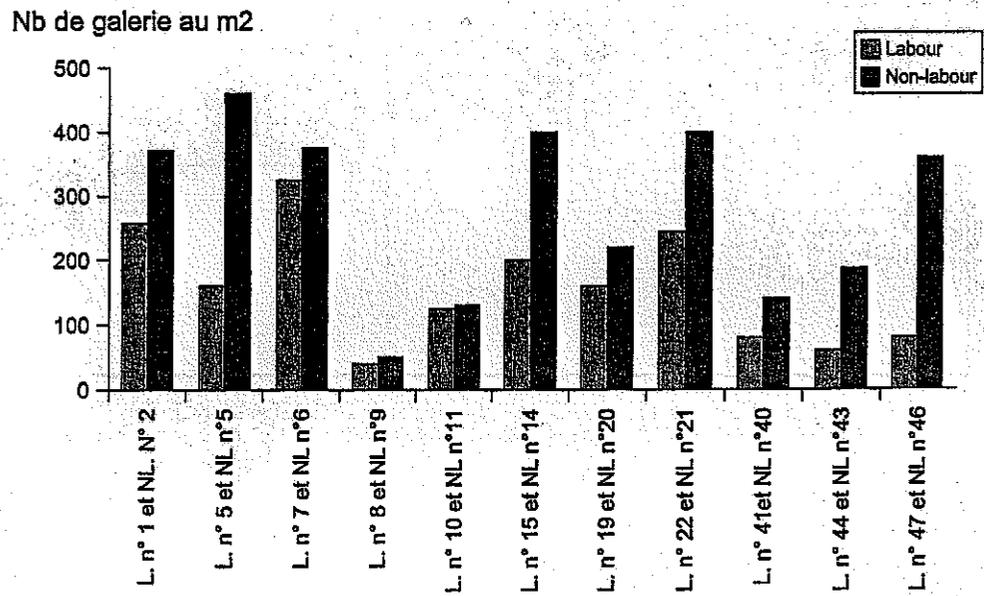


Tableau 3 : Valeurs des biomasses microbiennes de l'ensemble des couples de parcelles différenciées depuis plus de quatre ans

Parcelle N°	Profondeur	Travail du sol	C-b-μ	.g C biomasse / 100g de MO
1	0-20	L	78.6	1.21
2	0-10	NL	87.4	0.95
2	10-20	NL	181.7	2.42
5	0-20	L	163.36	2.33
4	0-10	NL	137.81	1.79
4	10-20	NL	151.33	2.1
9	0-20	L	175.44	1.99
8	0-10	NL	236.7	2.37
8	10-20	NL	217.8	2.27
10	0-20	L	193.12	2.19
11	0-10	NL	140.83	1.1
11	10-20	NL	161.82	1.84
44	0-20	Mab	191.91	1.16
12ou43	0-10	NL	297.22	1.38
12ou43	10-20	NL	191.34	1.16
15	0-20	L	120.15	1.69
14	0-10	NL	193.73	1.93
14	10-20	NL	123.82	1.7
20	0-20	L	156.97	3.02
19	0-10	NL	81.79	1.78
19	10-20	NL	128.34	2.14
22	0-20	L	177.09	1.97
21	0-10	NL	220.87	2.01
21	10-20	NL	166.7	2.16
41	0-20	L	65.21	0.89
40	0-10	NL	84.37	1.07
40	10-20	NL	80.58	1.44

Tableau 4 : Résultats des tests de stabilité structurale en sols argilo-calcaires

Parcelle N°	Travail du sol	Ans NL	Test eau	Test éthanol	Test réhume	Moyenne	M.O%	Argile%
4	NL	4	<b>0,91</b>	1,68	1,06	1,22	1,5	32,4
5	L	0	<b>1,11</b>	1,9	1,36	1,46	1,4	29,3
6	NL	4	<b>1,59</b>	2,73	2,1	2,14	2,4	39,9
7	L	0	<b>1,6</b>	2,48	1,91	2	1,8	39,7
8	NL	5	<b>0,97</b>	2,16	1,55	1,56	2,2	25,3
9	L	0	<b>1,22</b>	1,82	1,56	1,53	1,9	29,6
10	L	0	<b>1,45</b>	2,3	1,88	1,88	1,6	36,2
11	NL	6	<b>2,21</b>	2,91	2,55	2,56	2,8	32,6
14	NL	13	<b>1,03</b>	2,6	1,51	1,71	1,9	27
15	L	0	<b>0,89</b>	1,71	1,13	1,24	1,4	28,1
16	NL	12	<b>1,38</b>	2,32	1,54	1,75	1,6	34,5
17	NL	12	<b>1,02</b>	2,32	1,52	1,62	1,3	27,4
18	NL	9	<b>0,89</b>	1,56	1,53	1,33	1,9	24,6
21	NL	33	<b>1,13</b>	2,32	1,48	1,64	2,3	28,7
22	L	0	<b>0,78</b>	1,91	1,19	1,29	1,7	22,4
23	Mab	10	<b>2,16</b>	2,95	2,46	2,53	1,8	33,8
24	NL	6	<b>1,16</b>	2,03	1,77	1,65	1,6	39,9
27	NL	1	<b>0,9</b>	1,96	1,57	1,48	1,7	29,3
28	L	0	<b>0,81</b>	1,94	1,21	1,32	1,4	28,8
29	NL	7	<b>1,2</b>	2,6	1,81	1,87	1,6	28,5
53	NL		<b>0,81</b>	2,02	1,18	1,33	1,5	35,4

### Partie 3 : Evaluation économique des actions anti-érosives

Du point de vue socio-économique, l'érosion hydrique pose problème car les dégâts érosifs touchent à la fois le domaine privé de l'agriculteur et le domaine non agricole, public ou même privé. Il y a donc génération d'externalités négatives de la part de l'agriculteur vis à vis des autres agents économiques, sous des conditions socio-techniques telles qu'il est pratiquement constamment observé que l'agriculteur, ou un collectif d'agriculteurs créé pour l'occasion en général par des instances non agricoles, ne réagit pas seul face à ces dégâts. L'agriculteur, ou un collectif d'agriculteurs, se fait aider tant sur le plan de la technique anti-érosive que sur le plan financier afin de lutter contre l'érosion. Si de plus l'analyse juridique de la prévention érosive souligne l'importance des interventions publiques dans sa mise en place et laisse ainsi supposer son caractère public, l'analyse des conditions technico-économiques de cette prévention le confirme. En effet, les agriculteurs ne peuvent pas inventer seuls les techniques et pratiques agricoles anti-érosives tellement l'externalité érosive peut être globale, complexe, incertaine et tellement les actions anti-érosives doivent être adaptées pratiquement à chaque parcelle et bassin versant. L'érosion est bien dès lors une externalité que nous assimilons à un bien public indésirable et la prévention érosive à un bien public désirable.

Le modèle économique de la prévention érosive retenu est alors celui d'un modèle de production de bien public et nous considérons une érosion que l'agriculteur seul ne peut pas internaliser. Ce modèle peut s'appliquer tant sur le Lauragais qu'en Pays de Caux, d'autant que, dans le Pays de Caux, la solution anti-érosive concerne nécessairement plusieurs agriculteurs qui ne s'organisent pas spontanément. Le modèle considère l'action anti-érosive, et donc la terre retenue, comme le bien public analysé.

Une aide est donc donnée à tous les acteurs de la lutte anti-érosive et tous agiront, éventuellement dans une structure de regroupement adaptée pour produire ce service environnemental désiré, selon l'état propre à chacune des parcelles, dans le but d'obtenir un gain net social le plus élevé possible.

Cette aide peut être calculée de sorte que l'agriculteur participe, à son niveau, à la lutte anti-érosive de la meilleure façon. La solution cherche donc à diminuer les flux érosifs à la sortie du domaine agricole. Cette démarche suppose un essai de plusieurs solutions techniques et organisationnelles sur chaque parcelle agricole concernée, à partir de tous les gains et coûts recensés et de façon que globalement le flux érosif diminue ou encore que la quantité de terre retenue pour tout le bassin versant, ou le versant, soit optimale. L'efficacité peut être obtenue en testant ces mesures à partir d'un modèle spatialisé de fonctionnement érosif d'un versant ou bassin versant.

Le modèle économique a été présenté dans deux articles (Elyakime, 2000, Elyakime et Bruno, 2000). Nous en rappelons brièvement les bases, ainsi que la vision comptable correspondante de façon à pouvoir en utiliser le principe de décompte des gains et coûts attachés à la lutte contre l'érosion. En supposant le coût de la gestion de l'aide nul, les gains pour toute la collectivité des consommateurs y compris les agriculteurs vus comme consommateurs, gains issus de l'action anti-érosive, sont évalués par différence entre la valeur des dégâts érosifs hors du domaine agricole avant et après aménagement, suite à la remise en état des lieux. Ceux éventuels des agriculteurs considérés et perçus comme producteurs de terre retenue, sont obtenus de la même manière mais sur le domaine agricole. La sommation de ces deux gains est alors à comparer au coût total des actions anti-érosives menées sur les parcelles agricoles. Le décompte donne le bilan global net. Il sera alors possible de comparer différentes solutions anti-érosives. En cas de lutte anti-érosive sur un bassin versant où plusieurs

agriculteurs sont concernés, il faudra considérer gains et coûts de chacun d'entre eux . Le gain pour l'ensemble des consommateurs sera celui obtenu par différence entre les mêmes dégâts érosifs que précédemment, à l'exutoire du bassin versant avant et après l'aménagement anti-érosif. Le bilan global net est obtenu en sommant le gain de l'ensemble des consommateurs à celui des agriculteurs et en retranchant le coût total des actions anti-érosives. La comparaison de différentes solutions anti-érosives devra alors concerner tant l'approche technique qu'organisationnelle qui s'y attache.

Les gains sont donc évalués de manière simple et la condition nécessaire de la maximisation du gain global, somme de celui de tous les agents consommateurs et de celui ou ceux, nets des coûts, de tous les agriculteurs, est qu'il soit positif et le plus grand possible selon la technique anti-érosive utilisée et l'organisation qu'elle suppose entre les agriculteurs concernés .

Selon le modèle d'économie publique que nous utilisons lors de cette approche, l'aide donnée représente alors la totalité du coût de l'action aidée de façon à maintenir l'agriculteur aidé à son ancien niveau de revenu, celui avant toute action, de façon à respecter sa contrainte de participation au projet. Cependant, en général sur les cas observés de lutte anti-érosive aidée, l'aide donnée ne représente pas la totalité des coûts de l'action anti-érosive. Le coût total est donc obtenu en sommant l'aide publique accordée au coût observé de l'agriculteur hors aide et qui lui est laissé à sa charge .

Si l'érosion hydrique des sols agricoles est un phénomène complexe et d'une très grande diversité, celle en Midi-Pyrénées est plutôt spécifique et génère des dégâts chaque année en particulier sur le Lauragais, tant sur les parcelles agricoles des agriculteurs que hors de ces parcelles, sur le domaine public essentiellement. De plus, l'érosion concerne généralement une parcelle indépendamment d'éventuelles autres. Sur le Pays de Caux, l'érosion concerne un bassin versant et intéresse de nombreux agriculteurs qui devront appliquer les techniques anti-érosives nécessaires ainsi donc que le schéma organisationnel sous-jacent.

La mise au point de la technique anti-érosive économiquement intéressante pour la société n'est cependant pas simple à réaliser. Elle suppose aussi la coordination des agriculteurs concernés sur le bassin versant : si un ou plusieurs d'entre eux font défaut il ne sera pas possible d'atteindre l'objectif global de prévention sur le bassin versant. Pour cela, une organisation des agriculteurs est nécessaire. La grande diversité juridique et financière, et donc organisationnelle, des solutions actuelles de gestion collective des actions anti-érosives sur un territoire soumis à l'érosion laisse la possibilité d'objectifs multiples et éventuellement contradictoires entre eux selon la nature de l'organisation créée. Ceci peut alors induire une solution variable selon l'organisation choisie et plus ou moins éloignée de celle nécessaire donnant le gain net social le plus grand. Les questions à la fois de l'organisation la plus adaptée à la lutte contre l'érosion et de celle des modalités du choix anti-érosif se posent donc.

Cette double difficulté est propre à ce territoire et nécessitera du temps avant l'obtention de résultats intéressants. D'ailleurs les premières observations faites sur le terrain ont clairement montré que la plupart du temps ou bien la technique anti-érosive utilisée n'est pas encore bien connue ou bien le nombre d'agriculteurs concernés par les actions anti-érosives proposées n'est pas conséquent. Si il apparaît nécessaire de regrouper, sensibiliser, informer les agriculteurs concernés ou d'autres agents économiques éventuels du bassin versant en cause, gérer, coordonner et contrôler leurs actions est indispensable et difficile.

### 3.1 Un exemple d'évaluation économique des actions anti-érosives dans le Pays de Caux

#### *Présentation du cadre*

Le Pays de Caux présente un grand nombre de lieux où une érosion abondante existe. La cartographie en a été présentée dans la partie 1.1 de ce rapport. Pour cette première approche économique, nous avons recherché des zones où l'érosion génère des conflits entre un nombre restreint d'occupants de la terre. Nous nous sommes donc placé sur des bassins versants élémentaires de petite taille (inférieurs à 200 ha), sur lesquels se trouvent entre 3 et 6 acteurs différents. Le but était d'étudier l'impact économique de l'érosion, mais surtout des aménagements et des moyens préventifs qui existent. Les bassins versants auxquels on s'est intéressé ont tous fait l'objet de projets de lutte anti-érosive.

Dans cette étude nous avons choisi 4 bassins versants répondant à ces critères. Sur chaque bassin, nous avons tenté de réunir toutes les informations nécessaires au modèle économique présenté ci-dessus. Ce qui veut dire que pour chaque acteur concerné sur le bassin versant, on a estimé d'une part les coûts liés à l'érosion et aux aménagements, et d'autre part les bénéfices générés pour les agriculteurs ou la collectivité du fait d'une réduction des dégâts érosifs liée aux aménagements.

#### *Limites de la définition des coûts de l'érosion*

Il est important de définir où s'arrêtent les coûts liés à l'érosion ainsi que les bénéfices tirés d'un aménagement anti-érosif. Par exemple sur l'un des bassins versant étudiés, un agriculteur ne peut pas faire de carottes (culture à forte marge brute) en raison de la sensibilité du sol à l'érosion. On aurait donc pu compter comme un gain lié à un aménagement anti-érosif la possibilité de faire des carottes sur cette parcelle. Toutefois le fait de faire des carottes sur cette parcelle peut s'accompagner de coûts pour l'agriculteur parfois difficiles à chiffrer (agrandissement de bâtiments de stockage, changement éventuel de matériel). De telle sorte que **nous avons préféré rester sur un modèle simple ou ni les assolements ni les successions culturales ne sont modifiés.**

Ce choix méthodologique a une conséquence importante car s'il conduit à considérer une bande enherbée localisée en fond de talweg comme un aménagement ayant un coût lié à sa mise en place et à l'emprise foncière générant une perte de récolte ; il conduit aussi à considérer le maintien d'une prairie traversée par un talweg comme d'un coût nul pour l'agriculteur. Ce dernier point est discutable car l'agriculteur aurait pu choisir de retourner sa prairie pour faire des cultures annuelles qui même avec un talweg érodé auraient peut-être été plus rentables.

#### *Le paramétrage économique*

On cherche à déterminer le coût de l'érosion pour tous les acteurs d'un bassin versant. Pour cela il faut établir pour chaque acteur un coût annuel dû à l'érosion, coût qui variera selon le prix de revient des aménagements, et leur effet sur les dégâts érosifs. Ceci permettra ensuite de calculer un total sur le bassin versant, et de comparer la rentabilité des aménagements envisagés. Pour ce faire, il va falloir traduire les effets économiques de l'érosion en paramètres utilisables pour notre modèle économique.

La formule du coût total annuel pour un acteur privé est :

$$\text{Coût total} = \text{Dégâts érosion} + \text{Coût installation aménagements} + \text{Manque à gagner dû à aménagements} \\ - \text{Aide versée par l'Etat} - \text{Gain de marge dû à aménagements}$$

Du fait de son coût d'installation souvent important, l'intérêt économique d'un aménagement anti-érosifs ne peut se mesurer que sur le long terme. La formule précédente doit donc être mise en

oeuvre sur plusieurs années, et ce pour tous les acteurs d'un bassin versant. Cette formule permet notamment de calculer le nombre d'années nécessaires au retour sur investissement. Pour ce faire, on calculera le gain annuel permis par l'aménagement, et on le rapportera à l'investissement initial.

Pour une année donnée, on a les postes suivants :

#### *Le coût lié aux dégâts érosifs*

Il comprend lui-même plusieurs coûts distincts.

- Le coût en restauration foncière et en dégâts non agricoles

Il s'agit de dépenses ou de pertes qui ne sont pas directement liées aux cultures, mais aux biens immobiliers. On compte ici les travaux de comblements d'une ravine, de remise en état d'un chemin ou de nettoyage d'une route couverte de boue.

- Le manque à gagner et les pertes sur les cultures

On compte dans ce poste la perte en chiffre d'affaire liée à la destruction des cultures. Cette perte est évaluée d'après la surface perdue sur la culture, et le chiffre d'affaire (prime agricole non comprise car versée même si la culture est détruite).

- La perte de temps sur les chantiers

Les dégâts érosifs peuvent entraîner une perte de temps à la récolte, dont le coût dépend aussi de la culture concernée.

#### *Le coût lié aux aménagements*

En présence d'aménagements, plusieurs autres coûts doivent être pris en compte.

- Le prix d'installation de l'aménagement

Il s'agit en général d'une dépense ponctuelle pour le maître d'œuvre.

- Le coût d'entretien de l'aménagement

Il peut être considéré comme un coût moyen annuel. On considère normalement un entretien qui permet de faire durer l'aménagement sans limite de temps. Cela peut signifier que des dépenses ponctuelles importantes seront effectuées. C'est l'expertise technique qui permet de modifier ce coût. Si des pratiques agricoles particulières sont mises en place pour allonger la durée de vie de l'aménagement, leur coût éventuel (perte de temps, de rendement...) peut être compté dans le coût d'entretien.

- Les pertes inhérentes à l'aménagement

L'aménagement, même sans être entretenu, impose des contraintes. Sa présence peut entraîner des gênes lors des chantiers, et donc une perte de temps. S'il occupe une surface qui ne peut plus être cultivée, on compte comme coût la marge brute de la culture sur la surface perdue. Notons que la perte générée par l'emprise d'un aménagement ne s'évalue pas de la même manière que celle générée par l'érosion sur une culture en place. Pour les dégâts sur les cultures, on compte la perte en chiffre d'affaire, puisque l'agriculteur a dépensé l'argent nécessaire à la production, mais n'a pas eu de produit sur sa culture (mis à part les primes sur les cultures qui en bénéficient). Par contre, pour l'emprise des aménagements, l'agriculteur n'a pas de charges opérationnelles sur la surface concernée. La perte est donc seulement la perte de marge. Notons aussi que la surface de l'aménagement pourrait être utilisée comme autre source de revenu (exploitation d'une bande enherbée, aménagement d'un étang de pêche...). Il faudrait alors déduire des pertes la marge brute ainsi obtenue.

- Les aides versées

Dans le modèle initial proposé, on déduisait les aides qu'il fallait verser aux agriculteurs de la différence des gains et des pertes des agriculteurs concernés. Dans les situations étudiées, on a déjà des projets voire des aménagements déjà mis en place, avec des taux de financement prédéfinis. L'idée a donc été de discuter l'intérêt économique des aménagements en l'état pour les différentes parties (agriculteur et collectivité) plutôt que de fixer un nouveau montant d'aide pour les agriculteurs. Notons que dans tous les cas, les aides de la puissance publique ne portent que sur la réalisation des aménagements et pas sur leur entretien qui reste à la charge des propriétaires privés des ouvrages.

Les situations où la puissance publique réalisait des acquisitions foncières pour y implanter des aménagements mais ce cas n'étaient pas présents dans notre échantillon.

Pour calculer la rentabilité économique d'un aménagement, on introduit en outre le gain de marge dû à l'aménagement.

#### *Gain de marge dû à l'aménagement*

- Les gains inhérents à l'aménagement

L'aménagement a pour objectif de réduire les dégâts érosifs chez tel ou tel acteur du bassin versant. Pour évaluer ce gain, il faut faire la différence entre les pertes avant aménagement et après aménagement. On ne dispose pas forcément de toutes ces données. Si l'aménagement n'est pas encore en place ses effets ne sont pas encore observables, il va falloir se contenter d'un travail d'expertise sur la base des calculs de dimensionnement. Si au contraire l'aménagement est déjà réalisé depuis longtemps et qu'on ne connaît plus les dégâts antérieurs, il faudra de même faire une estimation de ces dégâts passés.

Il est important de savoir sur quelle période on va se baser pour calculer les pertes moyennes avant aménagement. En effet, si on se place dans un modèle simplifié, où les coûts annuels sont constants, il suffit de prendre comme référence la dernière année avant l'aménagement. Si au contraire les coûts varient selon les années (notamment en fonction de la culture en place), il sera souhaitable de faire la moyenne des coûts sur une plus longue période, généralement une succession culturale (de l'ordre de 6 ans dans le Pays de Caux) afin d'avoir une valeur plus représentative.

#### *Détermination de l'intérêt économique des aménagements*

L'évaluation de l'intérêt économique des aménagements revient à considérer les postes précédemment présentés : Coût des dégâts, Coût des aménagements et Gain de marge des aménagements.

Le coût des dégâts érosifs est celui d'avant l'aménagement. Il faut en effet bien séparer le coût hors aménagement, et le gain permis par l'aménagement. Deux cas de figure peuvent se présenter :

- Si le gain de marge se révèle négatif, il est évident que l'aménagement ne pourra jamais être rentable. Il s'agit de trouver une solution technique pour améliorer l'efficacité de l'ouvrage, ou diminuer son coût d'entretien. Dans un tel cas, l'aménagement n'aurait pas dû être réalisé, du point de vue économique. Cependant, comme on va le voir, une telle situation peut se produire lorsque les enjeux ne sont pas seulement financiers, mais qu'il en va de la santé publique, ou de la sécurité.

- Si le gain de marge est positif, ce qui devrait être la situation majoritaire, on peut alors chercher en combien de temps l'aménagement peut être rentabilisé. Deux méthodes de calcul sont possibles :

1. Soit on répartit le coût d'installation de l'aménagement sur un nombre d'années  $n$ , et on calcule alors sur ces  $n$  années un coût constant de l'érosion. Il suffit de faire varier  $n$  jusqu'à trouver le nombre d'années minimum pour rentabiliser l'aménagement.

2. Soit on compte le coût d'installation en une seule fois, et on cumule ensuite sur les années suivantes le gain de marge. L'aménagement est rentabilisé lorsque le gain de marge cumulé atteint la valeur du coût d'installation. Cette méthode classique d'établissement d'un échéancier permet d'observer l'effet de l'actualisation sur les coûts d'aménagement.

Pour cet exemple c'est la première méthode qui a été utilisée. La rentabilité de l'aménagement peut être calculée pour le maître d'œuvre, mais aussi pour l'ensemble du bassin versant. En effet une protection située en amont d'un bassin versant a des conséquences sur tout l'aval. En théorie, un aménagement devrait entraîner des coûts pour un seul acteur, mais des gains pour tout le bassin.

Devant la difficulté à obtenir des données chiffrées sur chacun des sites, la démarche a été de chercher à attribuer des valeurs standard raisonnables pour chacune des variables décrites ci-dessus. Le tableau 5 donne les valeurs de chiffre d'affaire (CA) moyen hors aide européenne, la marge brute (MB) moyenne (centre d'économie rurale, 1998), le CA avec les aides européennes (données 1999).

Tableau 5 : Valeurs du chiffre d'affaire moyen et de la marge brute moyenne des différentes cultures

Culture	CA moy	MB moy	notes
Avoine	4 000,00 F	4 000,00 F	CA 6 000 avec aide
Betterave	18 200,00 F	13 600,00 F	
Blé	5 000,00 F	5 600,00 F	CA 7 600 avec aide
Carotte	40 000,00 F	20 000,00 F	
Colza	6 000,00 F	6 300,00 F	CA 8 400 avec aide
Cultures de vente	8 400,00 F	6 300,00 F	
Escourgeon	4 800,00 F	5 100,00 F	CA 7 200 avec aide
Lin	7 000,00 F	9 600,00 F	CA 12 300 avec aide
Orge	4 900,00 F	5 300,00 F	CA 7 400 avec aide
Pois	4 000,00 F	5 800,00 F	CA 7 700 avec aide
Pomme de terre	27 800,00 F	19 700,00 F	
Trèfle	6 000,00 F	4 000,00 F	

Le tableau 6 donne les **coûts unitaires moyens** (cunmoy) pour les opérations les plus fréquentes résultants de dégâts érosifs : comblement de ravine, nettoyage de route et perte de temps sur des chantiers agricoles consécutifs à un redécoupage lié à une ravine ou un aménagement de type bande enherbée ou fossé.

Tableau 6 : coûts unitaires moyens pour les opérations les plus fréquentes résultants de dégâts érosifs

Travail	Cunmoy	Note
Comblement	600,00 F	Prix pour 100 m de ravine : 2h de travail avec une pelle mécanique et une benne. Peut peut-être monter à 1000 F s'il faut plus de temps
Nettoyage	1 000,00 F	Prix pour un nettoyage de route (soit une vingtaine d'heures de travail à la main, soit quelques heures avec une entreprise) Le nombre d'unités est le nombre d'inondations par an.
Perte de temps	1 000,00 F	Coût moyen d'un chantier agricole par heure

#### Exemple d'application

Nous présentons ici un des quatre bassins versants analysés dans le Pays de Caux (d'après Jeantils, 1999). Il s'agit d'un bassin versant de 80 ha exploité par 3 agriculteurs. Deux importantes ravines traversent les parcelles successives des 3 agriculteurs que nous nommerons « 1 », « 2 » et « 3 » de l'aval vers l'amont. Il en résulte une gêne conséquente pour les cultures, et un risque de pollution du captage du village, situé en aval du bassin versant sur la rivière. Un aménagement global du bassin versant a été décidé, avec une canalisation de l'eau par les bandes enherbées, et un ralentissement du ruissellement par des bassins tampons. Toutefois, dans la pratique, l'agriculteur 2 situé à mi-pente a refusé les aménagements sur ses terres, et a même comblé le fossé qui avait été creusé.

Les données

Agriculteur n°1, en aval :

Cet agriculteur a fait l'objet d'une enquête de fonctionnement d'exploitation agricole qui a permis de préciser la durée de la succession de culture (6 ans) ainsi que la proportion de chaque culture dans une succession. Il apparaît que le blé est présent deux années sur six, et que les quatre autres cultures de la succession (lin, pois, betterave et pomme de terre) ne sont présentes chacune qu'une année sur six. Ceci permet de calculer le chiffre d'affaire moyen (CA<sub>moy</sub>) ainsi que la marge brute moyenne (MB<sub>moy</sub>) à partir des données du tableau CULTURES :

$$CA_{moy} = (2*CA_{blé}+CA_{lin}+CA_{pdt}+CA_{pois}+CA_{BS})/6 = 11\ 167\ F/ha/an$$

$$MB_{moy} = (2*MB_{blé}+MB_{lin}+MB_{pdt}+MB_{pois}+MB_{BS})/6 = 9983\ F/ha/an$$

- Dégâts :

Sur la période 1990-1996, on a annuellement formation de 2 ravines de 700 m sur 1 m. Les dégâts sur culture correspondent à une bande de 3 m de large. De fait l'agriculteur refuse de s'approcher à moins d'un mètre de part et d'autre de la ravine pour éviter la casse de son matériel. La surface de culture détruite est donc de  $2*700*3*10^{-4} = 0,42$  ha.

Pour le lin fibre, le ruissellement cause une perte partielle sur une plus grande largeur. Le lin arraché et laissé sur le sol pour le rouissage est déplacé par l'eau ce qui empêche son enroulement correct. Une discussion avec l'agriculteur permet d'estimer à une perte de 50% sur une largeur de 10 m. Dans notre cas on a donc  $700*2*10*10^{-4} = 1,4$  ha endommagé à 50%. Pour les pommes de terre, une bande de 15 m est abandonnée en raison de l'eau stagnante qui risque de favoriser le développement de virus. Donc sur les pommes de terre, perte en réalité de  $700*2*15*10^{-4} = 2,1$  ha. On a également environ 0,25 ha touchés par de la sédimentation, ce qui cause une perte totale pour le lin, betterave, pomme de terre, et 40 % de perte sur le blé, le pois.

A cela s'ajoutent les travaux de comblement (600 F pour 100 m de ravine).

Sur 6 ans en moyenne annuelle les dégâts sont de :

$$[0,42*(2*CA_{blé}+CA_{lin}+CA_{pois}+CA_{BS})+1,4*0,5*CA_{lin}+2,1*CA_{pdt}+0,25*(CA_{lin}+CA_{BS}+CA_{lin})+0,25*0,4*(CA_{blé}+CA_{pois})+6*7*600]/6 = 15832\ F$$

- Aménagements :

En 1997, une mare tampon a été creusée, le talweg a été profilé et une bande enherbée installée. Le total des travaux s'élève à 144 000 F, subventionnés à 80 % par le fond de gestion de l'espace rural (FGER). L'agriculteur a payé 15 %, et un complément en travail avec le matériel de l'exploitation. La surface totale occupée par ces aménagements est de 0,48 ha.

(La bande enherbée : 700 m sur 6 m = 0,42 ha ; Bassin 1 : 0,02 ha ; Bassin 2 : 0,04 ha)

La bande enherbée entraîne une perte de temps lors des travaux agricoles (redécoupage de la parcelle pour le travail du sol et les traitements phytosanitaires), qui peut être estimée à 500 F par an.

Coût des aménagements investissement :  $0,2*144\ 000 = 28\ 800\ F$

Coût annuel emprise foncière (perte marge brute moyenne) :  $0,48*9983\ F = 4\ 792\ F$

Coût annuel perte de temps : **500 F**

Le débroussaillage des mares demande 1 600 F tous les 4 ans, (400F/an) et l'entretien de la bande enherbée aux alentours de 100 F par an.

- Dégâts après aménagements :

Les aménagements ont été techniquement efficaces. Il n'y a plus de dégâts après aménagement réalisé en 1997.

- Gain lié à l'aménagement :

Avec l'hypothèse d'une efficacité totale des aménagements, le gain lié à l'aménagement est de :  $15832-0=15832\ F/an$ . Le coût l'année de la mise en place est de :  $28800+4792+500+500 = 34592\ F$ . Les années suivantes ce coût n'est que de  $4792+500+500=5792\ F$

Année	Gain cumulé	Coût cumulé	Gain cumulé-Coût cumulé
1	15832	34592	-18760
2	31664	40384	-8720
3	47496	46176	1320

Les coûts après aménagement étant nettement inférieurs aux pertes avant aménagement, l'agriculteur rentabilise rapidement son investissement (en 3 ans) et ce d'autant plus qu'il bénéficie d'une aide importante (80 % du coût total).

*Agriculteur n°2, à mi-pente (Non sondé) :*

Il n'a pas été possible de rencontrer cet agriculteur. Les dégâts érosifs ont été estimés à partir des dires de l'agriculteur 1. Pour les calculs économiques nous avons estimé que la succession de culture mise en œuvre par l'agriculteur 2 était la même que celle de l'agriculteur 1. Le blé est considéré être présent deux années sur six, alors que les quatre autres cultures de la succession (lin, pois, betterave et pomme de terre) ne sont présentes chacune qu'une année sur six. Notons que ce choix conduit à maximiser la proportion de cultures à forte marge brute (lin, betterave, pomme de terre), et donc les coûts liés à l'érosion.

- Dégâts

Il se forme des ravines dans les parcelles. Deux ravines de 100 m causent la perte de  $2*3*100*10^{-4}=0,06$  ha sur toutes les cultures, et  $2*10*100*10^{-4}=0,2$  ha endommagés à 50 % en plus pour le lin.

Sur 6 ans en moyenne annuelle le coût des dégâts est de :

$$[0,06*(2*CA_{blé}+CA_{lin}+CA_{pois}+CA_{BS}+CA_{pdt})+0,2*0,5*CA_{lin}+6*600]/6= 1387 \text{ F}$$

- Aménagements

L'agriculteur a refusé d'avoir des aménagements sur sa parcelle. Il a donc un coût nul.

- Dégâts après aménagements

Les aménagements réalisés en amont par l'agriculteur 3 (voir ci-dessous) permettent théoriquement de réduire l'importance de l'érosion chez l'agriculteur 2. Nous avons estimé que la réduction de l'érosion était de moitié, soit  $1387/2=693,5$  F

Le gain lié à l'aménagement amont est donc aussi de 693,5 F par an.

*Agriculteur n°3, en amont (Non sondé)*

Cet agriculteur n'a pas pu être enquêté lui non plus. Sa succession de culture est prise identique à celle de l'agriculteur 1. Les coûts relatifs aux aménagements mis en place ont été obtenus auprès des services du conseil général de Seine-Maritime.

- Dégâts

Il se forme une ravine de 400 m, soit  $400*3*10^{-4}=0,12$  ha perdus sur toutes les cultures, et  $400*10*10^{-4}=0,4$  ha endommagés à 50 % sur le lin.

On ignore s'il y a d'autres coûts, hormis le comblement de la ravine.

Sur 6 ans en moyenne annuelle le coût des dégâts est de :

$$[0,12*(2*CA_{blé}+CA_{lin}+CA_{pois}+CA_{BS}+CA_{pdt})+0,4*0,5*CA_{lin}+6*600]/6= 2773 \text{ F}$$

- Coûts aménagements

La création d'une mare tampon et l'installation d'une bande enherbée ont coûté 40 954 F au total, dont 80 % ont été payés par le fond de gestion de l'espace rural. L'agriculteur a donc payé 8191 F.

La bande enherbée occupe 400 m sur 6 m, soient 0,24 ha, et la mare tampon 0,04 ha, soit un total de 0,28 ha.

- Entretien

Le débroussaillage de la mare coûte 800 F tous les 4 ans. La bande enherbée demande environ 60F d'entretien par an.

Coût des aménagements investissement :  $0,2 \times 40\,954 = 8191$  F

Coût annuel emprise foncière (perte marge brute moyenne) :  $0,28 \times 9983$  F = 2795 F

Coût annuel perte de temps : 260 F

- Dégâts après aménagement

De même que pour l'agriculteur n°1, il n'y a pratiquement plus de dégâts une fois les aménagements en place.

- Gain lié à l'aménagement :

Avec l'hypothèse d'une efficacité totale des aménagements, le gain lié à l'aménagement est de :  $2773 - 0 = 2773$  F/an

Le coût l'année de la mise en place est de :  $8191 + 2795 + 260 = 11246$  F

Les années suivantes ce coût n'est que de  $2795 + 260 = 3055$  F

Pour l'agriculteur 3, le gain lié à l'aménagement (2773) est inférieur aux coûts de l'aménagement.

Malgré l'aide importante du FGER, l'aménagement n'apparaît pas rentable pour l'agriculteur.

### Collectivité

- Dégâts

Les dégâts correspondent la pollution du captage mais aussi à des dépôts de terre sur la route lors des épisodes de ruissellement boueux. On ne connaît pas le coût de ces dégâts pour la collectivité.

- Aménagements

Les fonds publics ont subventionné les travaux sur le bassin versant à hauteur de 148 000 F au travers du Fond de Gestion de l'Espace Rural.

- Entretien

La collectivité ne finance pas l'entretien des ouvrages qui sont la propriété des agriculteurs.

- Dégâts après aménagements

Il n'y a pratiquement plus de problème depuis que les aménagements sont en place.

Sur 10 ans l'investissement en vaut la peine pour peu qu'on ait avant aménagement des dégâts de l'ordre de 15 000 F par an lié à la pollution des eaux du captage et aux dépôts de terre sur la route.

### Conclusion

Cet exemple montre qu'au sein d'un bassin versant on peut avoir des agriculteurs dans des situations radicalement différentes quant à l'intérêt de la mise en place d'un aménagement. L'agriculteur 1 a tout intérêt à faire cet aménagement même sans aides publiques. L'agriculteur 2 a de faibles dégâts annuels et de plus il bénéficie « gratuitement » des aménagements de l'agriculteur 1. Enfin la situation la plus délicate est celle de l'agriculteur 3 qui ne rentabilise pas son aménagement. Concernant l'agriculteur 3, une solution différente de l'aide du FGER aurait pu être envisagée. La solution aurait été que la puissance publique fasse l'acquisition du foncier (déclaration d'utilité publique) afin d'être elle-même propriétaire de l'ouvrage de protection. Cette solution n'est toutefois réellement intéressante que si le domaine public subit de très sérieux dommages.

Les 3 autres bassins versants étudiés sur le Pays de Caux présentaient des situations différentes. Sur deux d'entre eux, les aménagements mis en place n'étaient clairement pas rentables pour la collectivité. La raison en était que l'aménagement des bassins versants n'avait pas été réalisé

totalemment. Ceci aurait aussi pu être le cas de l'exemple présenté plus haut si l'agriculteur 3 n'avait pas accepté de mettre en place son les aménagements préconisés sur sa parcelle. Sur le dernier cas il s'agissait d'évaluer l'intérêt d'un aménagement non encore réalisé. Il permettait de montrer que la mise en jachère d'une parcelle, coûteuse pour l'agriculteur (1900 F/an) permettait à la commune de réaliser un gain (3000 F/an) lui permettant théoriquement de compenser la perte subie par l'agriculteur tout en maintenant un gain par rapport à la situation initiale (3000-1900=2100 F/an).

Les résultats obtenus sur ces quatre bassins versants montrent qu'il devrait être possible de proposer un outil de raisonnement économique de la gestion de l'érosion au sein de petits bassins versants agricoles. En se basant sur des données simples comme les marges brutes, les chiffres d'affaire, les temps et coûts de travaux à mettre en œuvre pour la mise en place et l'entretien des ouvrages, on pourrait discuter de façon interactive avec les intéressés (agriculteurs, privés, puissance publique) de la meilleure solution à adopter. La limite de cet outil serait bien entendu le modèle physique permettant de prévoir l'efficacité des solutions techniques proposées, notamment vis-à-vis de la réduction du ruissellement. Les mesures de ruissellement in situ actuellement en cours devraient toutefois permettre de préciser ce point.

### 3.2 Un exemple de situation érosive sur une parcelle agricole du Lauragais

Il s'agit de l'exemple présenté en 2.1

#### *Coût de l'aménagement de la parcelle*

On assiste à la mise en place dans le cadre d'un contrat de 5 ans de bandes enherbées intégrées dans l'assolement de l'exploitation (elles remplacent une partie du ray-grass). Il n'y a donc pas de manque à gagner à cause d'une diminution de la surface exploitable : les bandes enherbées sont exploitées et fauchées, et servent ainsi à l'alimentation du bétail de l'exploitation. L'agriculteur touche de plus une prime dans le cadre des mesures agri-environnementales, qui s'élève à 2 500 F/ha, soit 2 400 F pour 0,95 ha.

La mise en place des bandes enherbées rapporte donc 2 400 F par an à l'agriculteur. Ceci n'est pas valable pour un exploitant non-éleveur .

La haie arbustive est entièrement financée par le Conseil Général, qui fournit les plants et le plastique. L'agriculteur n'a à sa charge que la plantation et l'entretien de la haie. Pour l'instant, il ne s'agit que d'un coût horaire. L'évaluation de ce coût est basée sur la rémunération horaire du SMIC, soit 42,75 F/h.

Pour la plantation : 10 personnes pendant une demi-journée, soit 4 heures par personne, donc 40 h soit 1 710 F.

Pour l'entretien :

- en 1999, une demi-journée, soit 4 h à 171 F.

- en 2000, une journée, soit 8 h à 342 F.

D'où un total pour 3 ans de 2 223 F. Mais il est impossible pour l'instant de faire une moyenne annuelle car les frais d'entretien vont augmenter avec la croissance des arbustes. Néanmoins, à titre indicatif, les frais d'entretien annuels moyens s'élèvent pour l'instant à :  $(171 + 342)/2 = 256,50$  F.

Afin d'amortir l'investissement que constitue la plantation de la haie, attribuons-lui une durée de vie de 25 ans. On peut alors considérer que la plantation revient à :  $1 710 / 25 = 68,40$  F par an.

L'agriculteur déclare que le temps supplémentaire passé à travailler sur ce versant à cause de la division en parcelles plus petites est compensé par un changement de pratiques culturales (le nombre de passages d'engins lourds est réduit au minimum, le binage et le déchaumage sont supprimés). Par conséquent, le coût horaire serait nul. Etant donné que l'assolement prend en compte la surface des bandes enherbées, il n'y a pas de manque à gagner, donc pas de coût financier.

L'agriculteur a passé deux demi-journées avec le conseiller de la Chambre d'Agriculture pour établir un diagnostic érosion et discuter des mesures envisageables. Pour lui, ce temps pris sur son temps de travail coûte  $8 \times 42,75 = 342$  F. En ce qui concerne le conseiller, cela fait partie de son travail, bien que cette démarche ne soit pas courante pour le moment. Par conséquent, le montage de ce projet d'aménagement fait partie du salaire versé par la collectivité au conseiller agricole, sans frais supplémentaires. On peut considérer, étant donné la longévité probable des aménagements, que ce coût peut être amorti, de la même façon que celui de la plantation de la haie arbustive. Ceci revient à :  $342 / 25 = 13,68$  F par an.

Les initiatives de l'agriculteur ont été importantes :

- Dérivation entre la vigne et la haie d'arbres.

Cette dérivation est une simple rigole, creusée au godet monté sur tracteur, en 2 h.

- tracteur : 4 roues motrices, 120 ch, utilisé 700 h/an, qui revient à 134 F/h ;
- rigoleuse à fraise, utilisée 100 h/an, qui revient à 57 F/h (outil approximant le godet employé, qui n'est pas répertorié dans l'index et est le fruit de "bricolages" d'adaptation divers) ;
- 2 h de temps de travail.

On obtient un total de  $(134 + 57 + 42,75) \times 2 = 467,50$  F.

Etant donné que cette rigole véhicule les eaux provenant de la vigne, on peut supposer qu'elle se comble à la suite des gros orages, et donc qu'il faut la recréer tous les ans. Il ne s'agit donc pas d'un coût ponctuel mais d'un coût annuel.

- Suppression partielle du déchaumage.

20 ha, correspondant aux plus fortes pentes, ne seront pas déchaumés, à partir de cette année. Ceci comprend :

- tracteur revenant à 134 F/h,
- pulvérisateur revenant à 40 F/ha,
- 10 h de temps de travail.

D'où une économie de  $(134 + 42,75) \times 10 + 20 \times 40 = 2\,567,50$  F par an.

Le coût annuel de l'aménagement du versant pour l'agriculteur est de :

$68,40 + 13,68 + 467,50 = 549,58$  F.

Le coût ponctuel de l'aménagement du versant pour la collectivité est celui des arbustes de la haie ainsi que du plastique. On peut également ventiler cette somme de façon à obtenir un coût annuel, en la divisant par 25 et en y ajoutant la prime à l'hectare de bande enherbée.

#### *Coût des dégâts avant aménagement*

- Pour l'agriculteur :

les seuls dégâts réellement chiffrables ont eu lieu à l'occasion de l'orage d'octobre 1997. La perte de 10 % de rendement de ray-grass n'est pas chiffrable car tout le fourrage produit sur l'exploitation est destiné à l'alimentation de son bétail. De plus, il est pour l'instant en excès (des bottes de fourrage des années précédentes n'ont pas encore été consommées). La perte de 20 % de rendement du colza concerne 16,13 ha et s'élève à 700 F/ha, soit 11 291 F. La perte de terre, et donc de fertilité, n'est pas chiffrable mais n'est pas négligeable.

- Pour la collectivité :

La DDE est intervenue en contrebas du versant de l'agriculteur en septembre et en octobre 1997. En septembre 1997, le fossé était à moitié plein sur 200 m, ce qui représente 47,15 m<sup>3</sup> à évacuer, donc un coût de  $47,15 \times 40 = 1\,886$  F. En octobre 1997, le fossé était complètement plein sur toute sa longueur, ce qui représente 330 m<sup>3</sup> à évacuer, donc un coût de  $330 \times 40 = 13\,200$  F.

Si l'on considère que la rotation est de 2 ans (blé dur – tournesol), que les dégâts ont lieu principalement au cours de l'année culturale du tournesol donc un an sur deux, et qu'il n'y a pas eu de

dégâts ni d'interventions de la DDE en 1996, on peut établir une moyenne sur 2 ans du coût des dégâts dus à l'érosion. Cette hypothèse implique également de supposer qu'il y ait un orage érosif par an sur le versant.

Pour l'agriculteur, la perte annuelle moyenne peut être estimée à :  
 $11\ 291/2 = 5\ 645,50$  F.

Pour la collectivité, la perte annuelle moyenne s'élève à :  
 $(1\ 886 + 13\ 200)/2 = 7\ 543$  F.

#### *Coût des dégâts après aménagement*

- Pour l'agriculteur :

Les seuls dégâts chiffrables sur le versant ont eu lieu en septembre 1999. Le labour abîmé a nécessité de repasser le chisel sur 3 ha, mais ce passage supplémentaire a entraîné une forte diminution du nombre d'adventices, d'où une économie, sur ces mêmes 3 ha, du traitement au glyphosate qui devait être fait en janvier, avant le semis du pois.

Passage du chisel : tracteur précédemment employé revenant à 134 F/h, chisel revenant à 28 F/ha, 2 h de travail à 42,75 F/h. D'où un coût de  $(134 + 42,75)*2 + 28*3 = 437,50$  F.

Traitement au glyphosate : tracteur revenant à 134 F/h, pulvérisateur revenant à 42 F/ha, glyphosate à 62 F/l, épandu à raison de 3 l/ha, ½ h de temps de travail. D'où une économie de  $(134 + 42,75)/2 + (62*3 + 42)*3 = 772,40$  F.

Ce qui initialement était un dégât, donc devait entraîner un surcoût, se révèle finalement une économie de  $772,40 - 437,50 = 334,90$  F.

Néanmoins, cette économie est tout à fait fortuite, car l'agriculteur aurait pu choisir d'épandre du glyphosate uniformément sur sa parcelle, sans tenir compte du passage du chisel. Il convient donc de détacher les dégâts érosifs proprement dits des économies de phytosanitaires réalisées ultérieurement. Cette hypothèse nous amène donc à considérer que les dégâts dus à l'orage de septembre 1999 s'élèvent pour l'agriculteur à 437,50 F.

- Pour la collectivité :

Le seul orage ayant entraîné de la terre dans le fossé depuis l'aménagement du versant est celui de septembre 1999, après lequel il a fallu dégager l'équivalent d'un camion de terre du fossé. En considérant qu'un camion ne représente pas plus de 10 m<sup>3</sup>, on obtient un coût de  $10*40 = 400$  F. Ce coût peut paraître négligeable, mais le déblaiement total de la route reste nécessaire en raison des risques d'accident.

De même qu'avant aménagement, on peut établir une moyenne sur 2 ans (1998 et 1999, 1998 étant l'année d'aménagement). En 1998, il n'y a eu aucun dégât, ni pour l'agriculteur, ni pour la collectivité.

Pour l'agriculteur, la perte moyenne annuelle s'élève à  $437,50/2 = 218,75$  F.

Pour la collectivité, la perte moyenne annuelle s'élève à  $400/2 = 200$  F.

#### *Gain pour l'agriculteur*

Le gain de l'agriculteur est représenté par la différence de coût entre avant et après aménagement, moins le coût annuel de l'aménagement.

Le gain moyen annuel correspond à :

$5\ 645,50 - 218,75 - 256,50 + 2\ 400 - 549,58 + 2\ 567,50 = 9\ 588,17$  F.

La limitation de la perte de terre est en elle-même un gain, qui n'est pourtant pas chiffrable, mais qui n'est certainement pas négligeable.

#### *Gain pour la collectivité*

Le gain moyen annuel total de la collectivité est représenté par la différence de coût entre avant et après aménagement, moins le coût annuel de l'aménagement, soit :

$7\ 543 - 200 - 2\ 400(\text{cf. 4}) = 4\ 943$  F.

Dans ce cas particulier, l'aménagement anti-érosion d'un versant entier est très rentable, étant donné d'une part que ce versant possède le plus fort potentiel érosif de tous ceux qui bordent la D18 (donc que la limitation des dégâts entraîne une diminution des coûts immédiate), et d'autre part que l'élevage permet de "rentabiliser" les bandes enherbées. Une bande enherbée implantée sur une exploitation sans élevage revient très cher.

La différence de coût des dégâts produits par les orages avant et après l'aménagement du versant est très parlante : pour l'agriculteur, elle passe de 5 645,50 F à 218,75 F par an, tandis que pour la collectivité, la dépense passe de 7 543 F à 200 F par an. L'économie réalisée grâce aux aménagements installés dépasse largement le coût de cette installation ainsi que celui de son fonctionnement annuel. Le résultat de l'expérience est donc positif, et le bilan global représente un gain total annuel (collectivité et agriculteur producteur) de :

$$9\ 588,17 + 4\ 943 = 14\ 531,17\ \text{F.}$$

Il faut toutefois insister encore sur le fait que la présence d'élevage sur cette exploitation représente depuis plusieurs années une rareté dans le Lauragais, alors qu'elle joue un grand rôle dans l'efficacité économique de ces aménagements. Un agriculteur non-éleveur rentrerait à peine dans ses frais chaque année, le bénéfice de l'aménagement revenant alors en quasi-totalité à la collectivité.

## Conclusion

Nous avons montré, par l'étude de ce cas typique sur le Lauragais, que les parcelles érosives d'exploitations agricoles de grandes cultures exclusivement étaient plus difficilement aménageables, en termes de choix anti-érosifs à adopter et de coûts par rapport aux gains potentiels, que celles mixtes de cultures et élevages. Sur des exploitations de cultures essentiellement, la modification du travail du sol, le redécoupage du parcellaire, la combinaison des cultures d'été et d'hiver sur une même parcelle sont alors essentielles car peu coûteuses tandis que la mise en place de bandes enherbées, plus coûteuses pour l'agriculteur, doivent être réservées à des problèmes importants. La résolution des problèmes érosifs sur des exploitations mixtes d'élevage et cultures se fait par contre à un coût très faible et peut même être avantageuse pour l'agriculteur. Dans tous les cas, il devient indispensable de mieux cerner l'efficacité de ces actions afin de les proposer systématiquement aux agriculteurs.

## Partie 4 : Modélisation et simulation de scénarios d'actions anti-érosives

Dans cette partie du travail nous avons modélisé conjointement le fonctionnement physique et l'évaluation économique d'un certain nombre de scénarios types d'actions anti-érosives pour les deux régions étudiées.

Cela nous a amené à développer des modules érosion pour le modèle STREAM, mis au point à partir de l'ensemble de nos résultats expérimentaux depuis une dizaine d'année, et à utiliser le modèle RUSLE pour le lauragais.

### 4.1 Simulations pour le Pays de Caux

#### 4.1.1 Développement du modèle STREAM

L'objectif recherché à travers le développement de STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management) est l'élaboration d'un modèle de ruissellement et d'érosion qui puissent être utilisés en tant qu'outil d'aide à la décision c'est-à-dire qui puisse fonctionner avec des données d'acquisition relativement facile.

STREAM est un modèle basé sur une approche de type système expert dont les règles de décision sont issues de résultats expérimentaux (terrain et laboratoire) menés sur les sols limoneux de Haute Normandie. Les échelles spatiales et temporelles retenues comme base pour la modélisation sont le bassin versant et l'événement pluvieux. Les différentes fonctions du modèle sont divisées en quatre modules interdépendants qui orientent successivement l'utilisateur vers l'élaboration d'un réseau d'écoulement, puis vers le calcul du volume ruisselé et enfin vers l'estimation des pertes en terre dues à l'érosion diffuse ou à l'érosion concentrée.

#### *Module « Réseau d'écoulement »*

Beaucoup de modèles de ruissellement sont basés uniquement sur l'intensité de la pente du sol. Un exemple est le module GRID du Système d'Information Géographique ARC/INFO qui permet d'établir des modèles de ruissellement topographique standard. A partir de points cotés ou de courbes de niveau, il calcule un modèle numérique d'altitude (MNA) en affectant à chaque cellule de la grille une valeur d'altitude. Le logiciel utilise alors ces valeurs pour calculer la direction des écoulements le long des pentes. Le réseau de circulation des écoulements et d'accumulation des flux est ainsi modélisé. Cependant, pour les parcelles agricoles à relief modéré, on constate sur le terrain que les lignes de partage des eaux sont incertaines et fortement influencées par certains facteurs anthropiques. Ainsi, les contours des bassins versants et le réseau interne de circulation des eaux de ruissellement sont déterminés par des chemins privilégiés de circulation d'eau (dérayures, routes, fossés, etc.) et par le parcellaire puisque ce dernier impose la direction du travail du sol (Ludwig *et al.*, 1995).

Une base de données a été constituée, au cours de deux campagnes de mesures 91-92 et 92-93, sur une vingtaine de bassins versants élémentaires localisés dans le Pays de Caux (Haute Normandie) afin de mettre en évidence la forte relation existant entre la direction d'écoulement du ruissellement et une combinaison des facteurs suivants : la rugosité de la surface du sol, l'intensité de la pente et l'angle entre la direction du travail du sol et la direction de la plus grande pente. A partir d'une analyse statistique de ces observations de terrain, nous avons construit une fonction discriminante qui permet de décider si la direction des flux d'eau est imposée par la pente ou par la direction du travail du sol. Cette fonction a ensuite été intégrée dans le module GRID afin de générer un nouveau réseau de circulation et d'accumulation des flux (Souchère *et al.*, 1998). La figure 11 montre sur un extrait du

réseau de circulation obtenu après application de la règle de décision issue de l'analyse discriminante. On y constate selon les zones que le ruissellement suit soit la direction de la pente soit une direction imposée par le sens du travail du sol sur les parcelles.

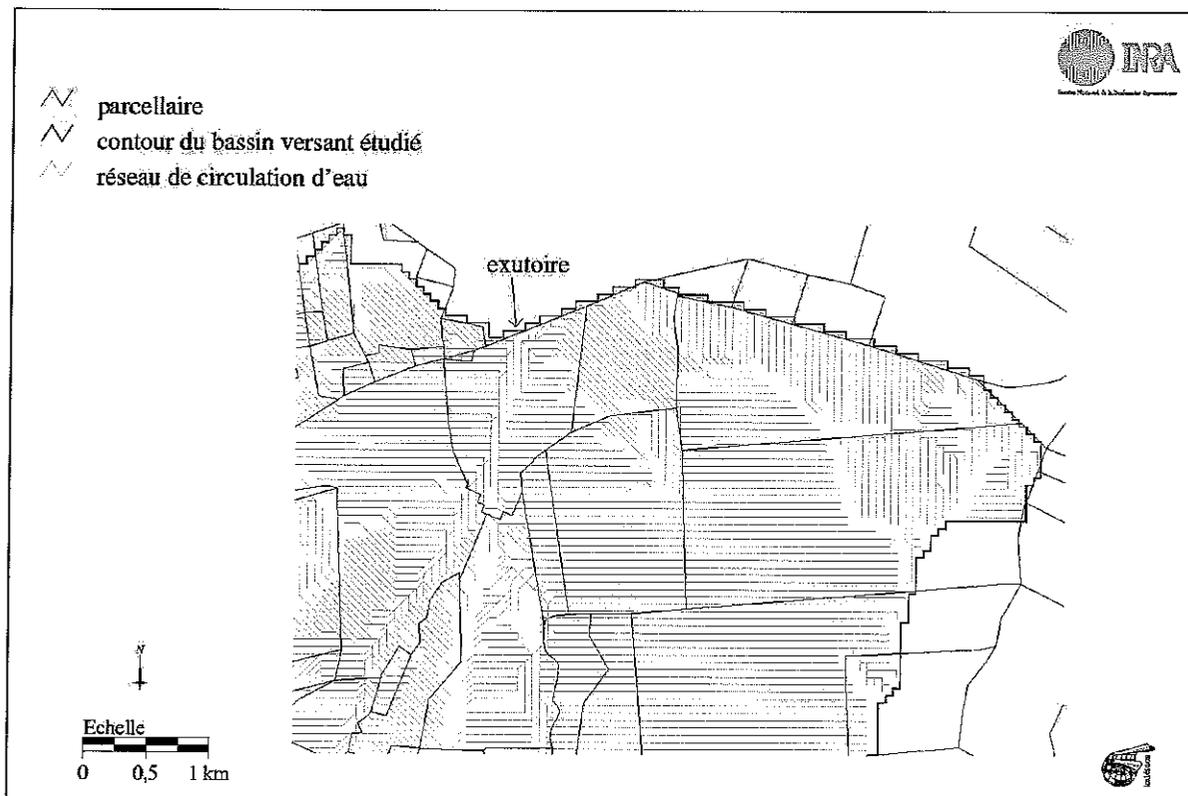


Figure 11 : Réseau de circulation simulée en tenant compte des modifications anthropiques sur le bassin versant de Bourville

#### Module « ruissellement »

Beaucoup de modèles, malgré l'utilisation des connaissances les plus pointues en termes de propriétés hydrauliques des sols, restent peu fiable pour la prédiction des volumes ruisselés suite à un événement pluvieux donné. La principale cause est la difficulté de formaliser la cinétique d'apparition et de développement des croûtes de battance à l'aide des outils mathématiques généralement utilisés dans les modèles de ruissellement. Dans le module infiltration de STREAM, la modélisation des processus sous forme de système expert propose une alternative efficace en termes d'applicabilité. Les processus sont modélisés en ne prenant en compte que les caractères prépondérants (faciès, rugosité et couvert végétal). Ceux ci sont combinés simplement afin d'établir une règle de décision facilement adaptable en fonction des caractéristiques du terrain étudié. Pour réaliser l'intégration de ces paramètres dans la règle de décision, on procède en trois phases.

La première phase consiste à affecter à chaque combinaison de ces trois paramètres et en fonction de leur influence respective une note de sensibilité au ruissellement allant de 1 à 4. La classe 4 représente la combinaison la plus apte à produire un ruissellement (faciès battu, faible rugosité et taux de couvert végétal réduit). Ensuite, une capacité d'infiltration est associée à chaque classe de sensibilité en fonction des résultats de nombreux travaux expérimentaux réalisés en Haute Normandie. Ce sont les valeurs qui figurent dans le tableau 7.

Rugosité	Couvert végétal	Etat de surface						
		Capacité d'infiltration (mm/h)						
		F0	F11	F12	F2			
>10 cm	100	50	50	50	10			
	60			20				
	0			20				
5 - 10 cm	100		50	50		50	10	
	60					20		
	0					20		
2 - 5 cm	100		50	50		20		10
	60					20		
	0					20		
1 - 2 cm	100	20	10	10	5			
	60			10				
	0			10				
<1 cm	100	20	10	5		2		
	60			5				
	0			5				

Tableau 7: Capacité d'infiltration (mm/h) en fonction des paramètres facies, rugosité et couvert végétal.

La deuxième phase consiste à caractériser l'état hydrique initial. En effet, le choix de travailler au pas de temps de l'événement et non en continu implique la nécessité de caractériser l'état hydrique du sol au début de l'événement car il détermine la pluie d'imbibition c'est-à-dire la hauteur d'eau infiltrée avant d'atteindre le régime d'infiltration stationnaire. Cette hauteur de pluie d'imbibition est calculée à partir d'une combinaison entre la hauteur de pluie des 48 heures précédant l'événement modélisé et la classe d'aptitude relative au ruissellement (Tableau 8).

Pi (mm)	P48	0 mm	1-15 mm	16-40 mm	>40 mm
Inf					
50 mm/h		20	15	12	8
20 mm/h		15	12	8	5
10 mm/h		12	8	5	2
5 mm/h		8	5	2	1
2 mm/h		5	2	1	0

Tableau 8 : Hauteurs de pluie d'imbibition (Pi en mm) en fonction de la capacité d'infiltration (Inf) et de la pluie antécédente (P48)

La troisième phase permet de calculer pour un événement donné, la hauteur d'eau infiltrée en tout point de la surface modélisée. Pour cela, on multiplie la capacité d'infiltration par la durée de l'événement. On soustrait ensuite à cette valeur la pluie d'imbibition et on ajoute la hauteur d'eau tombée pendant l'événement. On obtient finalement une valeur bilan Infiltration/Ruissellement qui indique si la parcelle était ruisselante (cas où la valeur est positive) ou au contraire si en plus d'infiltrer la hauteur de pluie tombée, elle a la capacité d'infiltrer une partie ou la totalité d'un éventuel ruissellement amont (cas où la valeur bilan est négative).

Ensuite, pour calculer les volumes ruisselés en tout point du bassin versant, nous avons programmé sous ARC/INFO un algorithme dont la particularité est de pondérer l'accumulation de l'excès d'eau de surface provenant de l'amont par des zones potentielles d'infiltration. Il nécessite trois grilles d'entrée :

- Une grille de direction de flux,
- Une grille d'accumulation des flux,
- Une grille de poids.

Les deux premières grilles sont issues du module « Réseau d'écoulement ». Elles servent de référence pour pouvoir respecter l'ordre de déplacement d'une cellule à une autre en tenant compte de la topographie mais aussi des modifications induites par les activités anthropiques. La dernière grille contient les valeurs du bilan Infiltration/Ruissellement.

Le couplage de règles expertes avec un SIG a ainsi permis de produire un modèle d'aide à la décision dans le cadre de systèmes complexes concernés par la dimension spatiale de la distribution des phénomènes.

*Module « érosion diffuse »*

Par rapport, aux facteurs déjà présent dans les autres modules, pour évaluer la concentration potentielle en sédiment, un facteur supplémentaire a été ajouté : **l'intensité maximale à 6 min de pluie**. Des classes de concentration potentielle en sédiment, correspondant aux combinaisons des facteurs ont aussi été définies (Tableau 9). Cependant, les résultats expérimentaux montrant plus de variabilité que pour l'infiltration, ce sont des gammes de concentration potentielle en sédiment (et non des valeurs uniques) qui ont été assignées aux différentes situations. Les valeurs s'étalent de 0-1 g/l, pour des sols dégradés avec un couvert végétal développé et pour des pluies d'intensité maximale à 6 min inférieure à 10 mm/h, à 25-35 g/l pour des sols nus motteux soumis à des pluies d'intensité maximale à 6 min supérieure à 40 mm/h (Cerdan et al, 2002a, 2002b).

Rugosité (cm)	Couvert végétal	Intensité max 6-min	Non battu	Croûte structural	Croûte intermédiaire	Croûte sédimentaire
0-1	0-20%	0-10 mm/h	0-1	1-5	0-1	1-5
		10-40 mm/h	0-1	5-10	1-5	5-10
>40 mm/h		1-5	10-15	5-10	10-15	
	21-100%	0-10 mm/h	0-1	0-1	0-1	0-1
		10-40 mm/h	0-1	1-5	0-1	1-5
>40 mm/h		1-5	5-10	1-5	5-10	
2-5	0-20%	0-10 mm/h	<b>0-1</b>	<b>0-1</b>	<b>0-1</b>	<b>0-1</b>
		10-40 mm/h	<b>1-5</b>	<b>10-15</b>	<b>5-10</b>	<b>10-15</b>
>40 mm/h		<b>5-10</b>	15-25	10-15	15-25	
	21-100%	0-10 mm/h	0-1	1-5	<b>0-1</b>	1-5
		10-40 mm/h	0-1	5-10	1-5	5-10
>40 mm/h		1-5	10-15	5-10	10-15	
5-10	0-20%	0-10 mm/h	1-5	5-10	5-10	10-15
		10-40 mm/h	5-10	10-15	10-15	15-25
>40 mm/h		10-15	<b>25-35</b>	<b>15-25</b>	<b>25-35</b>	
	21-100%	0-10 mm/h	0-1	5-10	1-5	5-10
		10-40 mm/h	1-5	10-15	5-10	10-15
>40 mm/h		5-10	<b>15-25</b>	10-15	<b>15-25</b>	
> 10	0-20%	0-10 mm/h	1-5	10-15	<b>5-10</b>	10-15
		10-40 mm/h	5-10	15-25	<b>10-15</b>	<b>15-25</b>
>40 mm/h		10-15	25-35	<b>25-35</b>	25-35	
	21-100%	0-10 mm/h	1-5	5-10	5-10	10-15
		10-40 mm/h	5-10	10-15	10-15	15-25
>40 mm/h		10-15	25-35	15-25	25-35	

Tableau 9 : Fourchettes de concentration potentielle en sédiment (g/l) dans le ruissellement. Les valeurs en gras sont directement déterminées sur la base de références expérimentales (Cerdan et al. 2002a), les autres sont extrapolées à l'aide d'une méthode basée sur la logique floue.

Cette classification de combinaisons de facteurs sous forme de tableaux de décision à entrées multiples a donc permis de caractériser des situations en fonction de leur sensibilité à l'érosion diffuse. Ces tableaux représentent la formalisation de résultats expérimentaux pour la plupart obtenus en conditions naturelles.

Les tableaux de décision caractérisent les processus à l'échelle de la parcelle. Ces évaluations sont reprises pour établir la modélisation à l'échelle du bassin versant. Les sédiments sont transportés proportionnellement aux volumes ruisselés.

Deux cas sont considérés, selon que le pixel simulé correspond, à une surface qui a le potentiel d'infiltrer une partie ou la totalité du ruissellement amont, ou à une surface produisant du ruissellement (Cerdan et al., 2002b) :

I- si  $(R - It)a < 0$ , pour un pixel  $\alpha$  avec  $i$  pixels amont alors,

$$md_{\alpha} = \sum mu_i + \frac{(R - I_{\alpha}t)a \sum mu_i}{\sum Vu_i}, \text{ avec } md_{\alpha} = \text{masse de sédiment quittant le pixel } \alpha, mu_i = \text{masse de sédiment provenant des pixel amont, } Vu_i = \text{volume ruisselé provenant du pixel amont, } R = \text{hauteur de la pluie, } I_{\alpha} = \text{capacité d'infiltration du pixel } \alpha, t = \text{durée de la pluie, } a = \text{surface du pixel.}$$

II- si  $(R - It)a \geq 0$ , pour un pixel  $\alpha$  ayant  $i$  pixels amont, alors

$$md_{\alpha} = \sum mu_i + (R - I_{\alpha}t)aSC_{\alpha}, \text{ avec } SC_{\alpha} = \text{concentration potentiel en sédiment du pixel } \alpha.$$

Les particules sont déposées en fonction de variations dans la topographie (convexité verticale, intensité de la pente) ou de variations dans le couvert végétal. Des seuils de concentration maximale en sédiment, au-dessus desquels la masse de sédiment correspondant à l'excédent est déposée ont été définis expérimentalement. Pour les dépôts induits par le couvert végétal, une distinction a été établie entre les couvertures pérennes (prairies permanentes) et les plantations à couvert végétal développé (Cerdan et al., 2002b). Un exemple de sortie standard de ce module est présentée sur la figure 12.

Une première évaluation de ce module d'érosion diffuse à l'aide de données provenant d'un bassin versant expérimental, a démontré la capacité de cette approche à reproduire les valeurs observées avec satisfaction (Cerdan et al., 2002b).

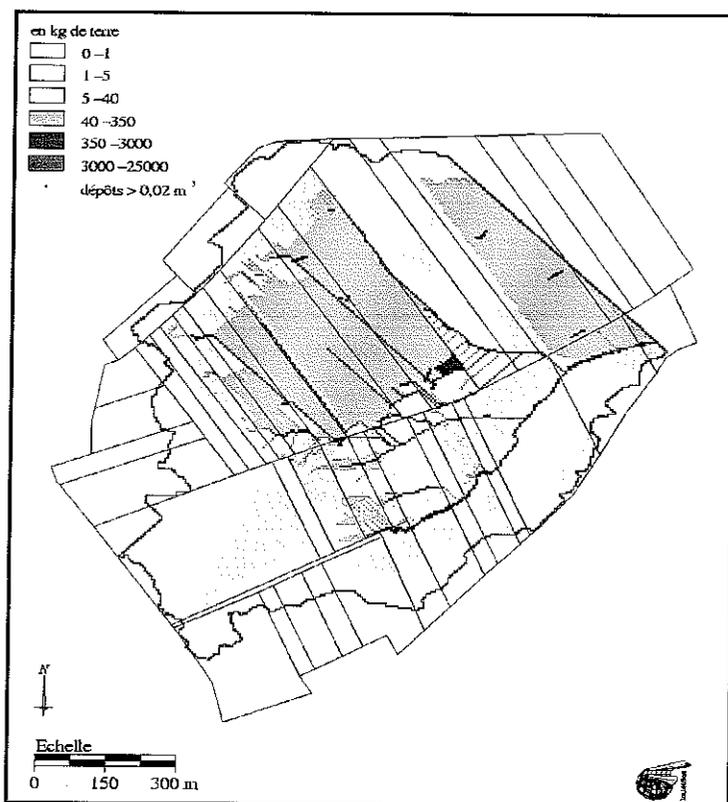


Figure 12 : Carte de l'érosion diffuse du bassin versant de Blossenville pour l'événement pluvieux du 26 octobre 1994

Module « érosion concentrée »

L'érosion par ruissellement concentrée se produit là où le débit du ruissellement excède la vitesse critique pour l'initiation d'une ravine. Par conséquent, la première étape suivie a consisté à chercher à caractériser d'une part le débit du ruissellement et d'autre part la vitesse critique pour l'initiation d'une ravine à partir d'informations aisément accessibles.

- Estimation du débit

Comme le suivi en continue du débit du ruissellement n'est pas possible en tout point d'un bassin versant, nous avons cherché à l'estimer à partir d'observation au champs. En effet, le débit du ruissellement dépend du volume ruisselé et de sa vitesse. Le volume ruisselé peut être facilement obtenu puisque c'est la sortie du module « infiltration » de STREAM. En ce qui concerne la vitesse du ruissellement, nous avons utilisé deux facteurs pour l'évaluer : l'intensité de la pente avec 4 classes distinguées limité par les seuils de 2, 4 et 8% et un facteur appelé FRICTION traduisant l'influence de la surface du sol sur la vitesse du ruissellement. Ce facteur est estimé à partir d'une règle de décision combinant trois principaux paramètres (nature de l'occupation du sol, taux de couvert végétal et rugosité). Les tableaux 11 et 12 précisent les valeurs attribuées à ce paramètre en appliquant les équations suivantes :

$$\text{Type d'occupation du sol} + \text{couvert végétal} = \text{CS}$$

$$\boxed{\text{CS} + \text{rugosité} = \text{FRICTION}}$$

Occupations du sol	Couvert végétal	CS	AR
<u>Semis en lignes à interrangs faibles (IRF)</u> (blé, escourgeon, colza, avoine, moutarde, choux, seigle, orge, fève, lin, pois) + labour et déchaumage	0- 20 %	1	1
	21 -60 %	2	1
	61 - 100 %	3	2
<u>Semis en lignes à interrangs larges (IRL)</u> (maïs, betterave, pommes de terre)	0- 20 %	1	1
	21 -60 %	2	1
	61 - 100 %	3	2
<u>Semis à la volée</u> (Prairies permanentes, trèfle, friche) + gel, vergers	0- 20 %	2	2
	21 -60 %	4	4
	61 - 100 %	5	5
<u>Chantiers de récolte (récoltes arrachées)</u> (lin, pomme de terre, betterave...)	0- 20 %	1	1
	21 -60 %	1	1
	61 - 100 %	2	2
<u>Chantiers de récolte (récoltes coupées)</u> (maïs, pois, colza, blé...) + orge de printemps	0- 20 %	1	3
	21 -60 %	3	3
	61 - 100 %	4	4

Tableau 11 : définition des valeurs de coefficients pour « AR » et « CS »

	FRICTION				
CS	R0	R1	R2	R3	R4
1	5	5	4	3	2
2	5	4	3	2	1
3	4	3	2	1	1
4	3	2	1	1	1
5	2	1	1	1	1

Tableau 12 : table des coefficients pour le facteur « friction »

Au cours de la saison, les facteurs évoluent. Le couvert végétal part d'un stade peu développé jusqu'à très développé. Le facteur « CS » suit cette évolution en allant de la valeur la moins importante (1) jusqu'à la valeur maximale (5).

- Estimation de la vitesse critique d'incision

Pour déterminer la vitesse critique d'incision, nous avons utilisé un facteur appelé COHESION estimé à partir d'une deuxième règle de décision prenant en considération trois paramètres : la nature de l'occupation du sol, le taux de couvert végétal et le stade de dégradation de la surface du sol. Les deux premiers paramètres sont introduits pour prendre en compte l'effet de la densité racinaire et de la compaction de la surface du sol. Le dernier paramètre sert à prendre en compte l'augmentation de la résistance du sol à l'incision lorsqu'il est compacté sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie. Les tableaux 13 et 14 précisent les valeurs attribuées à ce facteur en appliquant les équations suivantes :

$$\text{Type d'occupation du sol} + \text{couvert végétal} = \text{AR}$$

$$\boxed{\text{AR} + \text{faciès} = \text{COHESION}}$$

	COHESION			
AR	F0	F11	F12	F2
1	5	5	4	3
2	5	5	4	3
3	5	4	3	2
4	4	3	2	1
5	3	2	1	1

Tableau 13 : table des coefficients pour le facteur « cohésion »

De la même façon que le facteur « friction », le facteur « COHESION » évolue lui aussi au cours de la saison culturale selon la flèche qui est superposée sur le tableau 6. On constate ainsi que l'influence positive sur la résistance du sol diminue lorsque les valeurs assignées au facteur « COHESION » augmentent.

- Calcul de la sensibilité à l'érosion concentrée pour un événement pluvieux

La sensibilité à l'érosion concentrée pour un évènement pluvieux donné est finalement calculé en chaque point (ou pixel) du bassin versant en utilisant la formule suivante :

$$\text{Valeur de sensibilité à l'érosion} = \text{facteur pente} \times \text{volume d'eau ruisselé} \times \text{facteur friction} \times \text{facteur cohésion}$$

où les valeurs des facteurs pente, friction et cohésion sont issus des tableaux 10, 11, 12 et 13 tandis que le volume ruisselé est celui calculé par le module « infiltration » de STREAM.

Un travail de calage à partir des relevés (campagne culturale 91-92) de la gravité et de la localisation des marques d'érosion observées sur le terrain au sein de 4 bassins versants du Pays de Caux a ensuite été effectué afin de déterminer d'une part 6 classes de sensibilité à l'érosion concentrée et de leur affecter d'autre part une section d'incision moyenne (Tableau 14).

	Bornes inférieures	Bornes supérieures	Section de la rigole (m <sup>2</sup> )
Classe 1	0	2000	0
Classe 2	2001	13000	0 – 0,1
Classe 3	13001	57000	0,1 – 0,2
Classe 4	57001	100000	0,2 – 0,3
Classe 5	100001	250000	0,3 – 0,5
Classe 6	250001	Valeur maximale de la grille	> 0,5

Tableau 14 : définition des six classes d'érosion selon la valeur des pixels

#### 4.1.2 Simulation de scénarios

La mise en œuvre de mesures anti-érosives représente un coût non négligeable que ce soit pour les agriculteurs ou les collectivités locales. Il est donc indispensable d'identifier les combinaisons de mesures adaptées à chaque type de situations érosives. Les efforts de modélisation effectués au cours de ce projet nous permette maintenant de disposer d'un modèle de ruissellement et d'érosion (STREAM) bien adapté pour estimer l'évolution des pertes en terre en présence de différents aménagements. L'utilisation combinée de STREAM et du modèle économique présenté dans la partie 3 nous permet d'obtenir rapidement une évaluation économique des différentes scénarios testés. Cependant, pour utiliser conjointement ces deux modèles, nous avons du faire un certain nombre d'hypothèses liées à la difficulté d'obtenir toutes les données nécessaires à partir des seules bases de données en notre possession actuellement. Par ailleurs, l'idée n'est pas ici de reproduire une situation réelle mais plutôt de monter les potentialités futures de l'utilisation combinée des deux modèles. Ceci nous a conduit à effectuer quelques simplifications d'autant plus que ces deux modèles doivent bénéficier encore d'un certain nombre d'améliorations avant de pouvoir être utilisé en routine.

#### Hypothèses

Les deux modèles fonctionnent à l'échelle du bassin versant qui est l'échelle pertinente pour raisonner la maîtrise des problèmes érosifs. Parmi les bassins versants suivis par l'INRA pendant plusieurs années, nous avons donc sélectionné le bassin de Blosseville, localisé à l'Est de Saint-Valéry-en-Caux. Ce bassin de 94 ha est en effet d'une taille comparable à celle des bassins versants utilisés pour tester le modèle économique avec des données issues du Pays de Caux. Par ailleurs, les données économiques nécessaires au fonctionnement du modèle ont été recueillies en 1999. Or, cette même année, ce bassin a subi des dégâts relativement importants qui ont pu être quantifiés par un suivi sur le terrain et modéliser par STREAM.

Le modèle économique nous impose également d'identifier les dégâts supportés par chaque acteur (agriculteur, collectivité, particulier, etc.) sur toute la durée d'une succession culturale. En 1999, les

surfaces agricoles du bassin versant étaient exploitées par 9 agriculteurs. Pour simplifier les simulations, nous n'avons gardé que 3 agriculteurs. L'affectation des parcelles à chaque agriculteur est par conséquent précisée sur la Figure 13. De plus, nous avons choisi d'affecter la même succession de culture aux trois agriculteurs en nous basant d'une part sur les cultures présentes en 1999 dans le bassin (Figure 14) et d'autre part sur notre connaissance des successions cultures pratiquées dans la région. La succession retenue est une succession sur 6 ans comprenant successivement :

Blé – Lin – Betterave à sucre – Blé – Escourgeon – Pois.

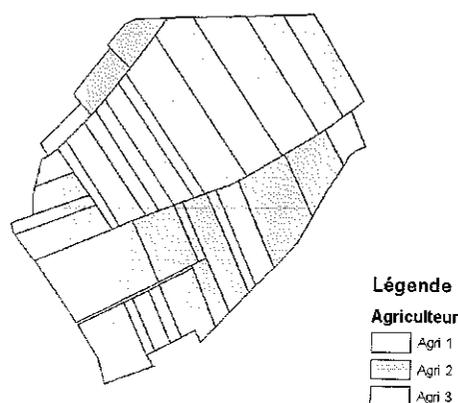


Figure 13 : Répartition des parcelles entre les trois agriculteurs théoriques

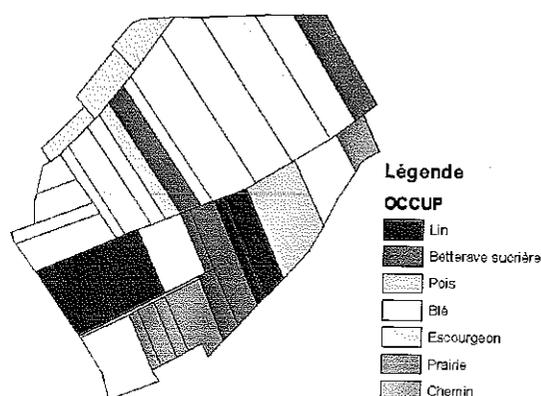


Figure 14 : Occupation du sol en 1999

L'utilisation du modèle STREAM nous impose également quelques contraintes puisque le ruissellement et les pertes en terre sont estimées pour un événement pluvieux donnée. Le tableau 15 présente donc les caractéristiques des deux événements choisis pour réaliser les simulations. Ces événements ont été sélectionné parmi l'ensemble des événements pluvieux disponibles dans la base de données obtenues à partir des mesures météorologiques effectués sur les bassins versants suivis par l'INRA. Le premier correspond à l'événement pluvieux qui a généré les ravines dont la présence a été constatée sur le terrain en décembre 99. Le deuxième, moins intense, a été choisi car il est susceptible de générer des problèmes d'érosion diffuse sans pour autant occasionner des problèmes érosion concentrée. C'est en effet, ce qui est le plus souvent observé sur le terrain. Ensuite, pour utiliser le modèle économique, nous avons du affecter à ces événements, une fréquence d'apparition au cours des 6 ans de la succession culturelle choisie. Pour l'événement 1, nous avons fait l'hypothèse qu'il ne pouvait ne produire qu'une fois tous les 6 ans ce qui représente à peu près la fréquence d'apparition des ravines constatées sur le terrain lors de la période de suivi de ce bassin (1991-2000). Par contre, le deuxième événement est beaucoup plus fréquent. Nous avons estimé qu'il était susceptible de ce produire 4 fois par an, soit 24 fois au cours des 6 ans de la succession.

Evènements Pluvieux	Pluie (mm)	Durée (h)	Pluies des 48H avant l'événement (mm)	Intensité maximale 6 min (mm/h)	Fréquence succession
1	31.6	6.66	45	55.4	1
2	20	6	40	20	24

Tableau 15 : Caractéristique des évènements pluvieux utilisés

### Evaluation économique des scénarios testés

Pour essayer de diminuer les pertes en terre, nous avons testé avec STREAM l'efficacité de deux scénarios d'aménagement et calculé leur rentabilité grâce au modèle économique en utilisant les coûts décrits dans la partie 3. La figure 15 montre la localisation des aménagements pour chaque scénario testé. Le premier scénario consiste en l'implantation de bandes enherbées de 20 mètres de

large dans les fourrières de certaines parcelles de l'Agriculteur 1. Le deuxième scénario qui concerne les trois agriculteurs repose sur un enherbement partiel du talweg avec une bande d'herbe de 20 de large également.

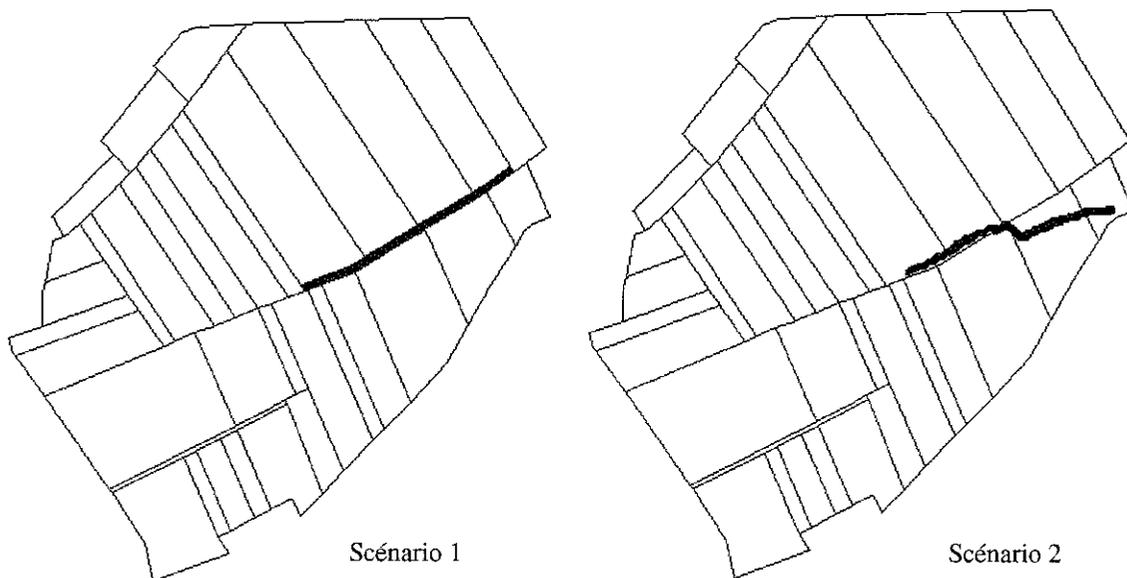


Figure 15 : Localisation des zones enherbées pour chaque scénario

#### Estimation du coût des dégâts en l'absence d'aménagement

Avant de pouvoir faire l'évaluation économique des différents scénarios testés, il faut dans un premier temps estimer le coût des dégâts en l'absence d'aménagement. Ceci a été réalisée à partir des suivis de terrain (Figure 16) et en utilisant également les estimations issues du modèle STREAM. En fonction des hypothèses initiales, les dégâts ont été calculés pour chacun des 3 agriculteurs théoriques ainsi que pour la collectivité locale et ceci sur l'ensemble des 6 ans de la succession.

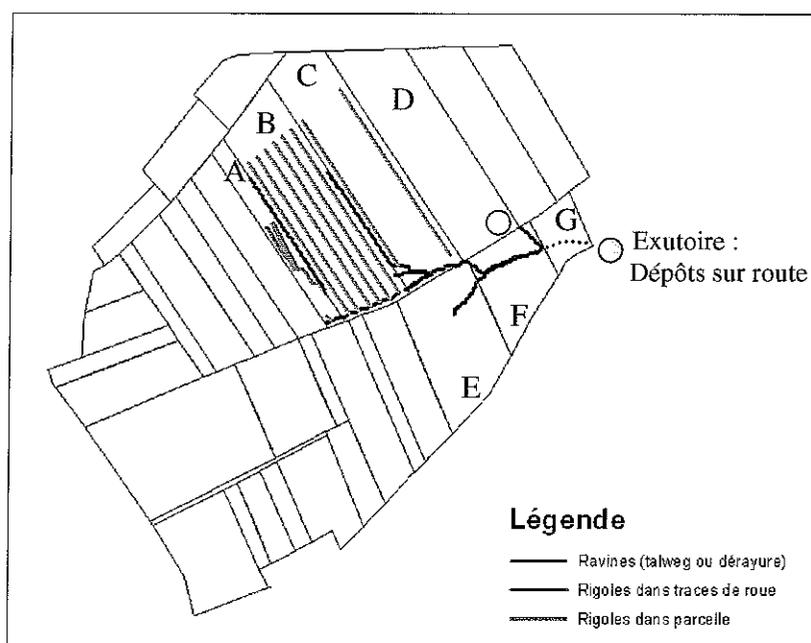


Figure 16 : Localisation des dégâts en décembre 1999

Cas de l'agriculteur 1 :

La figure 16 permet de constater que seulement 4 parcelles (A, B, C et D) attribuées à cet agriculteur sont plus ou moins concernées par des problèmes érosifs. Cependant nous n'avons pas considéré que tous ces problèmes entraînaient des pertes pour l'agriculteur 1. C'est le cas par exemple des petites rigoles dans les traces de roues de traitements. En effet, même sans rigoles, les traces de roues auraient de toute façon empêcher le développement de la végétation. On ne peut donc pas comptabiliser une perte de culture liée à la présence de ces rigoles. De plus, ces rigoles sont orientées dans le sens du travail du sol. Elles n'obligent donc pas l'agriculteur à perdre du temps en les contournant, ni à les combler avant de récolter sa production. Les dégâts supportés par cet agriculteurs (Tableau 16) ne concernent donc que les rigoles au sein des parcelles et les ravines dans les talwegs.

Perte de culture par :	Surface (ha)	Coût rotation	Coût annuel
Rigoles & ravines	0.102	4 063.25 F	677.21 F
Dépôts	0.0625		

Contraintes d'exploitation	Longueur	Coût rotation	Coût annuel
Comblement des ravines	499 m	2 994.00 F	2 994.00 F

Tableau 16 : Coûts des dégâts supportés par l'agriculteur 1

Cas de l'agriculteur 2 :

La figure 4 montre que 2 parcelles seulement (E et F) de cet agriculteur subissent des dégâts érosifs sous la forme de ravines localisées sur des axes de concentration du ruissellement (talweg). Le tableau 17 résume la nature des dégâts et les coûts supportés par cet agriculteur. Bien que la longueur de ravines à combler soit moins importante que pour l'agriculteur 1, le coût calculé est presque aussi important. En effet, nous avons pris en compte la plus grande profondeur des ravines dans les parcelles E et F et choisi d'appliquer un coût unitaire moyen plus élevé pour ce deuxième agriculteur (1000 F/ 100 m au lieu des 600 F/ 100 m appliqués à l'agriculteur 1).

Perte de culture par :	Surface (ha)	Coût rotation	Coût annuel
Rigoles & ravines	0.045	752.00 F	125.33 F

Contraintes d'exploitation	Longueur	Coût rotation	Coût annuel
Comblement des ravines	285 m	2 850 F	2 850 F

Tableau 17 : Coûts des dégâts supportés par l'agriculteur 2

Cas de l'agriculteur 3 :

La figure 16 permet de constater que cet agriculteur ne subit aucun dégât sur ces parcelles. Seule la parcelle G est traversée par le ruissellement érosif produit en amont (ligne pointillée rouge). Ce passage d'eau ne génère cependant plus aucun dégât depuis que l'agriculteur a remis en herbe cette parcelle. Comme cette modification est antérieure à 1999, nous n'avons pas intégrée dans les simulations avec le modèle économique, son coût d'implantation ni le manque à gagner lié au remplacement des cultures de vente de la succession par une prairie.

Cas de la commune :

La figure 16 montre qu'à l'exutoire du bassin il y a un problème de dépôt de sédiment sur la route communale qui longe le bassin, au sud. Pour estimer les dégâts sur cette route, nous avons utilisé les valeurs de pertes en terre calculées par les deux modules érosions de STREAM (tableau 18).

Evènement pluvioux	Volume ruisselé (m <sup>3</sup> )	Erosion diffuse (T)	Erosion concentrée (T)	Total érosion	
				T	T/ha
1	10 003.6	50.017	782.09	832.107	8.81
2	3 493.6	17.466	0	17.466	0.19

Tableau 18 : Dégâts à l'exutoire du bassin de Bourville selon l'évènement pluvioux

Compte tenu des hypothèses sur les délais de retour des évènements pluvioux utilisés (Tableau 15), les pertes annuelle par érosion diffuse sont estimées à environ 70 tonnes (4 épisodes à 17.466 T) auxquelles s'ajoute 832 tonnes l'année où se produit l'évènement le plus catastrophique. Le coût d'élimination des dépôts sur la route est d'environ 40 F/T à la charge de la commune. In fine, les coûts pour l'ensemble des acteurs du bassin versant dépassent les 60 000 F (Tableau 19) pour la période 1999-2004 correspondant aux 6 ans de la succession culturale. Ils sont supportés à plus de 82 % par la commune qui à elle seule dépense un peu plus de 50 000 F

Acteur	Pertes cultures	Dégâts	Aménagement	Aide	Total
Commune	0.00 F	50 051.36 F	0.00 F	0.00 F	50 051.36 F
Agri 1	4 063.25 F	2 994.00 F	0.00 F	0.00 F	7 057.25 F
Agri 2	752.00 F	2 850.00 F	0.00 F	0.00 F	3 602.00 F
Agri 3	0.00 F	0.00 F	0.00 F	0.00 F	0.00 F
Total BV :					60 710.61 F

Tableau 19 : Répartition des coûts entre les différents acteurs sur la période 1999-2004

#### Estimation du coût des dégâts en présence des aménagements

La version actuelle de STREAM ne permet de prendre en compte que l'effet des aménagements sur le ruissellement. En effet, seule l'augmentation de la capacité d'infiltration du ruissellement lorsque ce dernier traverse des zones enherbées a été modélisée. Par exemple, l'effet des zones enherbées sur le ralentissement du ruissellement et le piégeage des sédiments n'est pas encore pris en compte. Bien sur, la prise en compte d'un aménagement entraîne néanmoins une diminution des pertes en terre puisque érosion et ruissellement sont fortement liés (Tableau 20). Mais cette diminution des pertes en terre calculée par STREAM est sous-estimée notamment pour les pertes liées à l'érosion concentrée. Ceci nous a conduit à faire des hypothèses sur l'efficacité technique des aménagements testés du point de vue de la réduction des pertes en terre.

Ev. Plu.	Ruissellement (m3)			Erosion diffuse (T)			Erosion concentrée (T)		
	S A	A 1	A 2	S A	A 1	A 2	S A	A 1	A 2
1	10 003.6	7 826.9	7 597.5	50	39	38	782	724	722
2	3 493.6	1 966.5	1 530.9	17.5	9.8	7.7	0	0	0

Tableau 20 : Ruissellement et pertes en terre calculés par STREAM sans aménagement (S A) ou avec les aménagements testés (A 1 & A 2)

#### A. Cas de la fourrière enherbée

La figure 17 présente les dégâts supposés apparaissent même en présence de la fourrière enherbée installée sur les parcelles de l'agriculteur 1. Cette carte sert de base pour estimer les dégâts pour chacun des 3 agriculteurs théoriques ainsi que pour la collectivité locale et ceci toujours sur l'ensemble des 6 ans de la succession.

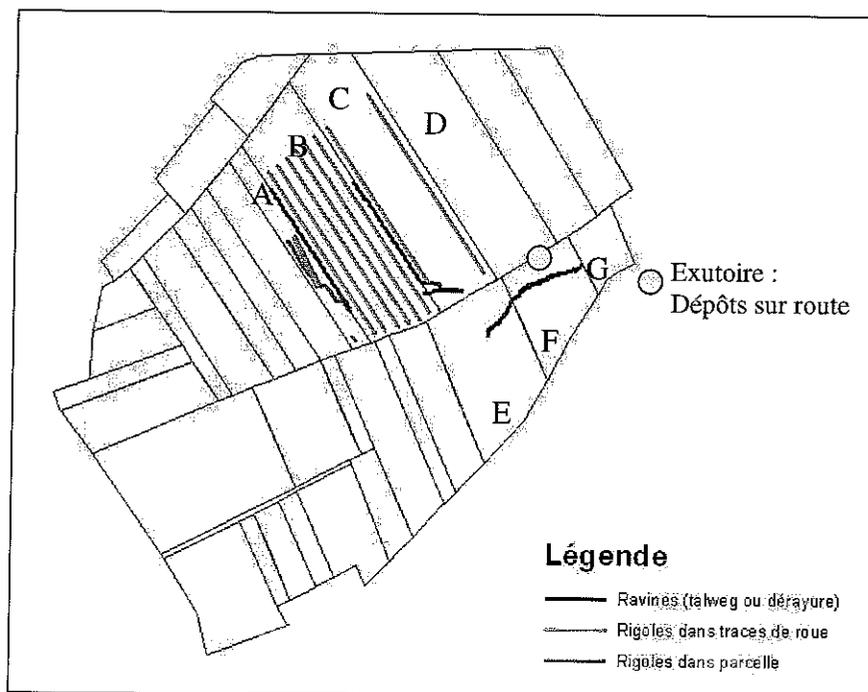


Figure 17 : Localisation des dégâts supposés après mise en place de la fourrière enherbée

Cas de l'agriculteur 1 :

En ce qui concerne cet agriculteur, la présence de la fourrière enherbée permet d'éviter la formation de la ravine le long des parcelles A, B et C mais pas la formations des rigoles ou ravines au sein des parcelles A et C ni celle des rigoles dans les traces de roues. Cependant, pour les mêmes raisons que précédemment, les rigoles dans les traces de roues ne sont toujours pas comptabilisées en terme de dégât. Par contre, même si la zone de dépôts est toujours présente dans la parcelle D, elle n'occasionne plus de dégâts aux cultures puisqu'elle est maintenant localisée dans la zone enherbée. Les dégâts résumés dans le tableau 21 s'élèvent à 3 293.40 F sur l'ensemble des 6 ans de la rotation au lieu de 7 057.25 F en l'absence d'aménagement ce qui représente une économie de 53 %.

Perte de culture par :	Surface (ha)	Coût rotation	Coût annuel
Rigoles & ravines	0.03	299.40 F	49.90 F

Contraintes d'exploitation	Longueur	Coût rotation	Coût annuel
Comblement des ravines	499 m	2 994.00 F	2 994.00 F

Tableau 21 : Coûts des dégâts supportés par l'agriculteur 1 en présence de l'aménagement 1

Cependant, la mise en place de cet aménagement occasionne des frais. Nous avons estimé le coût d'implantation à 22958 F pour 1.1 ha de fourrière enherbée. Ces travaux peuvent néanmoins être subventionnés à 80% par l'Etat ce qui porte à 4 592 F le coût d'implantation à la charge de l'agriculteur. La fourrière enherbée nécessite un entretien annuel qui s'élève à 200 F mais n'occasionne aucune perte de temps lors des travaux agricoles. La surface occupée par cet aménagement entraîne également un coût supplémentaire lié à l'absence de culture de vente. Ce coût calculé en faisant la moyenne de la marge brute de chaque culture pondérée par sa proportion dans l'assolement s'élève à 8305 F par an. Cependant, comme la largeur de la bande est de 20 m, sa surface peut être comptabilisée comme jachère et nous avons estimé en première approximation que cela pouvait compenser la perte liée à l'absence de culture de vente. Au final, le coût de cet aménagement sur l'ensemble de la rotation s'élève à 5 792.00 F pour l'agriculteur 1.

Cas de l'agriculteur 2 :

L'implantation de la fourrière enherbée chez son voisin permet d'éviter l'apparition de deux petites ravines mais la ravine principale dans les parcelles E et F est toujours présente car elle est alimentée par une partie du ruissellement produit dans l'amont du bassin versant ne transitant pas par l'aménagement. Cependant, nous avons estimé que sa profondeur risquait d'être un peu moins important et nous avons appliqué un coût unitaire moyen de 600 F / 100 m au lieu de 1000 F en l'absence d'aménagement. Les dégâts résumés dans le tableau 8 s'élèvent à 2 204 F sur l'ensemble des 6 ans de la rotation au lieu de 3 602.00 F en l'absence d'aménagement ce qui représente une économie de 39 % d'autant plus que l'implantation de cet aménagement ne lui coûte rien puisqu'il n'est pas localisé sur ses terres.

Perte de culture par :	Surface (ha)	Coût rotation	Coût annuel
Rigoles & ravines	0.036	494.00 F	82.33 F

Contraintes d'exploitation	Longueur	Coût rotation	Coût annuel
Comblement des ravines	285 m	1 710 F	1 710 F

Tableau 22 : Coûts des dégâts supportés par l'agriculteur 2 en présence de l'aménagement 1

Cas de la commune :

Compte tenu que les pertes en terre calculées par STREAM sont sur-estimées, nous avons décidé arbitrairement de diminuer de moitié les valeurs calculées à l'exutoire avec les données climatiques du premier événement pluvieux (Tableau 6). Les pertes par érosion concentrée sont donc estimées à seulement 381.5 T lors de l'événement le plus catastrophique auxquelles s'ajoute les pertes annuelle par érosion diffuse qui s'élèvent à 39.2 T (4 épisodes à 9.8 T). In fine, les coûts pour l'ensemble des acteurs du bassin versant dépassent légèrement 54 000 F (Tableau 23) pour la période 1999-2004 correspondant aux 6 ans de la succession culturale. Ils sont toujours supportés majoritairement par la commune (45%) mais elle ne dépense plus que 24 668 F puisque l'efficacité supposée de l'aménagement a occasionné moins de dégâts sur la route. Par ailleurs, le coût de l'aménagement n'est supporté que par l'Etat et dans une moindre mesure par l'agriculteur 1.

Acteur	Pertes cultures	Dégâts	Aménagement	Aide	Total
Commune	0.00 F	24 668.00 F	0.00 F	0.00 F	24 668.00 F
Etat	0.00 F	0.00 F	0.00 F	18 366.00 F	18 366.00 F
Agri 1	299.40 F	2 994.00 F	5 792.00 F	0.00 F	9 085.40 F
Agri 2	494.00 F	1 710.00 F	0.00 F	0.00 F	2 204.00 F
Agri 3	0.00 F	0.00 F	0.00 F	0.00 F	0.00 F
Total BV :					54 323.40 F

Tableau 23 : Répartition des coûts entre les différents acteurs sur la période 1999-2004 en présence de l'aménagement 1

B. Cas du talweg partiellement enherbée

La figure 18 présente les dégâts supposés apparaissent même en présence d'un enherbement partiel du talweg installée sur certaines parcelles des agriculteurs 1 et 2. Cette carte sert de base pour estimer les dégâts pour chacun des 3 agriculteurs théoriques ainsi que pour la collectivité locale et ceci toujours sur l'ensemble des 6 ans de la succession.

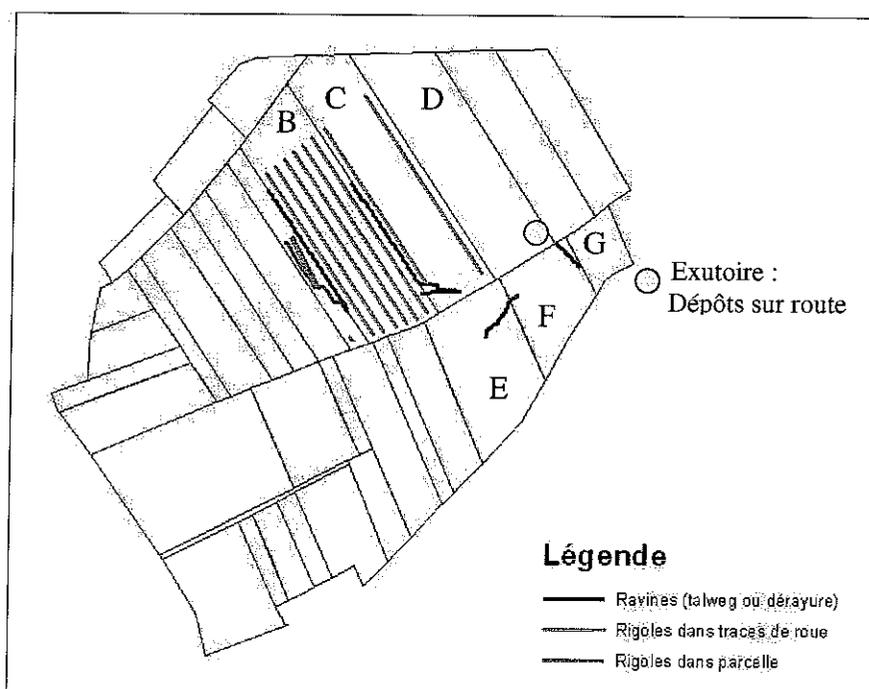


Figure 18 : Localisation des dégâts supposés après l'enherbement partiel du talweg

Cas de l'agriculteur 1 :

En ce qui concerne cet agriculteur, la présence de cette bande enherbée le long du talweg permet de nouveau d'éviter la formation de la ravine le long des parcelles A, B et C mais ce deuxième aménagement n'a pas non plus d'effet positif sur les rigoles ou ravines au sein des parcelles A et C ni sur les rigoles dans les traces de roues. Cependant, pour les raisons déjà évoquées, les rigoles dans les traces de roues ne sont toujours pas comptabilisées en terme de dégât. Par contre, la zone de dépôts est toujours présente dans la parcelle D et elle occasionne de nouveau des dégâts non négligeables aux cultures puisqu'elle n'est plus maintenant localisée dans une zone enherbée. Par conséquent, les dégâts résumés dans le tableau 10 s'élèvent à 6 043.40 F sur l'ensemble des 6 ans de la rotation au lieu de 7 057.25 F en l'absence d'aménagement ce qui ne représente plus qu'une économie de 14 % par rapport à la situation sans aménagement.

Perte de culture par :	Surface (ha)	Coût rotation	Coût annuel
Rigoles & ravines	0.03	3 049.40 F	508.23 F
Dépôts	0.0625		

Contraintes d'exploitation	Longueur	Coût rotation	Coût annuel
Comblement des ravines	499 m	2 994.00 F	2 994.00 F

Tableau 24 : Coûts des dégâts supportés par l'agriculteur 1 en présence de l'aménagement 2

Cependant, la mise en place de cet aménagement occasionne toujours des frais. Nous avons estimé le coût d'implantation à 16292 F pour 0.78 ha de talweg enherbé. Une fois les 80% de subvention retirés, le coût d'implantation restant à la charge de l'agriculteur est de 3258 F. Le talweg enherbé nécessite un entretien annuel qui s'élève à 200 F mais n'occasionne aucune perte de temps lors des travaux agricoles. La surface occupée par cet aménagement entraîne également un coût supplémentaire lié à l'absence de culture de vente. Ce coût calculé en faisant la moyenne de la marge brute de chaque culture pondérée par sa proportion dans l'assolement s'élève à 5889 F par an. Cependant, comme pour l'aménagement 1, nous avons testé l'implantation d'une bande de 20 m de large. Sa surface étant

comptabilisable comme jachère, nous avons estimé en première approximation que cela pouvait compenser la perte liée à l'absence de culture de vente. Au final, le coût de cet aménagement sur l'ensemble de la rotation s'élève à 4 458.00 F pour l'agriculteur 1.

Cas de l'agriculteur 2 :

L'enherbement d'une partie du talweg permet d'éviter l'apparition de deux ravines dans la parcelle F. La ravine dans la parcelle E est toujours présente puisqu'elle est alimentée par du ruissellement produit en amont du talweg enherbé implanté sur la parcelle F. Par ailleurs, l'absence de fourrière enherbée au dessus de la parcelle F chez l'agriculteur 1 permet la réapparition de la petite ravine sous la zone de dépôt (Figure 5) qui avait disparu lors du précédent scénario d'aménagement. Cette même figure montre que de par leur localisation, les 2 ravines subsistantes de cet agriculteur ne peuvent bénéficier d'un effet positif dû à la présence du talweg enherbé sur les parcelles A, B et C de l'agriculteur 1. Par conséquent, nous avons appliqué un coût unitaire moyen de 1000 F / 100 m pour les opérations de comblement des ravines puisque la profondeur de ces ravines devrait être sensiblement égale à celle obtenue en l'absence de tout aménagement.

Les dégâts résumés dans le tableau 11 s'élèvent à 2195.18 F sur l'ensemble des 6 ans de la rotation au lieu de 3 602.00 F en l'absence d'aménagement ce qui représente une économie de 39 %.

Perte de culture par :	Surface (ha)	Coût rotation	Coût annuel
Rigoles & ravines	0.021	205.18 F	34.20 F

Contraintes d'exploitation	Longueur	Coût rotation	Coût annuel
Comblement des ravines	199 m	1 990 F	1 990 F

Tableau 25 : Coûts des dégâts supportés par l'agriculteur 2 en présence de l'aménagement 2

Cependant, contrairement au scénario précédent, cet agriculteur doit maintenant prendre en compte les frais liés à l'implantation de cet aménagement sur ses terres. Nous avons estimé le coût d'implantation à 8958 F pour 0.43 ha de talweg enherbé. Une fois les 80% de subvention retirés, le coût d'implantation restant à la charge de l'agriculteur est de 1791.6 F. Le talweg enherbé nécessite un entretien annuel qui s'élève à 200 F mais n'occasionne aucune perte de temps lors des travaux agricoles. Le coût supplémentaire lié à l'absence de culture de vente s'élève à 3246.50 F par an. Cependant, comme pour l'agriculteur 2, nous avons testé l'implantation d'une bande de 20 m de large ce qui rend cette surface comptabilisable comme jachère et nous avons estimé en première approximation que cela pouvait compenser la perte liée à l'absence de culture de vente. Au final, le coût de cet aménagement sur l'ensemble de la rotation s'élève à 2 991.60 F pour l'agriculteur 2.

Cas de la commune :

Compte tenu que les pertes en terre calculées par STREAM sont toujours sur-estimées, nous avons décidé arbitrairement de diminuer de deux tiers les valeurs calculées à l'exutoire avec les données climatiques du premier événement pluvieux (Tableau 20). En effet, nous considérons que l'enherbement du talweg dans la parcelle F devrait pouvoir absorber une partie non négligeable du ruissellement boueux en provenance de l'amont. Les pertes par érosion concentrée sont donc estimées à seulement 253 T lors de l'événement le plus catastrophique auxquelles s'ajoute les pertes annuelle par érosion diffuse qui s'élèvent à 30.8 T (4 épisodes à 7.7 T). In fine, les coûts pour l'ensemble des acteurs du bassin versant dépassent légèrement 53 000 F (Tableau 26) pour la période 1999-2004 correspondant aux 6 ans de la succession culturale. Ils ne sont plus supportés majoritairement par la commune (33%) mais par l'Etat (37%) et également par une participation plus importante des agriculteurs du bassin versant. La commune ne dépense plus que 17 512 F car l'efficacité supposée de l'enherbement du talweg de ce deuxième scénario a occasionné encore moins de dégâts sur la route.

Acteur	Pertes cultures	Dégâts	Aménagement	Aide	Total
Com	0.00 F	17 512.00 F	0.00 F	0.00 F	17 512.00 F
Etat	0.00 F	0.00 F	0.00 F	20 200.40 F	20 200.40 F
Agri 1	3 049.40 F	2 994.00 F	4 458.00 F	0.00 F	10 501.40 F
Agri 2	205.18 F	1 990.00 F	2 991.60 F	0.00 F	5 186.78 F
Agri 3	0.00 F	0.00 F	0.00 F	0.00 F	0.00 F
Total BV :					53 400.58 F

Tableau 26 : Répartition des coûts entre les différents acteurs sur la période 1999-2004 en présence de l'aménagement 2

### Comparaison des résultats des différents scénarios

La figure 19 montre que la répartition des coûts supportés par les différents acteurs varie considérablement selon les scénarios. On constate qu'en absence d'aménagement, l'essentiel des coûts est imputé à la commune. Par contre, l'installation d'un aménagement entraîne une augmentation des coût pour l'Etat mais aussi pour les agriculteurs.

Il convient donc de s'assurer de la rentabilité des aménagements testés non seulement pour chaque acteur mais aussi pour le bassin versant. Le tableau 27 permet de constater que le gain de marge, c'est-à-dire la différence entre les dégâts avant et après aménagement, est positif pour tous les acteurs et ceci quelque soit le scénario testé. Ceci traduit l'efficacité des aménagements testés pour réduire les problèmes érosifs spécifiques à ce bassin versant. Par contre, si les pertes qui prennent en compte les dégâts résiduels après aménagements et leur coût d'implantation sont supérieurs aux pertes liées aux dégâts avant aménagement, l'aménagement n'est pas rentable. C'est le cas pour l'agriculteur 1 dont la différence est toujours négative quelque soit le scénario. Pour l'agriculteur 2, cette différence est positive dans le cas de l'aménagement 1. En effet, il bénéficie d'une réduction des dégâts sur ses parcelles sans avoir eu besoin de payer l'aménagement. Par contre, dans le cas du deuxième scénario, cet agriculteur 2 présente lui aussi un solde négatif du au coût d'implantation de l'aménagement. Pour les agriculteurs, les soldes pourraient être encore plus négatifs si nous n'avions pas supposé que les surfaces occupées par les aménagements n'occasionnent pas de coût supplémentaire lié à l'absence de culture de vente tant qu'elles peuvent être comptabilisées comme jachère. Ces aménagements sont néanmoins très bénéfiques du point de vue de la commune dont la différence est largement positive dans les deux cas ce qui a pour effet de rendre ces deux aménagements rentables pour l'ensemble du bassin versant.

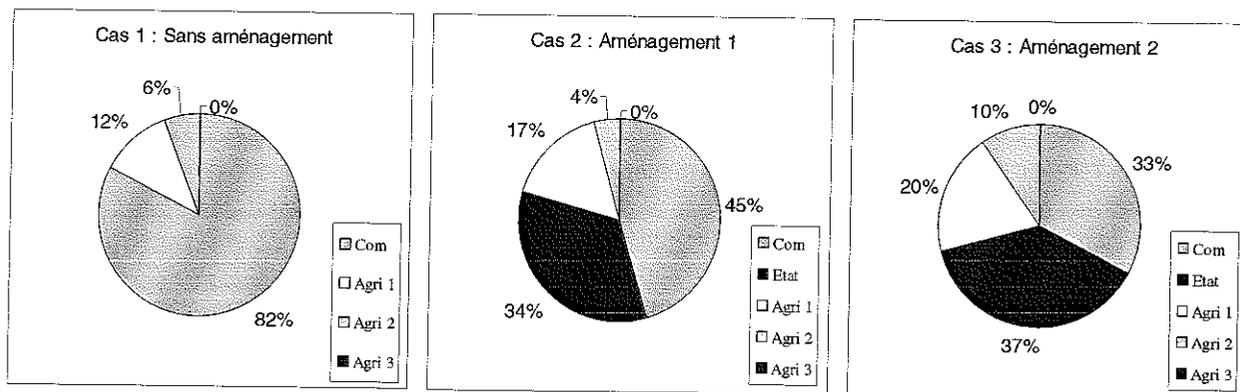


Figure 19 : Evolution de la répartition des coûts entre les différents acteurs selon les scénarios testés

	Sans aménagement	Après aménagement 1				
Acteurs	Dégâts A	Dégâts B	Coût aménagements	Gain de marge	Pertes (Dégâts+Coût)	Différence (DégâtsA-pertes)
Agri 1	7057.25	3293.40	5792.00	3763.85	9085.40	-2028.15
Agri 2	3602.00	2204.00	0.00	1398.00	2204.00	1398.00
Agri 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Commune	50051.36	24668.00	0.00	25383.36	24668.00	25383.36
Etat	0.00	0.00	18366.00	0.00	18366.00	-18366.00
Total BV	60710.61	30165.40	24158.00	30545.21	54323.40	6387.21

	Sans aménagement	Après aménagement 2				
Acteurs	Dégâts A	Dégâts B	Coût aménagements	Gain de marge	Pertes (Dégâts+Coût)	Différence (DégâtsA-pertes)
Agri 1	7057.25	6043.40	4458.00	1013.85	10501.40	-3444.15
Agri 2	3602.00	2195.18	2991.60	1406.82	5186.78	-1584.78
Agri 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Commune	50051.36	17512.00	0.00	32539.36	17512.00	32539.36
Etat	0.00	0.00	20200.40	0.00	20200.40	-20200.40
Total BV	60710.61	25750.58	27650.00	34960.03	53400.58	7310.03

Tableau 27 : Rentabilité (en F) des aménagements pour chaque acteur et pour le bassin sur la période 1999-2004

## 4.2 Simulations de scénarios anti-érosifs dans le Lauragais

### Introduction

Dans le volet 2 de ce rapport une étude a pu définir le contexte topographique des coulées boueuses sur la voirie du Lauragais et les segments de route qui nécessitent des interventions régulières de la part de la DDE ont été cartographiés. Il a été proposé que ces sites pourraient servir de lieu de démonstration pour des stratégies de lutte anti-érosive. Comme il a été noté par Verstraeten et al. (2003), les parcelles de démonstration sont utiles pour sensibiliser les agriculteurs et la mise en place de certains aménagement dépend directement de la présence ou non de subventions. Typiquement, les subventions sont inférieures aux gains retirés par la production d'une culture, ce qui explique la faible motivation de la part des agriculteurs. L'objectif de l'analyse ci-dessous est de chiffrer le coût de la mise en place de quelques aménagements et de comparer ce chiffre aux coûts actuels de déblayage de route et curage de fossés lors des orages violents dans le secteur. La bande enherbée est l'aménagement le plus adapté au contexte du Lauragais et l'essentielle de l'analyse ci-dessous porte sur l'efficacité de cette mesure. Cependant, la re-organisation du parcellaire a aussi été pris en compte. L'efficacité des mesures a été estimé à l'aide du modèle d'érosion « Revised Universal Soil Loss Equation » (RUSLE) et les estimations des coûts sont basés sur le rapport de Lebrun (2000).

### Données d'entrée pour les simulations

Les coûts d'intervention après une coulée boueuse sur la voirie sont estimés par la DDE à environ 6,1 euros m<sup>3</sup> de sol. Les quantités de sol enlevées sont inscrites nul part mais il a été estimé par la DDE qu'un seul orage en juin 2000 a provoqué un coût de 30,5 keuros (sans compter les 53,5 keuros pour rétablir les berges de fossés qui se sont affaissées). Il a été considéré qu'un montant d'environ 100 keuros par an pour l'ensemble du secteur de Villefranche-de-Lauragais était une estimation conservatrice des coûts liés à l'enlèvement des sédiments déposés dans les fossés et sur la

route. Il a été calculé que si la longueur moyenne d'un versant perpendiculaire à un segment de route sensible était de l'ordre de 300 m, le montant de 100 keuros par an correspond à un taux d'érosion d'environ 30-35 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (basé sur 21 km de route, 6,1 euros m<sup>-3</sup> pour enlever les sédiments, et une densité apparente de 1,3 t m<sup>-3</sup>), une valeur réaliste pour le Lauragais.

Deux types d'aménagements sont subventionnés dans le secteur : les bandes enherbées et la mise en place de haies. Ces mesures sont associées à d'autres préoccupations que l'érosion, notamment la pollution des eaux par les nitrates et la biodiversité. Pour les bandes enherbées, la subvention est de l'ordre de 380 euros ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Les revenus pour une culture sont de l'ordre du double de ce montant, d'environ 700 euros ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. L'achat des plants pour les haies est entièrement subventionné mais leur mise en terre est à la charge de l'agriculteur. Le coût total de cette mesure (achat des plant et mise en terre) est de l'ordre de 6 euros m<sup>-1</sup> de haie.

Les effets bénéfiques des bandes enherbées sur la réduction des engrais, pesticides et sédiments transportés par le ruissellement ont été bien démontrés (Hayes et al., 1984; Desta and Morgan, 1996; Lecomte et al., 2003). L'efficacité varie de 50% à 95% en fonction du type de végétation, largeur de bande, inclinaison de la pente, et les conditions de pluie. Les premiers résultats dans le secteur suggèrent qu'une bande de 12 m combinée avec une haie pourrait suffire pour éliminer la quasi-totalité des sédiments sortant de la parcelle. Cependant, cette expérimentation n'est qu'à son début et il faudrait plusieurs années pour définir l'efficacité réelle.

#### *La modélisation de l'efficacité des mesures anti-érosives*

En l'absence de données de terrain, les estimations de l'efficacité des mesures sont basées sur des simulations à l'aide de RUSLE (Renard et al., 1997). Le modèle prédit les taux d'érosion en t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en multipliant des indices d'érosivité, d'érodibilité, d'inclinaison et longueur de pente, ainsi que du type de couvert végétal et de l'itinéraire technique. Les indices ont été calculés à partir de données locales qui prennent en compte la spécificité du Lauragais.

La version spatialisée du modèle, RUSLE2, permet de définir un profil topographique, et les processus de détachement et de dépôt de sédiments sont répartis le long du versant. Pour nos simulations, le profil topographique utilisé est celui de la figure 20. L'inclinaison du segment rectiligne entre la convexité du haut et la concavité du bas a été variée afin de déterminer son impact sur l'efficacité de la bande enherbée. Tous les autres caractéristiques du versant sont constants. L'objectif des premières simulations étaient de vérifier l'efficacité des bandes enherbées sur une parcelle de tournesol, la situation qui génère le plus de coulées boueuses. Deux largeurs de bande enherbée ont été testées : 12 m et 24 m.

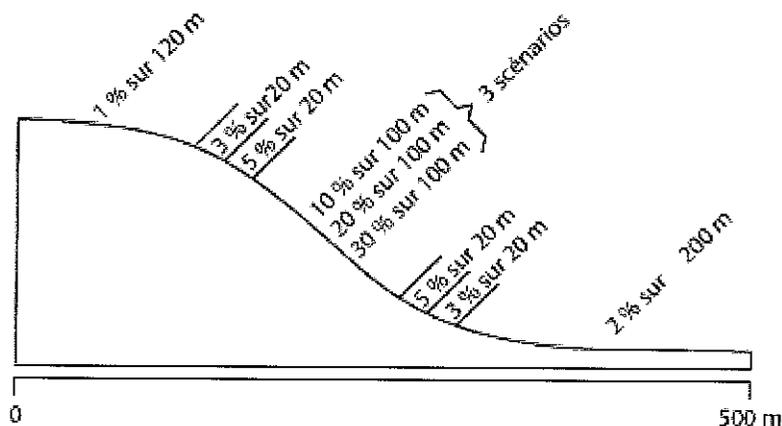


Figure 20 : Le profil topographique utilisé pour les simulations.

- Simulation de l'efficacité d'une bande enherbée :

Les résultats des premières simulations décrites ci-dessus sont montrés dans le tableau 28. Peu de mesures de l'érosion ont été effectuées dans le secteur dans le passé mais les valeurs du modèle correspondent bien aux mesures de Bruno et Fox (2003) sur une demi-douzaine de parcelles en 1997 et 1998. Les valeurs d'efficacité des bandes enherbées (pourcentage des sédiments retenu dans la parcelle par la bande) sont faibles (de 41% à 61%) en comparaison avec les valeurs citées dans la littérature scientifique (références citées ci-dessus), mais une comparaison directe entre contextes différents est impossible. Cependant, il paraît probable que l'efficacité réelle des bandes enherbées soit supérieure à celle prédite par le modèle.

Comme prévue, une augmentation dans l'inclinaison de la pente favorise l'érosion. La proportion de sédiments retenue dans la parcelle, par une combinaison du dernier segment linéaire avant la route et la bande enherbée, augmente aussi avec l'inclinaison de la pente. Aucun dépôt de sédiment se passe sur le replat avant la route dans le scénario de 10% : tous les sédiments érodés quittent la parcelle. Ceci n'est pas le cas pour les autres scénarios puisque une partie des sédiments érodés demeure dans la parcelle, même sans bande enherbée : cette fraction varie de 32% sur le blé avec une pente de 20% à 48% sur le tournesol avec une pente de 30% (les autres valeurs sont intermédiaires). Ceci souligne la différence dans la capacité de transport entre le segment rectiligne en amont et celui en aval. Plus la pente du segment en amont augmente, plus le ruissellement est chargé en sédiments. Cependant, la capacité de transport sur le segment en aval est relativement constant et donc une plus grande proportion de sédiments est déposée par le ruissellement provenant de pentes plus accentuées.

Le taux d'érosion avec ou sans bande enherbée est constant pour chaque inclinaison de pente puisque la bande n'occupe qu'une superficie négligeable à l'intérieur de la parcelle. Ceci souligne que la bande enherbée située en aval d'un versant afin de protéger un ruisseau ou segment de route ne contribue pas à réduire l'érosion sur le versant. Cependant, sur le long terme, c'est la dégradation des sols qui pose le plus grand problème. L'effet de la bande enherbée sur les sédiments quittant la parcelle n'est pas directement proportionnelle à sa largeur. Doubler la largeur de la bande enherbée de 12 m à 24 m ne correspond pas à un doublement de la quantité de sédiments retenus, cette proportion n'augmentant que par un facteur de 1,5. L'efficacité augmente avec un changement de pente entre 10% et 20% mais ne varie pas entre la pente de 20% et celle de 30%.

Afin d'estimer les coûts de cette mesure, seule la pente de 10% a été prise en compte. Cette valeur est la plus représentative des pentes concernées, d'une part, et l'aménagement de parcelles avec des pentes supérieures ne peut que donner des bénéfices supérieures à celles calculées sur la base d'une pente de 10%, d'autre part. De plus, les estimations seront faites pour le tournesol, cette culture étant celle concernée par la grande majorité des coulées boueuses.

Pour une bande de 12 m, une réduction de 32% dans la quantité de sédiments quittant la parcelle réduirait les dépenses d'intervention de la part de la DDE à 68 keuros (100 keuros - 0.32\*100 keuros), ce qui représente une réduction de 32 keuros par an. Pour une bande de 24 m, les coûts d'intervention seront de 46 keuros, pour une réduction de 54 keuros.

Si les agriculteurs sont compensés pour la perte de revenu de leur culture (700 euros ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) en semant une bande enherbée, le coût total pour une bande de 12 m sur toute la longueur des 21 km de routes sensibles serait de l'ordre de 17,6 keuros. Le coût pour une bande de 24 m serait de l'ordre de 35,3 keuros. En déduisant le coût de la subvention plus celui des intervention futurs du coût d'intervention actuel, le solde serait un bénéfice net de 14,4 keuros par an pour la bande de 12 m et de 18,7 keuros pour celle de 24 m. Notons que les estimations des coûts et les réductions des pertes en terre sont plutôt conservatrices, suggérant que le bénéfice net pourrait être supérieur aux chiffres cités.

Le coût d'une haie sur 21 km est de l'ordre de 126 keuros. Cette somme est déjà supérieure aux coûts d'intervention actuels. Cependant, l'impact d'une haie sur l'érosion est encore inconnue et il est donc impossible de juger de son efficacité sur la réduction des coulées boueuses. Le coût élevé de la mise en place d'une haie justifie une étude plus approfondie sur son efficacité avant de la proposer comme mesure anti-érosive. Au-delà de son impact sur le piégeage des sédiments, il est probable que

la haie réduit l'éroulement des berges de fossé longeant les parcelles et cet aspect doit également être pris en compte.

Tableau 28 : Résultats des scénarios d'aménagement avec deux longueurs de bande enherbée.

		Blé	Tournesol	Moyenne
10%	Taux d'érosion moyen (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	6,1	28	17
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) sans amgt.	6,1	28	17
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 12 m	4	19	11,5
	Efficacité de la bande de 12 m (% de réduction)	34%	32%	33%
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 24 m	2,8	13	7,9
	Efficacité de la bande de 24 m (% de réduction)	54%	54%	54%
20%	Taux d'érosion moyen (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	14	72	43
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) sans amgt.	9,5	51	30,2
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 12 m	5,5	30	17,7
	Efficacité de la bande de 12 m (% de réduction)	42%	41%	41,5%
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 24 m	4	20	12
	Efficacité de la bande de 24 m (% de réduction)	58%	61%	59,5%
30%	Taux d'érosion moyen (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	23	122	72,5
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) sans amgt.	11	63	37
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 12 m	6,5	37	21,7
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 12 m	41%	41%	41%
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> ) bande de 24 m	4,6	25	14,8
	Efficacité de la bande de 24 m (% de réduction)	58%	60%	59%

- Simulation de l'efficacité d'une re-organisation du parcellaire :

Une des premières causes de l'aggravation des problèmes d'érosion est l'accroissement de la superficie de la parcelle. La suppression des haies et talus a éliminé les obstacles au ruissellement et accentué sa vitesse d'écoulement. Une solution éventuelle serait donc de découper le parcellaire en 2 et au lieu de faire une rotation blé/tournesol sur l'ensemble de la parcelle, l'agriculteur pourrait garder la même rotation mais sur la moitié de la parcelle. Une année, une culture de blé serait semée en amont de du tournesol, et l'année d'après, ce serait l'inverse. Ces scénarios ont été simulés à l'aide du modèle RUSLE2 et les résultats sont présentés dans le tableau 29. Les taux d'érosion et de sédiments quittant la parcelle sont calculés pour chaque scénario (blé en amont / tournesol à l'aval et l'inverse l'année suivante) et la moyenne sur 2 ans a été comparée à la moyenne d'une rotation classique, aussi sur 2 ans.

Comme il est indiqué dans le tableau 29, une valeur négative montre une plus grande efficacité de la re-organisation parcellaire par rapport aux autres scénarios. Les résultats indiquent que cet aménagement présente un avantage important par rapport à la bande enherbée. Premièrement, il y a une diminution importante dans le taux de l'érosion sur l'ensemble de la parcelle. L'efficacité de cet effet augmente avec l'inclinaison de la pente. Ce scénario s'attaque donc autant à la préservation du sol sur le versant qu'aux coulées boueuses sur la voirie.

L'organisation spatiale des cultures joue sur l'efficacité de l'aménagement pour une année donnée. Une culture de blé en aval d'un tournesol piège davantage de sédiments que l'inverse, ce qui paraît cohérent avec nos attentes. La moyenne sur deux ans permet une comparaison directe avec une rotation classique avec ou sans bande enherbée. La re-organisation de la parcelle montre une efficacité plus importante par rapport aux bandes enherbées dans sa capacité de retenir les sédiments en place. Les quantités de sédiments quittant la parcelle sont réduites d'environ 47% une bande de 12 m et de 32% pour une bande de 24 m. Ceci représente donc un gain de l'ordre de 47 keuros et de 32 keuros de plus, respectivement, que les figures citées ci-dessus pour les bandes enherbées.

Malgré l'intérêt que cet aménagement représente à première vue, les obstacles à sa mise en place sont peut-être plus incontournables. D'une part, la subvention d'une bande enherbée continue

dans la logique des subventions européennes et représente un échange relativement simple à justifier, calculer et contrôler. Le re-découpage du parcellaire serait peut-être plus difficile à justifier en tant que subvention. De plus, la re-organisation exige de l'agriculteur un engagement encore plus important de la part de l'agriculteur. La présence de 2 cultures différentes, nécessitant un outillage, des itinéraires techniques et des calendriers différents représente une nuisance non-négligeable. Dernièrement, l'utilisation d'herbicides sur une culture et non pas l'autre devient délicat par leur proximité, et la manipulation du tracteur et des outils agricoles en limite de parcelle devient particulièrement délicat, nécessitant une bande sans culture sur laquelle la machinerie peut rouler. La combinaison de ces facteurs suggère que les obstacles peuvent être insurmontables dans le contexte actuel et que peu d'agriculteurs se lanceraient dans cette option dans le court terme.

Tableau 29 : Résultats des scénarios d'aménagement avec le re-organisation du parcellaire (une différence négative représente un taux inférieur pour la re-organisation du parcellaire comparé aux bandes enherbées).

		Blé / Tournesol	Tournesol / Blé	Moyenne	Différence sans amgt.	Différence 12 m	Différence 24 m
10%	Taux d'érosion moyen (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	13	1,4	7,2	-9,8	-9,8	-9,8
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	9,5	1,3	5,4	-11,6	-6,1	-2,5
20%	Taux d'érosion moyen (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	35	9	22	-21	-21	-21
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	14	3,5	8,8	-21,4	-8,9	-3,2
30%	Taux d'érosion moyen (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	63	14	38,5	-34	-34	-34
	Sédiments quittant la parcelle (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	17,5	4,2	10,8	-26,2	-10,9	-4

#### 4.3. Conclusion sur les simulations

La mise en place d'une mesure de lutte anti-érosive représente très souvent un risque pour l'agriculteur, risque d'une perte de temps, risque d'une perte financière comme cela a été montré dans les deux régions. Il est donc essentiel que la stratégie d'intervention soit bien ciblée car un échec ne ferait que démotiver l'ensemble des agriculteurs.

Dans le Pays de Caux, nous avons montré qu'on pouvait utiliser conjointement les modèles physique et économique pour faire l'évaluation économique de différents scénarios. Bien sûr, l'analyse de sensibilité des modèles montre qu'il y a encore beaucoup d'approximation dont il faut tenir compte lors des classements de scénarios proposés en sortie. Il faut ainsi continuer à constituer des bases de référence par rapport aux coûts des dégâts liés à l'érosion et exprimer ces valeurs dans un référentiel compatible avec les sorties proposées par les modèles physiques. En effet, les pertes en terre par STREAM que ce soit au niveau des ravines où au niveau des dépôts sur les routes sont exprimées en m<sup>3</sup> ou en tonne. Or, dans le modèle économique, les opérations de comblement des ravines n'intègre que la longueur pour estimer le coût. De même, le coût du nettoyage des routes est exprimé en fonction du temps et non de la quantité de terre à enlever. Ces simulations ont montré aussi l'importance des dégâts occasionnés par les zones de dépôts sur les parcelles agricoles. Le modèle physique est capable d'estimer la localisation de ces zones de dépôt mais il est difficile d'appréhender la réalité de la perte de culture par recouvrement. Ainsi, nous avons souvent considéré que la culture était complètement détruite alors que tout va dépendre de l'épaisseur effective du dépôt. Enfin, nous avons vu à travers les simulations, que le risque économique est variable. Par exemple, l'évaluation économique peut montrer que le scénario simulé est rentable lorsque la ravine n'apparaît que dans une

parcelle en blé. Or si dans la réalité, la ravine apparaît dans un lin ou une betterave, les pertes subites étant plus importantes, le scénario ne sera pas rentable. Cette difficulté à estimer le risque économique explique sans doute en partie pourquoi les agriculteurs sont assez peu enclins à installer des aménagements anti-érosifs.

Dans le Lauragais, une re-organisation du parcellaire représente l'option avec le grand impact sur le taux d'érosion et les coulées boueuses sur la voirie. Cependant, cet aménagement nécessite un investissement fort de la part de l'agriculteur ainsi que la création d'une nouvelle subvention qui prend en compte l'organisation spatiale des cultures. La bande enherbée ne s'attaque pas au problème de la dégradation des sols, mais elle permet la mise en place d'une mesure simple et administrativement reconnue. Comme pour tous les aménagements, la bande enherbée ne sera adoptée que lorsque les subventions compensent entièrement l'agriculteur pour la perte de production. Les résultats indiquent que les subventions nécessaires pour ce niveau de compensation pourraient théoriquement venir de la réduction des coûts d'intervention de la part de la DDE.

## Conclusion générale

Les résultats présentés dans ce rapport montrent qu'on dispose aujourd'hui d'outils de modélisation pour évaluer les risques d'érosion à plusieurs échelles : au niveau régional, les modèles présentés permettent de hiérarchiser les zones à risque et de porter un diagnostic sur les principaux facteurs en cause (§ 1.1 et 1.2) ; au niveau des bassins versants élémentaires le modèle STREAM, développé en partie dans le cadre de ce projet, correspond à une démarche conceptuelle originale et opérationnelle (§ 4.1). Il permet de simuler et tester numériquement l'efficacité des mesures anti-érosives possibles sur un bassin versant, à partir des références expérimentales acquises sur le terrain.

La connaissance effective de l'efficacité de ces mesures dans différentes conditions géographiques est évidemment limitée par le petit nombre de références expérimentales disponibles à ce jour. A ce titre, la mise au point, dans le cadre de ce projet, de dispositifs standardisés de mesure du ruissellement, utilisables par les acteurs de terrain (Instituts techniques et Chambres d'Agriculture en particulier) devrait permettre d'élargir la gamme et la représentativité des références disponibles (§ 2.1). L'utilisation des tests de stabilité d'agrégats par la méthode développée à l'INRA d'Orléans constitue également une alternative plus légère pour évaluer l'efficacité de mesures agronomiques alternative comme les techniques sans labour (TSL) (§ 2.2).

Des informations précises sur les coûts de mise en œuvre de ces mesures anti-érosives, ainsi que sur certains coûts de l'érosion, ont été pour la première fois rassemblées, à partir d'études de cas et d'enquêtes de terrain auprès des agriculteurs et des collectivités (§ 3.1 et 3.2). Les exemples présentés indiquent qu'il existe une grande variété de situations du point de vue des coûts et de la faisabilité de ces mesures. Une étude plus approfondie des conditions et facteurs agronomiques et socio-économiques de faisabilité de mise en œuvre de ces mesures est en cours dans le cadre d'un autre projet soutenu par l'appel d'offre Gessol (V. Souchère).

Nous avons montré qu'il était possible de réaliser avec les outils développés, pour des situations simplifiées, un couplage des simulations de l'efficacité de mesures anti-érosives avec la modélisation de leur bilan économique pour une rotation à l'échelle d'un versant ou d'un petit bassin versant (§ 4.1 et 4.2).

Les deux zones d'étude, Pays de Caux et Lauragais, correspondent à deux modèles différents du point de vue des interactions spatiales entre unités fonctionnelles et unités décisionnelles : des bassins versants élémentaires occupés par plusieurs parcelles appartenant à différents agriculteurs dans le premier cas, des versants entièrement gérés par un seul agriculteur dans le second cas. Ces deux types de situation vont donc probablement nécessiter des modalités différentes de mise en œuvre des démarches de maîtrise de l'érosion des sols qui restent à explorer.

En conclusion, on peut donc avancer qu'une aide à la lutte contre l'érosion devrait permettre de réduire les dégâts par la mise au point d'une façon de produire respectueuse des sols agricoles, dans des conditions économiquement intéressantes pour la société. Le risque nul n'existe cependant pas et les mesures envisagées ont pour effet de réduire la fréquence et l'intensité des dégâts. Néanmoins, en cas d'érosion en situation de catastrophe naturelle, l'existence prochaine de primes différenciées selon l'importance du risque de catastrophe naturelle va rendre la prévention érosive essentielle.

En conséquence et dans tous les cas, l'incitation à la prévention érosive va ainsi être de plus en plus forte (projet de loi « prévention des risques technologiques et naturels » en cours) et la demande en technique anti-érosive, intéressante sur le plan économique, de plus en plus grande.

## Références bibliographiques

- Agri Obtention, (2002). Contrat de licence sur savoir faire entre Agri-Obtention S.A. et JPCL SARL portant sur la fabrication d'appareil de mesure du ruissellement sur la base des travaux menés conjointement par P. Martin (UMR 1048) et Y. Pivain (Chambre d'agriculture de l'Eure). 19 pages.
- Belotte D., Foray S. (2003). Vers une mise en réseau des références techniques sur le ruissellement en Haute-Normandie : proposition d'actions pour améliorer le traitement, l'organisation et la valorisation des données recueillies. Mémoire de projet d'ingénieur de l'INA P-G. 33 pages + annexes.
- Bonn F., (1998). La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. Cahier sécheresse, volume 9, numéro 3, p 185 – 192.
- Bruno, J.-F., et Fox, D.M., (2003). L'érosion hydrique dans les côteaux du Sud-Ouest : un processus dépendant du relief, des orages de printemps et des techniques culturales. In: Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux. P. Monestier, S. Lardon, B. Seguin (eds). Sciences Update, Editions INRA.
- Cerdan O.; V. Souchère; V. Lecomte ; A. Couturier ; Y. Le Bissonnais (2001). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model: STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management). Catena, 46, 189-205.
- Cerdan O.; Y. Le Bissonnais; V., Souchère; P., Martin, V., Lecomte. (2002). Sediment concentration in interrill flow : interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. Earth Surface Processes and Landforms. 27, 193-207.
- Cerdan O., Y. Le Bissonnais, A., Couturier, N. Saby (2002). Modelling interrill erosion processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM. Hydrological Processes. 16, 3215-3226.
- Cerdan O., Y. Le Bissonnais, A. Couturier, H. Bourennane, V. Souchère (2002). Rilling processes on cultivated hillslope during two extreme events. Soil and Tillage Research. 67, 99-108.
- Chalat, M., (2001). Analyse, modélisation, et simulation de l'érosion hydrique sur de petits bassins versants cultivés de Haute Normandie. Mémoire DESS Géomatique, Orléans.
- Charruyer S., (1996). Erosion hydrique et pratiques culturales, mémoire de fin d'études ISA, INRA-SAD Toulouse et ISA, 52 p.
- Deletic, A., (2001). Modelling of water and sediment transport over grassed areas. Journal of Hydrology, 248, 168-182.
- Desta Tadesse, L., et Morgan, R.P.C., (1996). Contour grass strips: a laboratory simulation of their role in erosion control using live grasses. Soil Technology, 9, 83-89.
- Dubreuil N. (2001). Utilisation régionale d'un modèle de ruissellement : STREAM. Mémoire DESS Géomatique, Orléans.
- Dubreuil N., King C., Lecomte V., Souchère V., Le Bissonnais Y., Crosnier M., Germain M. (2002). "Réduire le ruissellement excessif à l'échelle des bassins versants : utilisation d'un outil d'intelligence territoriale pour diagnostiquer les risques et simuler les mesures correctives possibles". 3eme séminaire Cartographie et prévention du Risque, MATE avril 2002.
- Elyakime B., (2000), L'érosion des terres agricoles et sa gestion préventive : un cadre d'action collective et interactive, Région et Développement, 12, 105-120.
- Elyakime B. et J.F. Bruno, (2000), Gestion de la lutte contre une érosion de versant avec dégâts sur site public, Economie Rurale, 05-06, 67-77.
- Elyakime B., (2001), Gestion d'actions anti-érosives : conditions et interprétations, Société Française d'Economie Rurale, Face au droit rural et à ses pratiques, Une approche conjointe des économistes, des juristes et des sociologues, Editions L'Harmattan, 321-330.
- Gentils S. (2000). Aspects économiques de la lutte contre l'érosion. Mémoire de stage 2ème année INA-PG.
- Emama Ligdi, E., et Morgan, R.P.C., 1995. Contour grass strips: a laboratory simulation of their role in soil erosion control. Soil Technology, 8, 109-117.
- Fox G., Umali G., T. Dickinson, (1995). An Economic Analysis of Targeting Soil Conservation Measures with Respect to Off-site Water Quality, Canadian Journal of Agricultural Economics, n° 43, pp. 105-118.
- Govindasamy R., W. Huffman, (1993). Efficiency of US Conservation-compliance Program, Agricultural Economics, n° 8, pp. 173-185.
- Hayes, J.C., Barfield, B.J., et Barnhisel, R.L., (1984). Performance of grass filters under laboratory and field conditions. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 27, 1321-1331.
- Hebra, N. (2002), Gestion durable des sols cultivés : intérêt des techniques culturales simplifiées dans l'amélioration de la qualité des sols, DESS Environnement en milieu rural, ENSA Toulouse.
- Hudson NW. (1993). Field measurement of soil erosion and runoff. Field measurement of soil erosion and runoff". FAO Soils Bulletin 68, 1993, 139p.
- King C. , Lecomte V. , Le Bissonnais Y. , Baghdadi N., Souchère V. , Cerdan O. (2003). "Use of remote sensing data as alternative inputs in the "stream" runoff model » Catena, in press.
- Klein E., (1997). Les processus de l'érosion hydrique dans les coteaux du Sud-Ouest. Mémoire de fin d'études. ENSA – INRA Toulouse, 50 p + annexes.

- Lecomte V., O. Cerdan et Y. Le Bissonnais (2003). Effect of vegetated filter strips on runoff and erosion. *Agronomie*. In press.
- Le Bissonnais Y., C. Montier, J. Daroussin and D. King. (1998). Cartographie de l'aléa érosion des sols en France. IFEN, Collection Etudes et travaux, n°18. 63p + CD rom.
- Le Bissonnais Y., C. Montier, M. Jamagne, J. Daroussin, D. King (2001). Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220.
- Le Bissonnais, Y., O. Cerdan, V. Lecomte, H. Benkhadra, V. Souchère, P. Martin (2003). Spatial and temporal variability of soil surface characteristics influencing infiltration, runoff and interrill erosion of cultivated fields. *Catena*. In press.
- Lebrun P. (2000). Evaluation technico-économique des mesures anti-érosives installées sur un versant du Lauragais. Mémoire de stage ENSAT.
- Lecour A. (2000). Caractérisation de la sensibilité à l'érosion des bassins versants à l'échelle régionale (Haute-Normandie). Mémoire de DEA Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale, Jussieu.
- Legout C. (2001). Mise au point, suivi et mise en relation de dispositif régionaux de mesure du ruissellement et de l'érosion diffuse. Mémoire de fin d'étude ESITPA, Rouen.
- Ludwig B., (1992). L'érosion par le ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de Doctorat, Université L. Pasteur, Strasbourg I, 201 p.
- Mangenot B., (2002). Organisation des structures concernées par les mesures de ruissellement en Haute Normandie et rédaction d'un guide technique sur la mise en place et le suivi de ces mesures. Mémoire de 2ème année de l'INA P-G. 17 pages + annexes.
- Martin P., Joannon A., Souchère V., Papy F. (2001). Management of soil surface characteristics for soil and water conservation. COST meeting on "The significance of Soil Surface characteristics in soil erosion", Strasbourg, September 2001.
- Martin P., C. Legout, O. Planchon, Y. Le Bissonnais. (2002). Building a network for runoff-data production in Upper-Normandy (France): socio-technical aspects. COST meeting on Socio-economic factors of water erosion, Bruxelles, mars 2002.
- Morschel J. Dégâts de l'érosion hydrique dans le Lauragais : caractérisation topographique. Mémoire de Maîtrise, UNSA, UMR 6012 « ESPACE », 2000. 75 p + annexes.
- Morschel J. L'érosion hydrique dans le Lauragais : méthode de cartographie de l'aléa érosif. Mémoire de DEA, UNSA, UMR 6012 « ESPACE », 2001. 15 p.
- Morschel J., Fox D., Bruno J-F. (2001). Topographic controls on off-site soil deposition and implication for erosion control strategies. Article soumis à la revue *Transactions of the American Society of Engineers*.
- Morschel J., Fox D. (2001). L'érosion hydrique dans le Lauragais : méthode de cartographie de l'aléa érosif. Article soumis à la revue *Etude et Gestion des Sols*.
- Munoz-Carpena, R., Parsons, J.E., et Gilliam, J.W., (1999). Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology*, 214, 111-129.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., et Yoder, D.C., (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, vol. 703. USDA, Washington, D.C..
- Revel J-C, Rouaud M., (1985). Mécanismes et importance des remaniements dans le terrefort toulousain (Bassin Aquitain, France). *Pédologie* XXXV-2, p 171 – 189.
- SICOVAL Toulouse Sud-Est, Chambre d'agriculture de la Haute-Garonne, (2000). Protection raisonnée du ruisseau du Tissié. Fonds de gestion de l'espace rural, 27 p + annexes.
- Souadi T., King C., Le Bissonnais Y. (2000). Cartographie de l'aléa érosion des sols en région Haute Normandie. BRGM/RP 50454FR, 95 p.
- Souchère, V., Cerdan, O., Ludwig, B., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Papy, F. (2002). Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments. *Catena*, 50: 489-505.
- Souchère V., C. King, N. Dubreuil, V. Lecomte-Morel, Y. Le Bissonnais, M. Chalot. (2003). Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. *Environmental Science & Policy*, 6: 7-16.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Govers, G., Gillijns, K., Van Rompaey, A., et Van Oost, K., 2003. Integrating science, policy and farmers to reduce soil loss and sediment delivery in Flanders, Belgium. *Environmental Science and Policy*, 6, 95-103.
- Vought, L. B.-M., Pinay, G., Fuglsang, A., et Ruffinoni, C., 1995. Structure and function of buffer strips from a water quality perspective in agricultural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 31, 323-331.





## **Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés** *phénomènes physiques et dispositifs d'action*

### **Résumé :**

Les résultats présentés dans ce rapport montrent qu'on dispose aujourd'hui d'outils de modélisation pour évaluer les risques d'érosion à plusieurs échelles :

- au niveau régional, les modèles présentés permettent de hiérarchiser les zones à risque et de porter un diagnostic sur les principaux facteurs en cause dans les deux régions étudiées : Pays de Caux et Lauragais (§ 1.1 et 1.2) ;

- au niveau des bassins versants élémentaires le modèle STREAM, développé en partie dans le cadre de ce projet (§ 4.1), permet de simuler et tester numériquement l'efficacité des mesures anti-érosives possibles sur un bassin versant, à partir des références expérimentales acquises sur le terrain.

La connaissance effective de l'efficacité de ces mesures dans différentes conditions géographiques est limitée par le petit nombre de références expérimentales disponibles à ce jour. Des dispositifs standardisés de mesure du ruissellement, utilisables par les acteurs de terrain, ont été mis au point dans le cadre de ce projet. Ils devraient permettre d'élargir la gamme et la représentativité des références disponibles (§ 2.1). L'utilisation des tests de stabilité d'agrégats par la méthode développée à l'INRA d'Orléans constitue également une alternative plus légère pour évaluer l'efficacité de mesures agronomiques alternative comme les techniques sans labour (TSL) (§ 2.2).

Des informations précises sur les coûts de mise en œuvre de ces mesures anti-érosives, ainsi que sur certains coûts de l'érosion, ont été pour la première fois rassemblées, à partir d'études de cas et d'enquêtes de terrain auprès des agriculteurs et des collectivités (§ 3.1 et 3.2). Les exemples présentés indiquent qu'il existe une grande variété de situations du point de vue des coûts et de la faisabilité de ces mesures. Une étude plus approfondie des conditions et facteurs agronomiques et socio-économiques de faisabilité de mise en œuvre de ces mesures est en cours dans le cadre d'un autre projet soutenu par l'appel d'offre Gessol (V. Souchère).

Nous avons montré qu'il était possible de réaliser avec les outils développés, pour des situations simplifiées, un couplage des simulations de l'efficacité de mesures anti-érosives avec la modélisation de leur bilan économique pour une rotation à l'échelle d'un versant ou d'un petit bassin versant (§ 4.1 et 4.2).

Les deux zones d'étude, Pays de Caux et Lauragais, correspondent à deux modèles différents du point de vue des interactions spatiales entre unités fonctionnelles et unités décisionnelles : des bassins versants élémentaires occupés par plusieurs parcelles appartenant à différents agriculteurs dans le premier cas, des versants entièrement gérés par un seul agriculteur dans le second cas. Ces deux types de situation vont donc probablement nécessiter des modalités différentes de mise en œuvre des démarches de maîtrise de l'érosion des sols qui restent à explorer.

En conclusion, et dans une perspective de développement d'une agriculture durable et respectueuse de l'environnement, on peut avancer qu'une aide à la lutte contre l'érosion devrait permettre de réduire les dégâts par la mise au point de modes de production préservant les sols agricoles, dans des conditions économiquement intéressantes pour la société. Dans tous les cas, l'incitation à la prévention érosive devrait être de plus en plus forte (projet de loi « prévention des risques technologiques et naturels » en cours) et la demande en technique anti-érosive de plus en plus grande.