



HAL
open science

Spatial coordination of cropping systems to control ecological processes. Case study of runoff in agricultural catchment basins of the Pays de Caux, France.

Alexandre Joannon

► To cite this version:

Alexandre Joannon. Spatial coordination of cropping systems to control ecological processes. Case study of runoff in agricultural catchment basins of the Pays de Caux, France.. Life Sciences [q-bio]. INAPG (AgroParisTech), 2004. English. NNT : 2004INAP0018 . pastel-00001257v2

HAL Id: pastel-00001257

<https://pastel.hal.science/pastel-00001257v2>

Submitted on 31 May 2005

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

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



UMR SAD-APT

Thèse de doctorat
de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

Discipline : Agronomie

présentée par

Alexandre JOANNON

**Coordination spatiale des systèmes de culture
pour la maîtrise de processus écologiques**

**Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles
du Pays de Caux, Haute-Normandie**

Soutenue publiquement le 11 mars 2004 devant le jury composé de :

Thierry DORE
Anne-Véronique AUZET
Jacques CANEILL
Daniel DELAHAYE
Laurent DOBREMEZ
Katharina HELMING
Véronique LECOMTE
François PAPY

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse



REMERCIEMENTS

Bien qu'un seul nom figure sur la première page de cette thèse, elle est loin d'être le résultat d'un travail individuel. Trois groupes de personnes ont particulièrement contribué à cette thèse, chacun à leur manière, mais chaque contribution fut essentielle.

Ce fut bien entendu mon trio d'encadrants François Papy, directeur de thèse à l'origine du projet, et qui a toujours gardé son optimisme malgré les aléas du calendrier, Véronique Souchère et Philippe Martin, co-encadrants qui avaient écumé le Pays de Caux quelques années auparavant pour leur propre thèse. Ils m'ont, chacun à leur manière, guidé durant ces trois longues années afin que je ne me perde pas parmi les multiples idées qui germaient autour de mon sujet de thèse. Véronique, qui avait le double inconvénient de n'être ni jeune retraitée ni enseignante, fut très sollicitée pour répondre à mes innombrables interrogations ; j'ai usé et abusé de sa grande disponibilité !

Un sujet et des encadrants scientifiques c'est bien, mais sans terrain, soit dans mon cas, sans agriculteurs à enquêter, je n'aurais pas produit grand chose. Je remercie ici tous les agriculteurs du bassin versant de Bourville qui ont bien voulu me recevoir, une, deux, trois voire quatre fois pour certains. Je les remercie également par avance pour d'éventuelles sollicitations à venir...

Et puis, il y a eu le soutien constant de la famille proche malgré toutes les contraintes que j'imposais petit à petit : vacances décalées, puis pas de vacances et pour finir pas de week-end ; décharge des tâches ménagères ; mauvaise humeur... Gwenaëlle fut d'abord seule pendant deux ans ; puis Agathe la seconda la dernière année. Sans elles, je ne suis pas certain que je serais arrivé au bout du projet, l'envie de tout arrêter et d'envoyer l'ordinateur par la fenêtre revenant chroniquement. Gwenaëlle ne trouvait pas cela très raisonnable, elle a eu raison au final ! Agathe fut une très grande motivation pour écrire efficacement : au lieu de rêver à de futures vacances devant l'écran les samedi et dimanche, j'écrivais avec acharnement afin de rentrer le plus vite possible pour la promener et jouer avec elle!

Pour réaliser cette thèse, j'ai également bénéficié d'échanges scientifiques variés. Ce fut le cas au cours des réunions du comité de pilotage. Je remercie Jean-Marie Attonaty, Jacques Baudry, Jean-Eudes Beuret, Daniel Delahaye, Thierry Doré, Bénédicte Lapierre,

Yves Le Bissonnais, Véronique Lecomte, Jean-Marc Meynard, Jean-François Ouvry et Pascal Thinon d'avoir bien voulu participé à ces rencontres. Durant toute la durée de la thèse, le projet inter-unité FORTE a également permis de riches discussions avec les équipes du SAD Armorique, Mirecourt et Saint Laurent de la Prée, en particulier les participants aux groupes 2 : Marc Benoit, Mathieu Capitaine, Catherine Mignolet, Francesca di Pietro, Eric Kerneis, Yves Pons et Claudine Thenail.

L'équipe des Sciences du sol d'Orléans fut également très efficace : bien que je ne sois jamais allé à Orléans, par l'intermédiaire de Véronique, différentes personnes ont contribué à cette thèse. En particulier, Alain Couturier a mis le turbo pour qu'une première version de STREAM sur ArcView soit disponible à temps pour réaliser les simulations. Je les en remercie tous, et c'est promis, j'irai faire un tour à Orléans cet été ! Merci aussi à l'AREAS où j'ai pu bénéficier d'un ordinateur entre deux enquêtes, et à Jean-Baptiste Richet qui s'est toujours montré disponible pour m'envoyer les données pluviométriques.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour leur disponibilité et l'attention qu'ils ont portée à mon travail, même lorsque le français n'était pas leur langue favorite.

Une thèse c'est également plus facile à achever lorsque l'ambiance de travail est conviviale... et ce fut le cas. Merci à l'ensemble des collègues et plus spécialement aux ex-Versillais Anne, Antoine, Aurélie, Camille, Carole, Claudien, Damien, Florence, Hervé, Laurence, Michelle, Monique, Pascal, Sophie, Sylvie, les deux Véronique et Ward pour les rigolades, pots d'anniversaire, de réussite, de départ, gâteaux du matin, parties de tennis et de badmington, etc. Mention spéciale à Aurélie qui a dû me supporter pendant deux ans à Versailles (et inversement, ça dépendait des jours) et à Ward qui rendait Grignon moins morose les samedi et dimanche.

Enfin de sincères remerciements pour toutes celles et ceux qui ont été mobilisés durant les 6 derniers mois et surtout le dernier : François, Véronique et Philippe pour leur relecture rapide et néanmoins pertinente ; Gwenaëlle qui a grandement contribué à la clarté de ce qui suit ; Ward pour la traduction du résumé en anglais ; Anne pour la vérification de la bibliographie ; Mamie Denise et Mamig Julie, Jean-Christophe et Véronique (Souchère...encore elle !) venus garder Agathe le samedi et dimanche lorsque j'obligeais Gwenaëlle à venir travailler à Grignon ; la famille Guisquet pour la touche finale : les deux Gildas et Martine pour la relecture et René pour la réalisation d'un schéma.

SOMMAIRE

LISTE DES SIGLES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 : Maîtrise du ruissellement érosif à l'échelle d'un petit bassin versant agricole : problématique..... 5

CHAPITRE 2 : Couplage de deux échelles d'étude, le bassin versant et l'exploitation agricole : méthodologie..... 42

CHAPITRE 3 : Diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif..... 78

CHAPITRE 4 : Analyse de la constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole 116

CHAPITRE 5 : Réduire le ruissellement érosif en modifiant les systèmes de culture à l'échelle du bassin versant..... 155

CHAPITRE 6 : Synthèse et perspectives 190

CONCLUSION..... 211

BIBLIOGRAPHIE 215

TABLES DES FIGURES ET DES TABLEAUX..... 227

ANNEXES..... 231

TABLE DES MATIERES

SIGLES & UNITES

Sigles officiels

AESN : Agence de l'eau Seine-Normandie
AREAS : Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols
CEMAGREF : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
CUMA : Coopérative d'utilisation de matériel agricole
INAP-G : Institut national agronomique Paris-Grignon
INRA : Institut national de la recherche agronomique
LISEM : Limburg soil erosion model
OGM : Organisme génétiquement modifié
ONIC : Office national interprofessionnel des céréales
OTELLO : Organisation du travail et langage objet
PAC : Politique agricole commune
SAU : Surface agricole utile
SIG : Système d'information géographique
STREAM : Sealing and Transfer by runoff and erosion related to agricultural management
TCRP/logit : Tillage-controlled runoff pattern model / Logistic model
TCS : Techniques culturales simplifiées
UE : Union européenne
UMR SAD-APT : Unité mixte de recherche
SAD-APT : Système agraire et développement « Activités, Produits et Territoires »
UR : Unité de recherche
UTA : Unité de travail agricole
WATEM : Water and tillage erosion model

Sigles créés pour les besoins de l'étude

BF : betterave fourragère
Bilan RI : bilan ruissellement / infiltration
BS : betterave sucrière
BV : bassin versant
COL : colza
DE : durée efficace
DR : durée réelle

ESC : escourgeon
Ii : intensité instantanée
Im : intensité moyenne
Inf : capacité d'infiltration
ME : maïs ensilage
MO : main d'œuvre
P48 : pluie antécédente, durant les 48 heures précédant un événement pluvieux donné
PC : hauteur de pluie cumulée
PDT : pomme de terre
Pi : pluie d'imbibition
Réseau PDT : réseau d'écoulement du ruissellement « pomme de terre »
Réseau topo : réseau d'écoulement du ruissellement topographique
Réseau TP : réseau d'écoulement du ruissellement « travail-pente »
RGA : ray grass anglais
SBV : sous bassin versant
Sh : série hivernale
Sp : série printanière
TL : terre labourable

Unités

cm : centimètre
h : heure
ha : hectare
kg : kilogramme
km² : kilomètre carré
min : minute
m² : mètre carré
m³ : mètre cube
mm : millimètre
sec : seconde
t : tonne

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le concept de système de culture a été défini comme étant « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une portion de territoire traitée de manière identique ; chaque système de culture se caractérise par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à chacune de ces cultures » (Sebillotte, 1990), c'est à dire « l'enchaînement logique et ordonné des opérations culturales appliquées à une culture en vue d'en obtenir une production » (Sebillotte, 1974). Ce concept traduit la cohérence entre les différentes opérations culturales appliquées successivement sur une parcelle. Le système de culture est donc un système d'action. Aussi, permet-il d'analyser l'effet de ces actions sur la production ou sur le milieu, et à partir des effets constatés de remonter aux actions causales possibles.

Les agronomes utilisent le concept de système de culture pour faire des diagnostics sur la conduite des cultures à l'échelle parcellaire dans une optique de production (Doré *et al.*, 1997), mais également dans un but environnemental (Martin et Meynard, 1997). Sur la base de ces diagnostics, les agronomes conçoivent de nouveaux systèmes de culture, en particulier pour limiter les effets environnementaux négatifs qu'ils mettent en évidence (Meynard, 1985 ; Vereijken, 1997). Pour qu'ils soient adoptés par les agriculteurs, ces nouveaux systèmes de culture doivent être compatibles avec les facteurs de production des exploitations et les objectifs de production des agriculteurs (Capillon et Caneill, 1987). En effet, au sein de l'exploitation, l'agriculteur répartit ses facteurs de production, qui sont limités, entre les différents systèmes de culture (Papy et Lelievre, 1979 ; Papy, 2001). Ainsi, parce que c'est bien un système d'action, le concept de système de culture permet de reconstituer les décisions qui, au sein de l'exploitation agricole, sont à l'origine de ces actions (Aubry *et al.*, 1998). Il est alors possible de conduire un deuxième type de diagnostic qui consiste à comprendre comment sont construits les systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole afin d'en déduire les possibilités effectives de modifications (Landais et Deffontaines, 1988 ;

Sebillotte et Soler, 1990), autrement dit les marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture.

Réaliser des diagnostics environnementaux des systèmes de culture nécessite d'évaluer ces derniers à l'échelle d'entités spatiales pertinentes pour les processus écologiques. Quatre exemples d'entités spatiales pertinentes :

- le bassin d'alimentation du captage dans le cas de la pollution azotée d'un captage d'eau potable (Benoît *et al.*, 1997) ;
- le bassin versant dans celui de l'érosion par ruissellement concentré (Papy *et al.*, 1992) ;
- la petite région dans l'étude des flux de gènes d'organismes génétiquement modifiés (OGM), du fait de la dispersion du pollen ou de graines transgéniques (Colbach *et al.*, 2001b) ;
- des espaces vastes et continus dans l'étude des paysages (Baudry *et al.*, 2000).

Tous ces espaces d'étude sont continus et englobent différents systèmes de culture. Par conséquent, l'impact de ces derniers sur les processus écologiques ne peut être étudié par système de culture individuel sur une portion d'espace (parcelle isolée ou groupe de parcelles). Il doit l'être à l'échelle de l'entité spatiale adéquate à l'analyse du processus écologique concerné, entité qui regroupe l'ensemble des systèmes de culture qui y sont pratiqués.

Modifier des systèmes de culture au sein des exploitations agricoles afin de maîtriser des processus écologiques requiert donc au préalable un double diagnostic, chacun d'eux étant pratiqué à une échelle qui lui est spécifique : l'un pour juger l'effet des systèmes de culture à l'échelle de l'entité spatiale d'étude du processus écologique, l'autre pour identifier les marges de manœuvre à partir de l'étude des déterminants des systèmes de culture à l'échelle des exploitations agricoles. Les résultats issus de ces diagnostics permettent ainsi de proposer des modifications améliorant la situation environnementale et compatibles avec le fonctionnement technique des exploitations.

De surcroît, certains processus écologiques résultent de transferts latéraux entre parcelles voisines. C'est le cas par exemple de l'érosion par ruissellement concentré et de la dissémination des gènes d'OGM ; ce n'est pas celui de la pollution azotée des nappes phréatiques quand elle est uniquement la conséquence de transferts verticaux des parcelles vers la nappe, transferts en outre indépendants d'une parcelle à l'autre. La régulation des processus écologiques qui se caractérisent par des transferts latéraux impose une coordination spatiale des systèmes de culture au sein d'une même exploitation et bien souvent entre exploitations voisines. En effet, les espaces sur lesquels se développent ces processus sont généralement exploités par plusieurs agriculteurs.

Considérant le cas de processus écologiques avec transferts latéraux entre parcelles voisines, nous nous proposons d'élaborer une méthodologie qui permette de concevoir des modifications des systèmes de culture au sein des exploitations agricoles, tout à la fois :

- efficaces vis-à-vis de la maîtrise du processus écologique ;
- compatibles avec le fonctionnement technique des exploitations agricoles ;
- organisées spatialement sur l'entité spatiale d'analyse du processus écologique.

Le processus d'érosion hydrique dans les plaines limoneuses du nord de l'Europe est particulièrement pertinent pour notre sujet. En effet, dans ces régions, l'érosion est principalement le résultat d'une accumulation d'eau de ruissellement à l'amont des bassins versants, qui se concentre dans des dépressions et provoque ainsi des départs de terre plus à l'aval sous forme de rigoles et de ravines (Auzet, 1987). Le ruissellement se concentre par des transferts latéraux de parcelles en parcelles et les dégâts se produisent donc fréquemment sur des parcelles différentes de celles à l'origine du ruissellement. L'entité spatiale d'analyse de ce processus écologique est le bassin versant, et sa maîtrise passe par une organisation spatiale des solutions sur les différentes parcelles qui le composent. L'érosion hydrique a fait l'objet de nombreux travaux sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour mener à bien notre étude. Le choix de ces régions est d'autant plus judicieux que ce processus y pose de nombreux problèmes. Il en pose peu à court terme sur le territoire agricole car la perte en terre est faible par rapport à l'épaisseur des sols de ces régions. En revanche, il en pose sur le territoire non agricole où les dommages sont bien plus préjudiciables : coulées boueuses endommageant le bâti (maisons de particuliers, bâtiments publics, entreprises, etc.), sédimentations sur les routes nécessitant de multiples nettoyages, pollution des captages d'eau potable par les matières en suspension et les polluants associés. Les conséquences peuvent aller jusqu'au décès de personnes emportées par les coulées boueuses (Delahaye et Hauchard, 1998). La maîtrise de ces coulées boueuses est donc un enjeu prioritaire dans les régions concernées. Des aménagements peuvent être réalisés pour limiter les dommages à l'aval, mais ceux-ci s'avèrent coûteux et leur pérennité est remise en cause par les fréquents dépôts de sédiments. Une maîtrise complémentaire par les pratiques agricoles apparaît dès lors nécessaire et c'est dans cette optique opérationnelle que s'inscrit notre travail.

Notre mémoire est structuré en six chapitres. Les deux premiers sont consacrés à la problématique et à la méthodologie mise en oeuvre :

1. Dans le premier, nous expliquons les processus élémentaires de l'érosion hydrique à l'origine des catastrophes de types coulées boueuses. Nous mettons en évidence les déterminants agricoles et nous envisageons les possibilités de maîtrise par les pratiques agricoles, en complément des aménagements. Ensuite, nous montrons que limiter le ruissellement érosif par les pratiques agricoles n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement technique des exploitations agricoles, ce qui est rarement étudié. Notre problématique est alors exposée, elle découle des différents points mis en évidence.

2. Dans le second chapitre, nous présentons les outils et concepts utilisés pour notre étude ainsi que la démarche d'analyse que nous avons élaborée pour répondre à notre objectif. Nous présentons également le dispositif d'étude, à savoir le choix de la région et du bassin versant analysé.

Les trois chapitres suivants correspondent aux trois étapes de l'étude :

3. Le troisième chapitre est consacré à un premier diagnostic, celui de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif à l'échelle parcellaire et à l'échelle du bassin versant. Il s'appuie sur des connaissances acquises à l'échelle parcellaire qu'il précise et sur une étude de la structure des événements pluvieux.

4. Le deuxième diagnostic fait l'objet du quatrième chapitre. En remontant aux déterminants des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole, il permet de discuter des marges de manœuvre pour les modifier.

5. Enfin, la troisième étape de notre analyse est présentée dans le cinquième chapitre. Sur la base des deux diagnostics précédents, nous recherchons de nouvelles organisations spatiales des systèmes de culture au sein du bassin versant permettant de réduire le ruissellement sans perturber le fonctionnement des exploitations.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à une discussion ; il revient sur l'objectif de la thèse :

6. Il s'agit d'évaluer dans quelle mesure la méthodologie que nous proposons est efficace d'un point de vue environnemental. Nous discutons aussi du caractère opérationnel de la méthodologie et de son intérêt pour la maîtrise d'autres processus environnementaux portant sur des territoires continus et impliquant une coordination spatiale des systèmes de culture.

CHAPITRE 1

**Maîtrise du ruissellement érosif
à l'échelle d'un petit bassin versant agricole
Problématique**

Chapitre 1 : Maîtrise du ruissellement érosif à l'échelle d'un petit bassin versant agricole : problématique

La première partie est consacrée à une analyse bibliographique des processus d'érosion hydrique des sols dans la ceinture loessique du nord de l'Europe, et de leurs liens avec l'activité agricole. Il en ressort qu'il est possible et nécessaire d'agir sur les pratiques agricoles pour maîtriser l'érosion.

Dans la deuxième partie, nous mettons en évidence qu'au sein des exploitations agricoles, il existe différentes contraintes à la mise en oeuvre d'actions destinées à maîtriser l'érosion des sols par les pratiques agronomiques ; il apparaît essentiel de les prendre en considération. Dans cette partie, nous analysons aussi la manière dont est généralement abordé le problème de la maîtrise de l'érosion par les pratiques agricoles dans les travaux de recherche en cours. A travers cet état des lieux, nous mettons en évidence que les contraintes inhérentes au fonctionnement des exploitations sont rarement prises en compte.

C'est en fin de chapitre que nous posons la problématique de notre étude à partir d'une synthèse des conclusions précédemment émises.

1 Bilan des connaissances sur l'érosion hydrique des sols et des moyens de maîtrise dans les régions de grande culture du nord de l'Europe

Nous décrivons ici les mécanismes physiques de l'érosion hydrique et les dégâts qui en découlent ainsi que les facteurs déterminants de ces phénomènes. En particulier, nous détaillons l'effet des activités agricoles qui sont au cœur de ce travail de thèse. Nous exposons alors la logique des différents types de solutions actuellement mises en oeuvre pour limiter les préjudices occasionnés par l'érosion des sols, et motivons notre choix de travailler sur la maîtrise par le biais des pratiques agricoles.

1.1 Les systèmes érosifs : mécanismes et dégâts occasionnés

L'érosion hydrique résulte de la conjugaison de trois mécanismes qui sont le détachement des particules de terre, leur transport et leur sédimentation. Comprendre ces mécanismes fondamentaux et les formes d'érosion associées est un préalable nécessaire à l'exposé des déterminants spécifiques à l'érosion rencontrée dans les plaines loessiques du nord de l'Europe. Nous nous y attachons avant de présenter les différents types de dégâts que l'érosion hydrique des sols provoque ainsi que leur ampleur respective, afin de montrer combien il est capital de réguler ce processus.

1.1.1 Principes fondamentaux

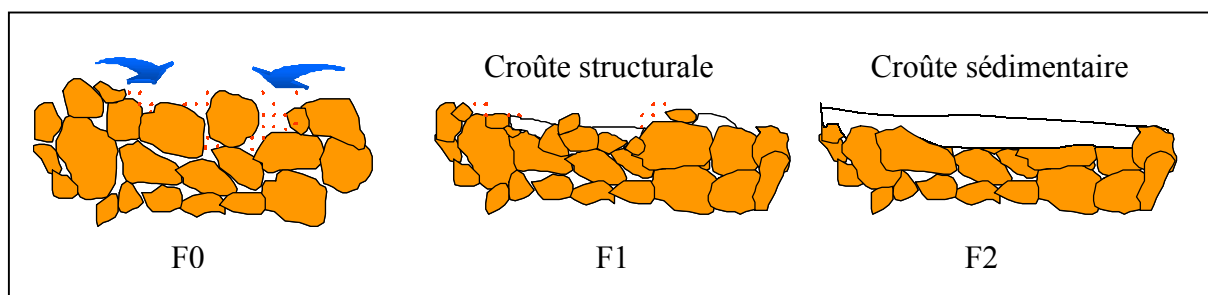
Le processus de détachement des particules de terre est la conséquence de deux phénomènes :

- l'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol qui détache des particules de terre suivant différents mécanismes : dispersion physico-chimique, éclatement, désagrégation mécanique et microfissuration par gonflement différentiel (Le Bissonnais et Gascuel-Oudou, 1998). Le rapport entre l'érosivité des gouttes de pluie et la résistance des agrégats du sol détermine s'il y a détachement ou non ;
- l'action mécanique du ruissellement qui peut arracher sur son passage des particules de terre. Ce processus dépend de la force de cisaillement du ruissellement et de la résistance du sol. Plus la vitesse d'écoulement est grande, plus la force de cisaillement est élevée.

Une fois détachées, les particules de sols sont transportées sur une distance plus ou moins grande. C'est le processus de transport qui fait également intervenir deux phénomènes :

- Le rejaillissement par lequel les particules détachées lors de l'impact des gouttes de pluie sur le sol, peuvent être transportées sur une très courte distance (Peyre, 1982) ;
- L'écoulement du ruissellement qui entraîne des particules de terre. Ce second phénomène est le plus important, si nous considérons la distance de transport des particules. Deux types de ruissellement coexistent : le ruissellement de sub-surface dû à la présence d'un horizon imperméable sous la surface du sol, et le ruissellement de surface. Ce dernier résulte soit d'un refus d'infiltration à la surface du sol - c'est le ruissellement hortonien - soit d'un dépassement de la capacité de stockage du sol - c'est le ruissellement par saturation du sol. Dans les deux cas, le ruissellement de surface ne se déclenche que si la capacité de stockage dans les micro-dépressions formées à la surface du sol par les mottes de terre est saturée (Le Bissonnais et Gascuel-Odoux, 1998).

Le ruissellement hortonien est souvent la conséquence de la formation d'une croûte de battance qui ferme la surface du sol. La croûte se forme en deux étapes (Boiffin, 1984 - Figure 1). Tout d'abord, les gouttes de pluie désagrègent les agrégats de la surface du sol et redistribuent les particules détachées dans les creux, entraînant ainsi l'apparition d'une croûte structurale. Lors des pluies suivantes, des flaques apparaissent ; elles mettent en suspension les fragments détachés qui, en se déposant, forment une croûte sédimentaire pouvant atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur. La capacité d'infiltration est fortement diminuée, passant de 30-50 mm/h pour l'état initial (lit de semence par exemple), à 5-30 mm/h pour la croûte structurale et à 1-2 mm/h pour la croûte de battance (Boiffin *et al.*, 1988). Une autre conséquence de la croûte de battance est l'uniformisation de la surface du sol, qui aplanit la rugosité de surface.



**Figure 1 : Formation de la croûte de battance
(d'après Boiffin, 1984 dans Lecomte, 1999)**

La combinaison de ces deux processus, détachement et transport, aboutit à différents cas de figure :

- érosion sur de petites distances lorsque le détachement et le transport se font uniquement sous l'effet des gouttes de pluie, il s'agit de l'effet « splash »,
- érosion sur de longues distances lorsque le transport et le détachement par écoulement du ruissellement intervient. A noter qu'il ne peut pas y avoir détachement sans transport, la vitesse critique de transport étant inférieure à la vitesse critique de détachement (Auzet, 1987).
- ruissellement seul lorsque la résistance du sol à l'arrachement et la stabilité structurale du sol sont élevées en comparaison, respectivement, de la force de cisaillement de l'écoulement et de l'érosivité des pluies.

La sédimentation est le troisième processus de l'érosion hydrique. Elle se produit lorsque la capacité de transport de l'écoulement est dépassée. Elle résulte d'un ralentissement de l'écoulement à la faveur d'un obstacle, d'une diminution de la pente ou d'une dépression. Les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. Il s'opère ainsi un tri granulométrique (Kauark Leite, 1990).

1.1.2 Les différentes formes d'érosion

Dans les plaines loessiques du nord de l'Europe, différentes formes d'érosion se combinent, en fonction des processus élémentaires mis en jeu et des différentes zones du bassin versant concernées. Le Tableau 1 et la Figure 2 ci-dessous synthétisent les principaux cas de figure rencontrés.

Tableau 1 : Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules de sol et des caractéristiques du ruissellement (d'après Auzet <i>et al.</i>, 1990)							
		<i>Processus sur les versants</i>					
		Caractéristique du ruissellement					
		Absence de ruissellement		$V_e < V_c^*$		$V_c > V_e$	
		Effet de la pluie sur la surface du sol : détachement des particules					
		non	Oui	non	oui	non	oui
<i>Processus dans le talweg</i>	Absence de ruissellement	Pas d'érosion	Pas d'érosion Croûte de battance	Pas d'érosion	Erosion diffuse sur versant	Rigoles sur versant	
	$V_e < V_c$	Cas impossibles		Erosion concentrée dans le talweg			
	$V_e > V_c$						

* V_e : vitesse d'écoulement du ruissellement

V_c : vitesse critique en dessous de laquelle il n'y a pas d'érosion de rigole

En l'absence de ruissellement, seul l'effet splash intervient : les gouttes de pluie désagrègent les agrégats du sol en redistribuant les fines particules détachées, formant une croûte de

battance comme nous l'avons expliqué ci-dessus. Le déplacement des particules de terre se fait sur des distances de l'ordre décimétrique au maximum, mais ce phénomène peut être étendu à l'ensemble de l'impluvium.

Lorsque le ruissellement se produit, les particules de terre peuvent être déplacées sur de plus longues distances. Dans un premier temps, il s'écoule de manière diffuse dans au niveau de la tête de bassin et sur les versants. Les particules les plus fines sont alors entraînées : il s'agit d'érosion diffuse (Auzet, 1990), forme d'érosion généralement imperceptible à l'œil. Si l'effet splash ne se produit pas, il n'y a pas d'érosion, la force de cisaillement du ruissellement diffus étant trop faible pour arracher des particules de sol. Il y a alors uniquement ruissellement sans mise en suspension de particules de terre.

Lorsque le ruissellement se concentre, sa vitesse augmente et la force de cisaillement associée à l'écoulement peut dépasser le seuil critique d'incision. En plus du transport des particules de terre détachées par l'effet splash, le ruissellement érode le sol sur son passage. L'écoulement de l'eau étant concentré, ce type d'érosion est appelé érosion linéaire. Sur sols limoneux de faible pente, Rauws et Govers (1988) ont montré qu'une érosion linéaire se produisait au-delà d'une vitesse d'écoulement de 3 cm/s. En deçà de cette vitesse, s'il y a détachement, seules les particules argileuses sont entraînées par érosion diffuse.

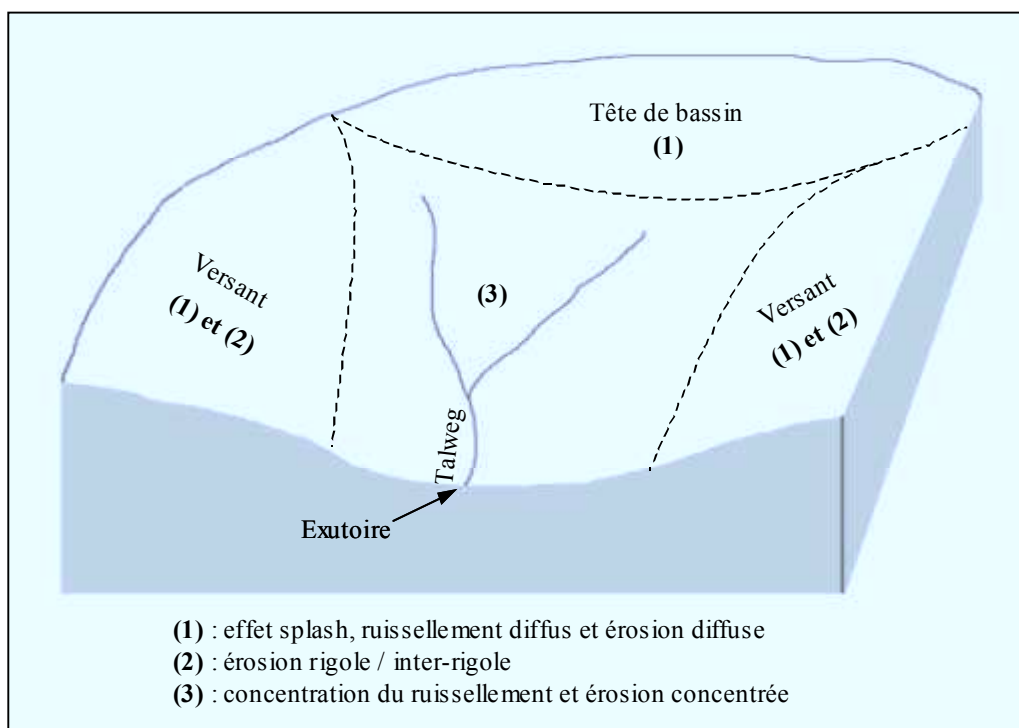


Figure 2 : Organisation spatiale des formes d'érosion dans un bassin versant

Deux types d'érosion linéaire sont différenciés en fonction de la localisation spatiale de l'érosion dans le bassin versant :

- Sur les versants, le ruissellement se concentre dans les motifs agraires comme les traces de roues ou bien les lignes de semis orientées dans le sens de la pente, creusant ainsi des rigoles de quelques centimètres à quelques décimètres de profondeur (Le Bissonnais et Gascuel-Oudou, 1998). Ces rigoles apparaissent lorsque la pente est supérieure à 5% et avec des pluies d'intensité assez forte, généralement au printemps. La zone de collecte de l'eau est réduite et se situe juste en amont de la rigole sur le versant. Ce type d'érosion est nommé érosion de versant ou rigole / inter-rigole, signifiant par là qu'elle est associée à de l'érosion diffuse entre les rigoles.
- Plus à l'aval, le ruissellement peut également se concentrer plus, dans les dépressions topographiques correspondant à des fonds de vallons secs, appelés talwegs. La zone de collecte ou impluvium est étendue et correspond à la tête du bassin et aux versants. La quantité d'eau étant plus importante, ce sont de véritables ravines qui sont créées, de taille décimétrique à métrique en profondeur. Il s'agit d'érosion concentrée ou érosion de talweg. A la différence de l'érosion de rigole, des pluies intenses ne sont pas indispensables pour que ce type d'érosion se produise ; des ravines peuvent apparaître même sur des pentes inférieures à 5%.

Des interactions relient ces différentes formes d'érosion. Il a ainsi été remarqué que, l'apparition de rigoles sur un versant accélère le transport des particules détachées par effet splash, comparativement à une situation avec uniquement du ruissellement diffus (Auzet, 1990). On constate aussi que la formation d'un réseau de ravines en hiver peut faciliter le transfert d'eau chargée en terre au printemps suivant. Cela augmente le risque de coulées boueuses au printemps par rapport à une situation sans érosion concentrée en hiver (Papy et Douyer, 1991). Ces différentes manifestations du ruissellement érosif peuvent avoir lieu simultanément ou séparément sur un même bassin versant.

1.1.3 Les principaux déterminants de l'érosion des sols dans les plaines loessiques

Longtemps la ceinture loessique du nord de l'Europe n'a pas été considérée comme une région subissant les conséquences du ruissellement et de l'érosion : les pentes semblaient bien faibles en comparaison des zones à risque que sont les montagnes ou les vignobles. Ce n'est qu'à partir des années 50 que les problèmes de cette région ont été mentionnés à l'échelon national (Hénin et Gobillot, 1950). Quant aux conditions particulières favorisant le ruissellement et l'érosion en l'absence de forte pente, elles n'ont été mises en évidence qu'à partir des années 80.

1.1.3.1 Une faible capacité d'infiltration et de stockage de l'eau

Dans les plaines loessiques, le ruissellement est de type hortonien en raison de la faible capacité d'infiltration des sols limoneux. L'effet splash de la pluie conduit très vite à la formation d'une croûte de battance du fait de leur faible stabilité structurale (Boiffin, 1984). Cette dernière est due en particulier à la texture des sols et à leur faible taux de matière organique (Le Bissonnais et Gascuel-Oudoux, 1998). La Figure 3 présente les résultats de deux simulations sous une pluie de 30 mm/h sur une parcelle de 1 m² : l'une pour un sol typique de plaine limoneuse (Blosseville, Seine-Maritime) et l'autre pour un sol plus argileux (Villamblain, Loiret). Nous constatons que la faible teneur en argile conduit à un développement plus rapide de la croûte de battance.

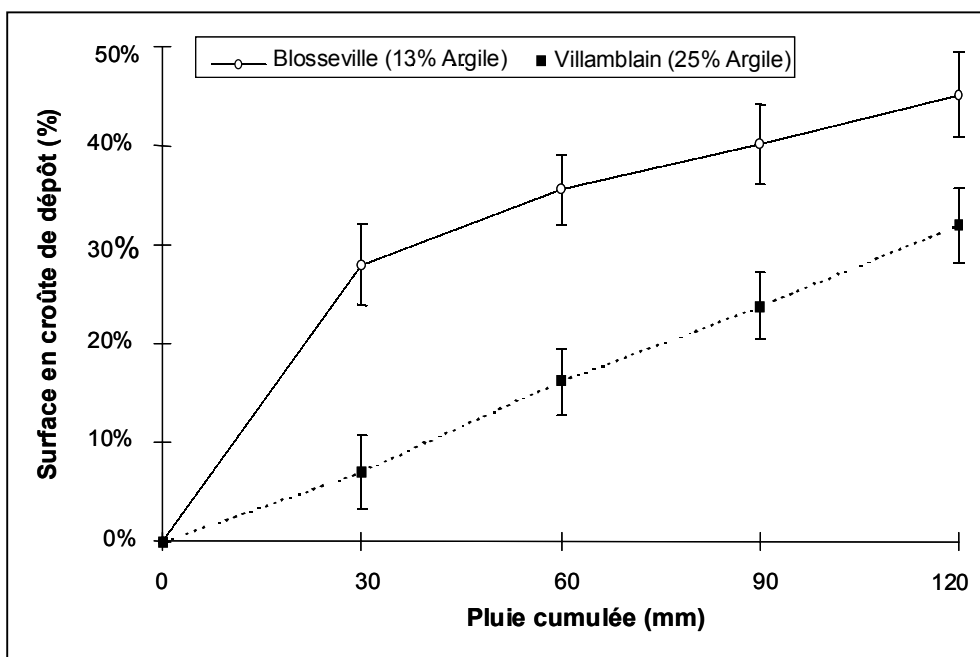


Figure 3 : Comparaison de la vitesse de développement d'une croûte de battance sur un sol argileux et un sol limoneux (d'après Fox et Le Bissonnais, 1998)

Précédemment, nous avons vu que la capacité d'infiltration d'une croûte de battance était de 1 à 2 mm/h. Nous savons en outre que, pour un lit de semence, la capacité de stockage dans les dépressions créées par la rugosité de surface est généralement inférieure à 3 mm (Govers *et al.*, 2000). Nous pouvons donc en déduire qu'une pluie d'une durée d'une heure et d'une intensité de 5 mm/h provoquera un début de ruissellement. Dans les plaines limoneuses, le ruissellement peut donc apparaître avec des pluies de très faible intensité une fois que l'état de surface du sol est dégradé. Boiffin *et al.* (1986) notent toutefois que le développement d'un couvert végétal avant la formation d'une croûte de battance protège le sol d'une dégradation trop rapide. Lorsqu'une croûte de battance se forme malgré la présence d'un couvert végétal, Martin (1997) dans sa synthèse bibliographique, mentionne que le couvert permet néanmoins de retenir une partie des précipitations et de favoriser l'infiltration le long des tiges, ce qui limite l'apparition du ruissellement.

1.1.3.2 Un réseau de concentration du ruissellement

Dans les plaines loessiques, régions très fertiles où les grandes cultures dominent, le ruissellement se concentre rapidement à la faveur un réseau de collecteurs existant. En effet, dans les parcelles cultivées, un vaste réseau de collecteurs est créé par les traces de roue dues aux passages fréquents d'engins pour les épandages d'engrais et les traitements, aux dérayures¹ et aux fourrières² (Boiffin *et al.*, 1986 ; Auzet *et al.*, 1998). Grâce à réseau, le ruissellement rejoint les collecteurs secondaires que sont les axes de concentration topographique, les chemins et les routes. Par conséquent, même au sein de parcelles quasiment planes (pente inférieure à 1%), le ruissellement diffus peut se concentrer et être à l'origine de départ de terre par érosion linéaire, cela en l'absence d'érosion de type rigole.

1.1.3.3 Sensibilité des sols à l'incision et force de cisaillement

Une fois le ruissellement concentré dans les collecteurs, le détachement des particules de sol se produit à deux conditions : une sensibilité du sol à l'incision au niveau des collecteurs et une force de cisaillement de l'écoulement suffisamment importante. La sensibilité à l'incision dépend étroitement de trois paramètres du sol : l'état hydrique, la texture et la compacité (Govers *et al.*, 1990). La nature limoneuse des sols de la ceinture loessique leur confère une faible cohésion en comparaison de sols plus argileux et l'état hydrique au niveau des collecteurs est généralement saturé, le ruissellement se concentrant à ce niveau. Ces deux paramètres favorisent l'érosion linéaire. Quant à la force de cisaillement de l'écoulement, elle dépend de la vitesse de celui-ci. Ludwig *et al.* (1995) et Auzet *et al.* (1993) ont ainsi montré, à partir d'une étude menée sur 20 bassins versants élémentaires du nord de la France, que l'intensité de l'érosion linéaire au niveau des collecteurs était fortement corrélée à la surface contributive au ruissellement située à l'amont des collecteurs.

L'érosion hydrique des sols typique des plaines limoneuses de grande culture est la conséquence d'une accumulation de ruissellement de surface sur le territoire agricole, qui se concentre grâce à un réseau dense de collecteurs. La forte sensibilité du sol à l'incision permet alors à l'érosion linéaire de se produire mais uniquement lorsque la force critique de cisaillement de l'écoulement est atteinte.

1.1.4 Problèmes posés par l'érosion des sols dans le bassin loessique du nord de l'Europe

Nous détaillons, dans cette partie, les types de dégâts engendrés par l'érosion des sols dans les

¹ La dérayure correspond au dernier sillon ouvert par la charrue et non rebouché.

² Les fourrières d'une parcelle correspondent aux zones situées en bout de champ où l'agriculteur effectue les demi-tours entre chaque aller-retour. Les fourrières sont travaillées plus ou moins perpendiculairement au sens de travail dans la parcelle en fonction de la forme de la parcelle.

régions de grande culture du nord de l'Europe afin de souligner l'enjeu que représente la maîtrise de ce phénomène (illustrations en annexe 1). Dans la description, nous distinguons le territoire agricole des zones non agricoles, dans la mesure où les dommages y affectent des populations d'acteurs aux préoccupations et aux tailles différentes et dans des proportions peu comparables.

1.1.4.1 Les dégâts causés sur le territoire agricole

En zone agricole, le premier problème lié à l'érosion auquel nous pensons est celui des départs de terre. Différentes études réalisées dans la ceinture loessique du nord de l'Europe ont permis d'évaluer les pertes annuelles en terre sur de longues périodes.

- A l'échelle des South Downs (3 500 km²), région du sud de l'Angleterre, les pertes sont estimées entre 0,05 et 0,5 m³/ha/an sur la période 1982-1991 (Boardman *et al.*, 2003a).
- A l'exutoire d'un bassin versant de 180 ha situé dans le Soissonnais en France, les pertes en terre ont été évaluées à 1,2 m³/ha/an, par mesure du Césium 137, sur la période 1963-1996 (Mabit *et al.*, 2002).
- Une autre étude conduite en Belgique sur deux petits bassins versants de 25 ha chacun Vandaele et Poesen (1995) ont quantifiés les départs de terre sur une durée à 3 ans à 5,5 m³/ha/an et 8,1 m³/ha/an.
- En Belgique également, le taux d'érosion annuel a été calculé pour 26 bassins versants à partir de la quantité de sédiments mesurée dans des bassins de rétention situés à l'aval (Verstraeten et Poesen, 2001). Les valeurs estimées varient de 0,4 à 20,6 t/ha/an pour des bassins versants d'une superficie de, respectivement, 4 873 à 7 ha. Dans cette étude, la densité des sédiments étant comprise entre 0,78 et 1,35 t/m³, la gamme de variation maximale des pertes en terre est donc 0,3 - 26,4 m³/ha/an.

Selon les résultats des études mentionnées ci-dessus, le taux d'érosion annuel varie dans un rapport de 1 à 500. Notons qu'il est impératif de préciser à chaque fois l'échelle considérée. En effet, la surface du territoire étudié influe sur l'évaluation des pertes en terre : plus le territoire est vaste, plus les dépôts de sédiments à l'intérieur sont importants et plus les pertes externes sont minimales. Cette réserve étant faite, les valeurs rencontrées dans le nord de l'Europe restent faibles par rapport à celles observées dans les régions tropicales, à savoir plus de 100 m³/ha/an (Roose, 1994a). Si nous prenons comme hypothèse qu'une tonne de sédiments est contenue dans un mètre cube, alors la perte maximale de 26,4 m³/ha/an représente en moyenne une perte de sol sur une épaisseur de 2,6 mm/an. Ceci est relativement faible pour des sols limoneux développés sur des lèss de plusieurs mètres d'épaisseur. Cependant, le sol étant une ressource non renouvelable, la perte en terre pourrait être préjudiciable pour les générations futures. Les départs de terre observés peuvent, en outre,

causer des pertes de rentabilité mais, une étude conduite aux Etats-Unis pour des sols similaires, a montré que cette perte éventuelle pouvait être largement compensée par l'apport d'intrants (Dregne, 1988 cité par Roose, 1994b).

Si la quantité de terre déplacée est globalement assez modeste, l'érosion affecte de façon hétérogène les parcelles. En effet, les pertes en terre sont dues principalement à une érosion sous forme de ravines localisées dans les lignes de concentration du ruissellement ; l'érosion diffuse entraîne de faibles pertes bien que touchant l'ensemble des surfaces. Ainsi, dans l'étude réalisée par Vandaele et Poesen (1995) l'érosion diffuse estimée ne représente que 10% de l'érosion totale mesurée sur une période de 3 ans. Cerdan *et al.* (2002a) ont quant à eux évalué, par simulation et mesure directe, à 10% et 33% l'érosion diffuse survenue suite à deux événements catastrophiques sur un bassin versant cultivé de 94 ha situé en Haute-Normandie. L'érosion sous forme de ravines et rigoles est donc majoritaire et, ramenée à la surface réellement concernée, elle peut être très importante. Ainsi un taux d'érosion de 5,2 m³/ha pour un territoire de 126 ha représente une perte maximale de 44,8 m³/ha au niveau des sous-bassins versants élémentaires concernés (Poesen et Govers, 1990).

Si les pertes en terre ne représentent pas un problème majeur pour les agriculteurs, elles peuvent néanmoins perturber leur activité. Par exemple, les ravines peuvent gêner la circulation dans les parcelles lorsqu'elles ne sont pas parallèles au sens de travail du sol. Si elles sont peu profondes, l'agriculteur peut les franchir, mais les secousses du tracteur peuvent entraîner une hétérogénéité de l'épandage d'engrais ou de produits phytosanitaires, ainsi que des risques d'endommagement du matériel. Si les ravines sont trop profondes, elles peuvent être des obstacles au passage des engins agricoles : l'agriculteur doit alors travailler individuellement chaque portion de parcelle créée par le réseau de ravines. Ces ravines profondes ne peuvent pas être effacées par un travail superficiel du sol, contrairement aux autres. Un apport de terre est donc nécessaire pour les combler. Enfin, si les ravines sont larges, la perte de récolte par arrachement des cultures peut être conséquente.

Sur les terres agricoles, le ruissellement érosif peut également causer des dégâts au niveau des dépressions, des obstacles ou simplement des ruptures de pente. A ces endroits, les particules de terre se déposent, recouvrant les lits de semence ou de jeunes pousses. S'il n'y a pas d'érosion, mais uniquement du ruissellement, celui-ci entraînera dans les dépressions une stagnation d'eau sur des périodes plus ou moins longues, susceptible d'altérer le rendement des cultures.

Les dégâts occasionnés sur le territoire agricole sont donc de faible ampleur : les effets de l'érosion sont très localisés et la productivité des sols n'est pas remise en cause, les sols de la ceinture loessique étant dans l'ensemble épais. Il n'en est pas de même en dehors du territoire agricole, où les dommages peuvent être considérables (Amstrong *et al.*, 1990).

1.1.4.1 Les dégâts en dehors du territoire agricole.

L'accumulation du ruissellement provenant du territoire agricole provoque des inondations ou des coulées boueuses, si l'eau est chargée en terre. Ces inondations peuvent être fort préjudiciables et causer de nombreux dégâts matériels (Auzet, 1987 ; Boardman *et al.*, 2003a ; Verstraeten et Poesen, 1999). Certaines catastrophes ont également été à l'origine de morts d'homme. Ainsi, en juin 1997, un orage de 80 mm en 6 heures a entraîné la mort de 3 personnes sur la commune de Saint-Martin-de-Boscherville en Seine-Maritime (Delahaye et Hauchard, 1998). Des événements pluvieux d'une telle intensité demeurent relativement rares. En 30 ans, de 1960 à 1989, 64 catastrophes réparties sur 29 jours ont été recensées dans le Pays de Caux (Papy et Douyer, 1991). En dehors de ces événements exceptionnels, les collectivités territoriales subissent des dégâts chroniques. Lors des nombreux épisodes pluvieux à l'origine d'érosion, des dépôts de terre se forment sur les routes ce qui nécessite un nettoyage régulier de la voirie. Les sédiments colmatent également les fossés et les réseaux d'évacuation des eaux pluviales, ce qui limite leur efficacité. Deux types de catastrophes peuvent être différenciés (Papy et Douyer, 1991) : en hiver, celles dues à une accumulation de ruissellement sur une grande surface dégradée, et au printemps, celles résultant des précipitations orageuses, d'autant plus néfastes qu'un réseau de rigoles et ravines a déjà été creusé durant l'hiver.

L'autre souci majeur auquel est confrontée la population est la dégradation de la qualité de l'eau. En effet, lorsque le sous-sol de ces régions du nord de l'Europe est constitué de karst, des zones d'infiltration préférentielle du ruissellement mettent en relation directe la surface du sol et l'aquifère (Figure 4). En Haute Normandie, elles portent le nom de bétoires et résultent d'un processus de décalcification. Ainsi, l'eau de ruissellement chargée en particules de terre peut atteindre très rapidement la nappe phréatique et venir polluer les captages d'eau potable. Même si le ruissellement ne contient pas de matières en suspension, l'onde de choc provoquée par l'entrée d'eau dans la bétoire, remet en suspension les particules de terre présentes dans le réseau karstique (Le Bissonnais et Papy, 1997). En 2001, 47% des captages de Haute Normandie suivis par l'Agence de l'eau Seine Normandie (AESN) présentaient une turbidité chronique nécessitant un traitement de potabilisation, contre 29% sur l'ensemble du bassin Seine Normandie. En Seine-Maritime, la turbidité chronique concerne 73% des captages faisant l'objet d'une surveillance (Agence de l'Eau Seine Normandie, 2003). La turbidité est parfois tellement élevée qu'il n'est pas possible de produire de l'eau potable : en octobre 1998, 80 000 habitants de Seine-Maritime ont ainsi été privés d'eau potable (Vandewiele, 1999). Toutefois, grâce à des interconnexions entre réseaux voisins de distribution d'eau potable, ces coupures d'eau sont actuellement limitées à quelques jours. Le souci causé par la pollution des ressources en eau potable dans ces régions sensibles au ruissellement ne se limite pas à la turbidité : l'eau de ruissellement peut en effet véhiculer nutriments, des molécules phytosanitaires (Lecomte, 1999) et être aussi à l'origine de pollutions bactériennes.

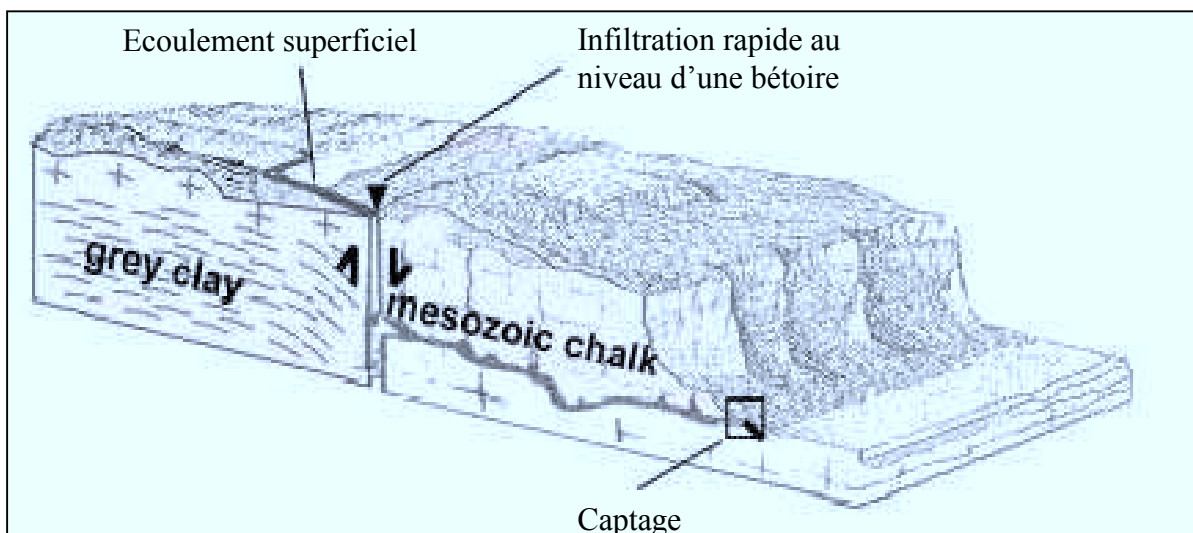


Figure 4 : Infiltration préférentielle de l'eau dans un sous-sol karstique (d'après Massei *et al.*, 2002).

Contrairement aux dégâts causés par l'érosion des sols sur le territoire agricole, d'une faible amplitude, facilement réparables ou compensables, les dommages qui doivent être supportés par les collectivités et la population dans son ensemble sont particulièrement préjudiciables. Leur origine réside principalement dans une accumulation d'eau provenant du territoire agricole, plus ou moins chargée en terre. Ces dernières années, nous constatons une aggravation des problèmes. En Haute-Normandie, le nombre d'événements désastreux a tendance à être plus élevé depuis le milieu des années 90, l'année 2000 présentant le plus grand nombre de coulées boueuses sur la période 1985 - 2001 (Souchère *et al.*, 2003).

1.2 L'effet de l'activité agricole sur le processus d'érosion

Les dégâts occasionnés par l'érosion dans les régions du nord de l'Europe sont pour une part importante la conséquence des activités agricoles. Nous analysons dans cette partie les effets de l'activité agricole en distinguant : le choix des productions, la structure du parcellaire et enfin les systèmes de culture. Nous limitons l'analyse des effets aux processus de ruissellement et d'érosion concentrée, ayant montré précédemment que ce sont les principaux mécanismes à l'origine des problèmes observés dans les plaines limoneuses de grande culture.

1.2.1 L'effet du choix des productions

La ventilation des grands types de cultures au sein des exploitations a des conséquences sur le ruissellement érosif. Dans les régions limoneuses du nord de l'Europe, les systèmes de polyculture-élevage ont été progressivement remplacés par des systèmes uniquement tournés vers la culture, évolution qui a conduit à une diminution des surfaces en herbe. Ce fut le cas dans les années 40-50 dans la région des South Downs en Angleterre (Boardman *et al.*,

2003a). En France, en Haute-Normandie, cette tendance s'observe depuis le début des années 70 (Ouvry, 1992). En 30 ans, entre 1970 et 2000, les données du recensement général agricole montrent que près de 50% des prairies ont été mises en culture dans cette région, ce qui représente une disparition de 200 000 ha de prairie, pour une surface agricole utile totale de 800 000 ha (Souchère *et al.*, 2003).

Or, les prairies jouent un rôle particulièrement important : les parties aériennes protègent la surface du sol de la battance et les racines l'horizon de surface de l'incision. Elles permettent ainsi de réduire à la fois le ruissellement et l'érosion comme le montrent les résultats des quatre études suivantes.

- Fullen (1998) montre, à partir d'expérimentations sur placettes de 25 m², que la mise en jachère fixe de type prairie permet de limiter considérablement le ruissellement et l'érosion. Pour en obtenir une réduction significative, le taux de recouvrement doit être supérieur à 30% de la surface. Dans ces conditions, la mise en jachère est efficace même sur des pentes de 14%.
- Souchère *et al.* (2003) évaluent l'impact d'une diminution supplémentaire des surfaces en herbe à partir de deux simulations réalisées pour un bassin versant de 1 050 ha avec un événement pluvieux de 21,6 mm en 3h25min. Dans le bassin versant considéré, les prairies représentent 25% de la surface. Le modèle de ruissellement et d'érosion STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management) a permis de montrer qu'une diminution de 17% augmentait de plus de 75% le ruissellement et l'érosion diffuse.
- Dubreuil (2001) montre de même, à partir de simulations sur 40 bassins versants de Haute-Normandie soumis à 5 événements pluvieux, que le ruissellement est globalement plus important dans les bassins versants présentant une faible surface en prairie.
- En Lituanie, sur des sols limoneux-sableux, Jankauskas et Jankauskiene (2003) ont cherché à évaluer expérimentalement l'effet de l'introduction de prairies temporaires dans des rotations de cultures annuelles. Ils comparent des rotations de 6 années : deux comportant deux années de prairies temporaires et deux en comportant quatre. Pour ces dernières, la quantité de terre érodée est systématiquement plus faible : le taux d'érosion est compris entre 3 et 9,5 t/ha/an pour des pentes allant de 2 à 14%, contre un taux de 9,5 à 35 t/ha/an pour les autres rotations.

Les quatre études évoquées montrent clairement qu'une réduction supplémentaire de la surface en herbe dans les systèmes de production actuels aurait des répercussions importantes sur les volumes d'eau ruisselée et de terre érodée.

Le contexte économique et les politiques agricoles sont souvent la cause de la forte diminution des prairies dans les systèmes de production actuels (Boardman *et al.*, 2003b ;

Mathieu et Joannon, 2003 ; Souchère *et al.*, 2003). Lorsque le milieu le leur permet, les agriculteurs préfèrent mettre en valeur leur terre en implantant des cultures et abandonner l'élevage et, par conséquent, les prairies qui lui sont associées car l'élevage s'avère nettement moins rémunérateur. Toutefois, les politiques agricoles peuvent parfois avoir des conséquences positives vis-à-vis de la limitation de l'érosion bien qu'elles n'aient pas été conçues dans ce but initialement. C'est le cas de la politique agricole commune (PAC) de l'Union Européenne (UE) instaurée en 1992 qui, pour limiter la surproduction de céréales et d'oléo-protéagineux, prévoit deux mesures favorables à une limitation de l'érosion. La première concerne la non-attribution de subventions pour des cultures implantées sur des parcelles de prairies permanentes retournées après 1992. Ceci permet de limiter la mise en culture de prairies, mais pas de façon absolue les agriculteurs ayant toujours la possibilité de les cultiver, sans subvention. La seconde porte sur le gel obligatoire, celui-ci étant en partie implanté avec un couvert végétal permanent. Van Rompaey *et al.* (2001) ont montré que réduire l'érosion par la mise en jachère d'une partie des terres labourables est d'autant plus efficace que les premières parcelles concernées correspondent souvent aux plus pentues. Sur un territoire de 85 000 ha, dans le centre de la Belgique, ils ont évalué, par simulation, à 19% la réduction de l'érosion par la mise en jachère de 10% des terres labourables.

1.2.2 L'effet de la structure du parcellaire et des éléments linéaires

En analysant des photos aériennes sur trois campagnes (1947, 1969 et 1990), Van Oost *et al.* (2000) évaluent l'effet d'une modification du parcellaire sur 3 bassins versants situés en Belgique, d'une surface comprise entre 100 et 500 ha. L'érosion est évaluée avec le modèle spatialisé WATEM (WATER and Tillage Erosion Model), qui simule l'érosion par l'eau et par le travail du sol. Ce modèle a comme particularité de prendre en compte l'effet des limites des parcelles sur l'infiltration et la sédimentation. Les principaux résultats sont récapitulés dans le Tableau 2. Entre 1947 et 1990, la taille moyenne des parcelles augmente entre 200 et 300%. Sur la même période, l'occupation du sol change, le pourcentage de terres arables diminuant 3 et 16%, selon le bassin versant considéré. L'érosion simulée varie entre -28% à +10%, résultat de l'interaction entre l'augmentation de la taille des parcelles et de la diminution des terres arables. Ce dernier facteur limite d'autant plus l'érosion que les parcelles concernées par le changement sont pentues.

Tableau 2 : Interaction entre la variation de la taille des parcelles et celle de la proportion de terres arables entre 1947 et 1990 : conséquence sur l'érosion. (d'après Van Oost *et al.*, 2000)

Bassin versant	Variation de la taille moyenne des parcelles	Variation de la superficie en terres arables	Variation du taux d'érosion
Ganspoel	+ 238,5%	- 14,4%	- 5,8%
Kinderveld	+ 191,9%	- 15,5%	- 27,6%
Kouberg	+ 297,7%	- 3,2%	+ 9,6%

La structure du parcellaire détermine le sens de travail du sol puisque l'agriculteur travaille généralement dans le sens de la plus grande longueur. En effet, cela limite le nombre de demi-tours à effectuer et réduit la surface des fourrières au rendement souvent plus faible en raison des nombreux passages qui tassent progressivement le sol. En outre, le sens de travail du sol impose l'orientation des fourrières et des dérayures. L'ensemble de ces éléments ainsi que le réseau de routes, chemins et fossés modifient le réseau d'écoulement topographique. Souchère *et al.* (1998), Takken *et al.* (2001a) et Takken *et al.* (2001b) montrent que, dans des parcelles de faible pente, le travail du sol peut influencer le sens d'écoulement, parfois à l'encontre de la topographie. Etablies à partir d'analyses statistiques, les fonctions discriminantes qu'ils proposent permettent de déterminer si l'écoulement suit la direction de la plus grande pente ou celui du travail de sol. Ces fonctions tiennent compte de la pente, de la rugosité à la surface du sol et de l'angle entre la direction du travail du sol et celle de la plus grande pente. Pour les bassins versants de faible pente, la prise en compte de l'ensemble de ces éléments peut modifier de manière significative leur surface ainsi que le réseau de concentration du ruissellement. Souchère *et al.* (1998) comparent, en Seine-Maritime, 23 petits bassins versants (3,5 à 64 ha). Pour 20 d'entre eux, le ruissellement s'écoule dans la direction du travail du sol sur plus de 50% de la surface. En conséquence, la limite des bassins versants est différente selon qu'elle est calculée uniquement en fonction de la topographie ou en tenant compte du sens du travail du sol. Ainsi, pour 16 des 23 bassins considérés, la surface varie de plus ou moins 25% entre les deux calculs. La concentration du ruissellement diffère également, le risque d'apparition de ravines étant accentué si la concentration se fait plus à l'amont du talweg. Souchère (1995) vérifie que, en prenant en compte le sens du travail du sol, les écoulements simulés correspondent bien à ceux observés sur le terrain. Il apparaît donc que la structure du parcellaire détermine en partie le réseau d'écoulement du ruissellement, ce qui peut avoir des conséquences sur l'intensité du ruissellement et de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Une modification du parcellaire à l'occasion d'un changement d'exploitant ou bien d'un remembrement, peut ainsi réduire ou accroître le risque de ruissellement érosif.

1.2.3 Les effets des systèmes de culture

Par les itinéraires techniques et les successions de culture qu'il applique, l'agriculteur crée une diversité d'états de surface, en interaction avec le climat, qui se succèdent au cours de la campagne culturale. Martin (1997) propose d'appeler cette succession « trajectoire d'états ». Selon les états de surface obtenus, les effets sur le ruissellement et l'érosion sont différents. De plus, si les états de surface varient dans le temps, ils se répartissent de façon différente dans l'espace, en raison de l'organisation spatiale des systèmes de culture, ce qui limite ou accroît le ruissellement et l'érosion.

1.2.3.1 Effet des systèmes de culture sur les états de surface en interaction avec le climat

Il est possible de différencier les opérations culturales de travail du sol des opérations de récolte. Les premières créent des états de surface fragmentés avec une rugosité plus ou moins forte suivant l'outil utilisé. Il s'agit des opérations de labour, préparation de lits de semence, semis, déchaumage et désherbage mécanique. A l'opposé, les opérations de récolte créent des états de surface tassés avec une faible rugosité. C'est le cas en particulier des récoltes réalisées tardivement à l'automne, en condition humide et avec un matériel lourd : récoltes de betteraves sucrières, de maïs et de pommes de terre, et dans une moindre mesure de lin (récolte plus précoce et matériel moins lourd). Papy et Boiffin (1988) estiment à 70-80% la surface compactée lors de la récolte des pommes de terre et des betteraves sucrières. Enfin, les opérations de semis en rang et surtout de traitement phytosanitaire ou d'épandage d'engrais créent un réseau de traces de roue. Celui-ci forme, au sein des parcelles, des dépressions dont l'état de surface est très tassé et sans rugosité. Le pourcentage couvert par les traces de roues dans une parcelle peut varier considérablement en fonction du matériel utilisé. Ouvry (1989-90) a calculé que, pour des opérations de semis réalisées avec un semoir de précision et des opérations de traitement, les traces de roues pouvaient couvrir de 2% à 32% de la surface en fonction de la largeur du pulvérisateur, du semoir et de l'utilisation ou non d'un matériel pour effacer les traces laissées par le passage du tracteur et du semoir.

Les états de surface ainsi produits sont modifiés sous l'influence du climat qui agit entre deux opérations culturales, dégradant l'état de surface par l'action des pluies ou favorisant le développement du couvert végétal.

Les précipitations ont pour effet d'entraîner le développement d'une croûte de battance et de réduire la rugosité de surface, deux phénomènes qui augmentent le ruissellement. Cependant, l'effet de la pluie n'est pas identique tous les ans : il dépend de la répartition des précipitations suite au dernier travail du sol. Dans le Pays de Caux, Boiffin *et al.* (1986) ont suivi le développement de la croûte de battance au printemps (41 parcelles) et à l'automne 1985 (14 parcelles). Dans cette étude, ils concluent qu'après un semis, une croûte de battance généralisée est obtenue avec 60 mm de pluie continue, ou bien 90 mm si une période de dessiccation intervient entre-temps. Vandaele et Poesen (1995) obtiennent des résultats allant dans le même sens malgré une différence notable dans les cumuls de pluie conduisant à l'apparition de la croûte de battance. La Figure 5 permet de comparer la vitesse de développement de la croûte de battance après une opération de semis de céréale d'hiver en 1990 et 1991. Les résultats de ce suivi montrent qu'en 1990, une croûte de battance généralisée est obtenue après 90-100 mm de précipitations continues dans les 15 jours suivant le semis, et qu'en 1991 le même état est observé après environ 300 mm discontinus et répartis sur 90 jours. Cette dernière année, 50% de la surface présentait une croûte de battance après quelques 70 jours et 170 mm de précipitations. La texture des sols pourrait expliquer cette différence avec l'étude précédente, mais le taux d'argile n'est pas donné avec précision par

Vandaele *et al* (entre 10 et 20%). D'après ces deux études, une période de dessiccation après l'intervention culturale retarde le développement de la croûte de battance.

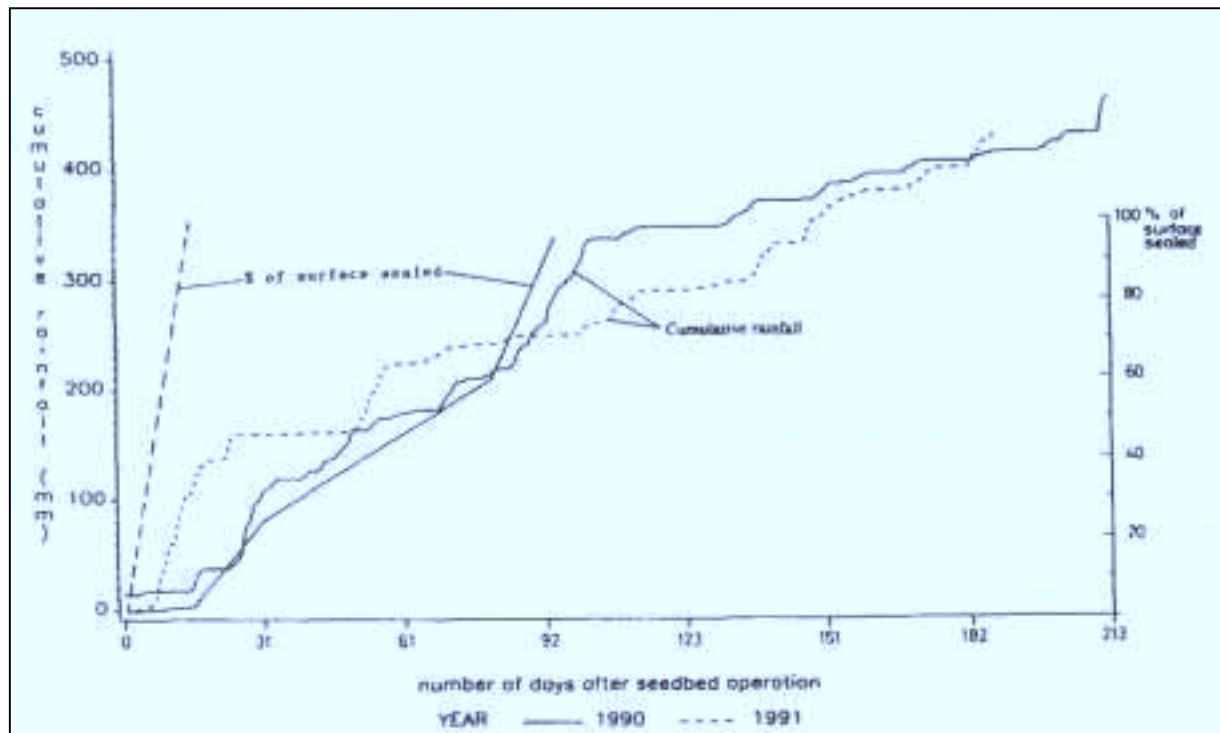


Figure 5 : Evolution du cumul de pluie et du % de croûte de battance depuis la réalisation du semis de la culture d'hiver (in Vandaele et Poesen, 1995)

Quant à la température, elle influence le développement du couvert végétal et quand celui-ci est rapide, il peut empêcher ou du moins retarder la formation de la croûte de battance. Gallien *et al.* (1995) montrent que, pour des taux de couverture proches de 100%, les coefficients de ruissellement observés au printemps varient en fonction du couvert végétal implanté. Plus le développement du couvert est tardif, plus la croûte de battance est développée et plus le coefficient de ruissellement est élevé. Boardman (1993) rapporte qu'il est possible de différencier les automnes et hivers chauds qui permettent une croissance des céréales d'hiver suffisante pour minimiser le développement de la croûte de battance, des automnes et hivers froids qui limitent le développement du couvert végétal des céréales d'hiver et par conséquent accroît les risques de dégradation de l'état de surface.

L'incidence du climat sur les états de surface ne peut donc pas se résumer à un cumul des précipitations. Il est nécessaire de prendre en compte la dynamique des précipitations au cours de la campagne culturale et les interactions avec les températures.

1.2.3.2 Effet des différents états de surface sur le ruissellement et l'érosion

Les états de surface ont des effets variés sur le ruissellement et l'érosion. S'ils sont fragmentés et présentent une rugosité importante, ils tendent à limiter le ruissellement. En effet, nous avons vu plus haut qu'un état de surface résultant d'un travail superficiel du sol

avait une capacité d'infiltration de 30 à 50 mm/h. La rugosité, quant à elle, permet de stocker une partie des précipitations à la surface du sol, d'autant plus importante que l'état de surface est motteux. L'état de surface laissé par un labour permet de stocker entre 3 et 6 mm de plus que celui résultant d'un semis (Ludwig, 2000). A l'inverse, les états de surface du sol tassés et d'une faible rugosité diminuent fortement la capacité d'infiltration et de stockage à la surface du sol. Cependant, les états tassés assurent une forte cohésion des agrégats du sol limitant ainsi les départs de terre alors que les états fragmentés diminuent la cohésion et contribuent aux déplacements de terre. Il existe donc un antagonisme entre réduction du ruissellement et départs de terre, comme le montre Martin (1997) à partir d'expérimentations sur des opérations culturales en interculture. Enfin, les réseaux de traces de roues dans les parcelles favorisent le ruissellement de deux manières : d'une part, l'infiltration y est plus faible, d'autre part, ils constituent des collecteurs à l'intérieur des parcelles, entraînant une concentration plus précoce du ruissellement (Boiffin *et al.*, 1986 ; Ludwig *et al.*, 1996).

Les différentes opérations culturales en interaction avec le climat créent donc différents états de surface aux effets variables et souvent opposés sur le ruissellement et les départs de terre. Suivant la proportion des différents états de surface dans l'impluvium des bassins versants, ceux-ci présentent soit un risque d'érosion diffuse soit un risque de ruissellement et d'érosion linéaire. Les états de surface évoluant au cours du temps, le bassin versant peut passer d'un risque à l'autre.

1.2.3.3 Effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture

La localisation des cultures dans un bassin versant est variable et dépend de la répartition des cultures sur chaque territoire d'exploitation. Celle-ci est fonction des contraintes du milieu, des successions culturales et du regroupement de mêmes cultures sur des parcelles voisines pour faciliter l'organisation du travail. Comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes de culture mis en place conduisent à différents états de surface. Ces états de surface se répartissent dans le bassin en fonction des choix de localisation des cultures faits par les agriculteurs. Souchere *et al.* (2001) montrent que l'organisation spatiale des états de surface dans un bassin versant exerce une influence sur le volume de ruissellement à l'exutoire. Leur étude repose sur la simulation de deux configurations d'un même bassin versant (90 ha). Si la distribution des états de surface est similaire avec respectivement 31% et 30% de surfaces ruisselantes, la localisation de celles-ci diffère, réparties sur tout le bassin dans le premier cas et groupées au centre dans le second. La simulation d'un événement pluvieux de 36 mm en 14 h avec le modèle STREAM conduit à un volume à l'exutoire deux fois plus important dans le second cas que dans le premier. En effet, dans la première situation, les surfaces ruisselantes alternant avec les surfaces infiltrantes, une partie du ruissellement n'atteint pas l'exutoire du bassin versant. Non seulement la proportion des différents états de surfaces fait qu'un bassin versant est ruisselant ou non, mais leur organisation spatiale peut aussi augmenter ou diminuer le ruissellement.

1.3 Différentes possibilités de maîtrise du ruissellement érosif

Les solutions aux problèmes causés par le ruissellement érosif passent par un aménagement du territoire, mais aussi par une modification des pratiques agricoles. Ces deux types de solutions sont complémentaires.

1.3.1 Aménager le territoire

Les aménagements permettant de lutter contre le ruissellement érosif peuvent être classés en deux catégories. On distingue les aménagements visant à protéger des coulées boueuses les zones à risque situées à l'aval des bassins versants, et les aménagements dont l'objectif est de limiter le ruissellement et l'érosion dès l'amont, pour éviter l'apparition des coulées boueuses.

1.3.1.1 Protéger les zones vulnérables

La principale réponse des autorités locales aux coulées boueuses et aux inondations est la construction de bassins de rétention en amont des villes et villages vulnérables. Ceux-ci correspondent soit à la mise en place d'une digue en travers d'un talweg, soit au creusement de véritables bassins. L'objectif est d'intercepter le flux d'eau avant qu'il n'atteigne les habitations, de le stocker temporairement et de le laisser s'écouler plus lentement par un débit de fuite. Ainsi le flux d'eau qui ressort du bassin de rétention ne peut plus causer de dommage à l'aval. Ces ouvrages de stockage sont généralement d'une grande capacité : ils risqueraient sinon de déborder et de causer autant de dégâts, et même davantage si la digue rompait.

Ce type d'aménagement est assez onéreux. Le coût de construction était estimé en 1994 entre 15 et 30 € par m³ de stockage (Ouvry, 1994). Il est confirmé par un recensement des ouvrages existants en Seine-Maritime (AREAS, 2001). Les bassins de retenue inventoriés lors de ce recensement ont une capacité moyenne d'environ 5 000 m³ et la capacité maximale observée est de 45 000 m³. Selon Verstraeten et Poesen (1999), le coût moyen de construction calculé pour 34 bassins de rétention aménagés en Belgique est de 382 000 €. Etant donné les dépenses élevées générées au moment de la construction, la dimension des bassins est parfois sous-estimée. Par exemple, pour un bassin versant de 168 ha, Boardman *et al.* (2003a) estiment à 41 300 m³ la capacité de stockage nécessaire pour une pluie de 50 mm en 24h (fréquence quinquennale), alors que les bassins prévus par la municipalité peuvent contenir au maximum 14 350 m³.

Un autre inconvénient des bassins de rétention est leur comblement progressif lié à la sédimentation. En fonction de leur localisation, avant ou après une zone de sédimentation, et aussi du taux d'érosion dans le bassin versant, les dépôts peuvent être considérables. En Belgique, sur 10 bassins de rétention étudiés, la sédimentation représente 0,85 m³/an par hectare drainé (estimation à partir des quantités de terre extraites lors des curages des

bassins), le maximum étant 6,25 m³/an/ha et le minimum 0,19 m³/an/ha (Verstraeten et Poesen, 1999). Globalement ce sont les bassins de rétention drainant les plus petits bassins versants qui sont les plus rapidement comblés par les sédiments. Nous retrouvons ici l'effet d'échelle que nous avons déjà évoqué : dans les grands bassins versants, les sédiments arrachés se re-déposent avant d'atteindre l'exutoire. Dans cette même étude, le coût de curage des bassins de rétention est estimé à 8-10 euros par m³ de sédiment. Si nous considérons un curage total du bassin tous les 4-5 ans, le coût d'entretien sur 10-15 ans équivaut au coût de construction. Dans le cas d'ouvrages construits à proximité immédiate des sources de sédiment, c'est-à-dire dès l'amont des bassins versants, et se comblant ainsi en 2 ou 3 ans, le coût d'entretien dépasse rapidement le coût de construction.

1.3.1.2 limiter l'apparition des coulées boueuses

Pour limiter les coulées boueuses, il est possible d'aménager le territoire agricole afin de réduire le ruissellement dans la zone de collecte du ruissellement, et de diminuer l'érosion concentrée dans les zones de concentration du ruissellement (Auzet, 1990).

Réduire le ruissellement

Les actions de réduction du ruissellement consistent à augmenter l'infiltration. Un des moyens est l'implantation de petits ouvrages de stockage qui captent le ruissellement diffus et permettent son infiltration. Il peut s'agir d'un stockage permanent comme une mare tampon ou un fossé d'infiltration, ou bien d'un stockage temporaire comme un pli cultivable ou une diguette créant une zone inondable en milieu de parcelle (Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie, 2002). La capacité de stockage de ces ouvrages est limitée, généralement moins de 1 000 m³ contre plusieurs milliers de m³ pour les bassins de rétention, mais comme ces derniers, ils peuvent se combler rapidement du fait de l'érosion en amont. Ces aménagements représentent pour les agriculteurs des pertes en terre arable du fait des emprises foncières. Leur mise en place est donc étroitement liée à la volonté des agriculteurs, limitée lorsque les agriculteurs qui exploitent les terres à l'origine du ruissellement sont différents de ceux subissant les dégâts causés par l'érosion concentrée (Papy *et al.*, 1992).

Diminuer l'érosion concentrée

Il est aussi possible d'agir en diminuant la vitesse d'écoulement du ruissellement et en retardant sa concentration. Pour cela, il suffit d'utiliser le même type d'aménagement que précédemment, muni d'un débit de fuite : le ruissellement, stoppé par l'ouvrage, s'écoule par le débit de fuite et acquiert ainsi une vitesse d'écoulement inférieure à la vitesse critique d'incision du sol. Un redécoupage parcellaire approprié permet aussi de limiter l'érosion concentrée en retardant la concentration du ruissellement. En effet, comme nous l'avons vu, le sens de travail du sol détermine en partie le sens d'écoulement de l'eau et donc de la concentration du ruissellement. On peut ainsi envisager de travailler la parcelle parallèlement au talweg principal pour conduire l'eau, de manière diffuse, le plus en aval possible (Papy,

accepté). Cependant, travailler le sol perpendiculairement à la pente peut aussi provoquer de l'érosion concentrée si la parcelle est recoupée par un talweg secondaire, perpendiculaire au talweg principal. Dans le cas de parcelles caractérisées par différentes pentes, le raisonnement du sens de travail du sol est donc délicat, et impose de bien anticiper l'ensemble des conséquences du choix d'un sens donné.

Le second moyen de réduire l'érosion concentrée est d'augmenter la résistance à l'arrachement dans les zones de concentration du ruissellement. Deux techniques sont principalement mises en oeuvre : les bandes tassées et les bandes enherbées.

- Le plus simple et le moins coûteux est de réaliser des « bandes tassées ». Tasser le sol après le semis dans l'axe du talweg permet, en effet, d'augmenter la cohésion du sol (Ouvry, 1989 ; Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie, 1998a). Une variante consiste à réaliser un double ou triple semis au niveau de l'axe du talweg. Cette technique a été testée en Belgique sur des semis de triticale et les résultats montrent qu'elle permet de réduire efficacement l'érosion concentrée (Gyssels *et al.*, 2002). La diminution de l'érosion constatée résulte de l'augmentation du nombre de pieds et de la densité de racines ; l'effet est particulièrement remarquable lorsque le couvert végétal n'est pas encore développé (Gyssels et Poesen, 2003). Ces deux techniques, tassement et semis multiple, peuvent être combinées, mais doivent être limitées à l'amont des talwegs où la vitesse d'écoulement du ruissellement est encore assez faible.
- Lorsque la pente du talweg s'accroît, il convient de recourir à l'enherbement permanent du talweg. Pour optimiser l'efficacité, il est impératif de travailler la parcelle perpendiculairement à la bande enherbée sans créer de fourrière des deux côtés de la bande, ceci afin de conduire le ruissellement directement sur la bande enherbée implantée (Auzet, 1990). Les bandes enherbées permettent également d'infiltrer une partie du ruissellement et de piéger des sédiments lorsque le flux d'eau n'est pas trop fort (Van Dijk *et al.*, 1996a). Leur pérennité dépend de l'intensité de l'érosion sur les parcelles situées dans son aire de drainage. En effet, si la bande enherbée est recouverte de sédiments, le ruissellement a tendance à se concentrer de part et d'autre de la bande, produisant à nouveau de l'érosion concentrée.

Lorsque de tels aménagements sont développés à l'amont d'un talweg, il faut également protéger l'aval contre l'incision : les eaux de ruissellement sont concentrées sur ces bandes, ce qui entraîne une vitesse du flux plus importante et donc une force de cisaillement accrue. Mettre en place ce type d'aménagement au niveau des talwegs est généralement plus aisé car ils sont implantés sur le territoire des agriculteurs qui subissent aussi les conséquences du ruissellement érosif.

1.3.2 Réduire le ruissellement et l'érosion sur le territoire agricole par une modification des pratiques agricoles

Sur le territoire agricole, il est possible de réduire le ruissellement et l'érosion en agissant sur les pratiques agricoles. Par pratiques agricoles, nous entendons la localisation spatiale des cultures sur le territoire d'exploitation et les techniques culturales, c'est-à-dire les actions liées à la conduite des cultures.

1.3.2.1 Modifier l'organisation spatiale des cultures

Réorganiser l'agencement spatial des cultures de chaque exploitation au sein du bassin versant permet de modifier l'occupation du sol du bassin sans changer l'assolement des exploitations agricoles³. Deux études complémentaires ont été menées sur ce sujet :

- Papy et Boiffin (1988) ont ainsi montré qu'il était possible de modifier la localisation spatiale des cultures dans un bassin versant exploité par un seul agriculteur et pratiquant une seule succession de cultures. Le principe est de chercher à minimiser, sur la durée d'une succession, la fréquence des situations où des surfaces ruisselantes se trouvent en amont de surfaces récemment travaillées, surfaces qui présentent un risque d'érosion concentrée. L'objectif est également d'éviter le regroupement des mêmes cultures sur des parcelles contiguës afin de diminuer la surface des blocs de parcelles potentiellement ruisselantes. Pour le cas d'étude considéré par Papy et Boiffin, l'application de ce principe permet de s'affranchir de quatre situations à fort risque d'érosion réparties entre le printemps et l'automne sur trois ans en créant cinq situations à risque faible uniquement au printemps.
- A partir de ces résultats, Martin *et al.* (1998) ont travaillé sur le cas théorique d'une exploitation agricole exploitant l'ensemble d'un bassin versant, et dont les règles de succession culturelle permettaient de concevoir deux successions différentes bien que l'agriculteur n'en applique qu'une seule. Les deux successions culturelles ne présentant pas les mêmes risques de ruissellement, ils ont alors cherché à les positionner dans des zones différentes du bassin versant : la moins ruisselante à l'amont et la plus ruisselante à l'aval. Il est ressorti que les contraintes de succession culturelle ne permettaient pas toujours de réaliser cette séparation géographique des deux successions.

De ces deux études, nous pouvons conclure qu'il est possible de réorganiser l'agencement spatial des cultures au sein des bassins versants, mais que cela nécessite de bien considérer les contraintes qui s'imposent aux exploitations agricoles. Par ailleurs, il semble indispensable de

³ Le terme « assolement » lorsqu'il concerne l'exploitation agricole est utilisé dans son sens restrictif : il ne signifie que le détail des soles de chaque culture. Il ne comprend pas l'organisation spatiale de ces cultures sur le territoire d'exploitation.

quantifier les réductions de ruissellement obtenues par ce biais, ces études ne se basent que sur des indicateurs de risque de ruissellement ou d'érosion.

1.3.2.2 Modifier les techniques culturales

Techniques culturales simplifiées

Lorsqu'il est question de réduire l'érosion par une modification des pratiques, il est souvent fait référence aux techniques culturales simplifiées (TCS) associées à une couverture végétale des intercultures. Ces techniques couvrent une large gamme, allant du semis direct sans aucun travail du sol à des itinéraires techniques faisant succéder plusieurs opérations de travail du sol à des profondeurs variables avant le semis. Le seul point commun entre ces différents itinéraires techniques est de ne jamais labourer le sol. De Ploey (1989) affirme déjà qu'il est nécessaire de se tourner vers ce type de techniques culturales pour limiter l'érosion dans la ceinture loessique du nord de l'Europe. Ces techniques ont été développées à l'origine aux Etats-Unis dans les années 40 (Gril et Duvoux, 1991). Depuis le début des années 90, elles connaissent un fort développement en Amérique du Sud où elles permettent, entre autres, de limiter l'érosion des sols (Landers, 2001 ; Peiretti, 2001). Cependant, alors qu'il préconise une large diffusion des TCS, De Ploey (1989) attire l'attention sur le fait que limiter l'érosion par ces techniques peut engendrer un surplus de ruissellement, susceptible de provoquer de l'érosion linéaire et par conséquent des départs de terre parfois très préjudiciables. Différents auteurs font ce même constat (Poesen et Govers, 1990 ; Boiffin et Monnier, 1994 ; Richard *et al.*, 2001). Ils notent que la réduction de l'érosion est surtout due au couvert végétal (mulch) et que le non travail du sol, en amenuisant la rugosité de surface et en accentuant la compacité du sol, tend à accroître le ruissellement.

Depuis la fin des années 80, différentes expérimentations relatives aux TCS sur placettes ou mini-parcelles ont été réalisées sur des sols limoneux. Le détail de chaque dispositif est donné dans le Tableau 3. Les résultats de ces études montrent que les TCS réduisent toujours l'érosion diffuse, mais ont un effet variable sur le ruissellement, la réduction observée étant toujours inférieure ou égale à celle obtenue pour l'érosion. Nous détaillons, dans les paragraphes suivants, les principaux résultats des études pré-citées. Etant donné la forte interaction entre le climat et les techniques culturales, il n'est pas toujours possible d'interpréter les différences observées. En particulier, les conditions climatiques au moment de la réalisation des opérations culturales modifient les effets des techniques par la suite.

Tableau 3 : Détail des dispositifs expérimentaux				
	Surface du dispositif	Type de précipitation	Paramètre mesuré	Période des mesures
Sturny, 1998	Test de la technique culturale – pas de détail sur le dispositif			
Zemenchik <i>et al.</i> , 2000				
Spiess <i>et al.</i> , 1999				
Maillard <i>et al.</i> , 1990	120 / 150 m ²	Réelle	Ru / Er	Du semis à la récolte
Edwards <i>et al.</i> , 2000	-	Réelle	Er	Année
Tebrügge et Düring, 1999	8 m ²	S – 63 mm/h	Ru / Er	-
Rhoton <i>et al.</i> , 2002	5 m ²	S – 50 mm/h	Ru / Er	Au semis
Robinson et Boardman, 1988	1 080 m ²	Réelle	Er / Inf	Du semis à la récolte
Van Vliet <i>et al.</i> , 1993	144 m ²	Réelle	Ru / Er	Année
Seta <i>et al.</i> , 1993	100 m ²	S – 66 mm/h	Ru / Er	Au semis
Van Dijk <i>et al.</i> , 1996b	33 m ²	Réelle	Ru / Er	Année
Ouvry, 1989-90	500 m ²	Réelle	Ru	Printemps / Quelques événements pluvieux
Martin <i>et al.</i> , 1997	20 m ²	Réelle	Ru / Er	Période d'interculture
Kwaad <i>et al.</i> , 1998	33 m ²	Réelle	Ru / Er	Période d'interculture

« S – xx mm/h » : pluie simulée à une intensité de xx mm/h / Ru : ruissellement / Er : érosion / Inf : infiltrabilité

La technique permettant de maintenir un couvert végétal tout au long de l'année consiste à réaliser des semis d'une culture donnée dans un couvert végétal vivant. Cette technique a été testée avec une monoculture de maïs et un couvert végétal de graminée ou de trèfle (Sturny, 1998, Zemenchik *et al.*, 2000). Avant l'implantation du maïs, soit le développement du couvert végétal est ralenti par l'application d'une faible dose de désherbant, soit le couvert est complètement détruit mécaniquement ou chimiquement au niveau du rang. Le maïs, semé directement, sans travail du sol, peut alors se développer, le développement du couvert reprenant après la récolte du maïs.

Une autre technique est couramment employée : le principe est de semer directement dans les résidus de la culture précédente ou d'une culture intermédiaire complètement détruite. En Suisse, Maillard *et al.* (1990) et Spiess *et al.* (1999) l'ont testée avec des cultures de maïs, betterave sucrière et pomme de terre. Les résultats obtenus dans des sols limoneux avec une culture de maïs montrent une réduction significative de l'érosion et du ruissellement (plus de 90%) par rapport à un semis classique sans pour autant qu'elle compromette le rendement. Edwards *et al.* (2000) au Canada ont testé sur pomme de terre l'effet d'un mulch de paille apportée après plantation et l'incorporation d'un compost avant plantation, celle-ci étant classique dans les deux cas. Sur les 3 années d'expérimentation, le mulch a permis de réduire de 50% les pertes en terre, mais le compost n'a eu strictement aucun effet. C'est l'effet protecteur du mulch de paille qui a permis de limiter l'érosion. Tebrügge et Düring (1999) confirment l'intérêt d'un semis direct par rapport à un semis non précédé d'un labour : ils parviennent, pour une rotation de céréales et colza, à une réduction de 86% de l'érosion et de seulement 38% du ruissellement à l'issue d'une simulation de pluie sur placette de 8 m².

Rhoton *et al.* (2002) ont, quant à eux, obtenu une suppression de l'érosion et une diminution de 26% du ruissellement en comparant un traitement de semis direct et un traitement classique. Il s'agissait là de simulations de pluie sur un lit de semis de maïs, sur des parcelles en monoculture depuis 9 ans.

D'autres dispositifs expérimentaux ont permis de comparer des techniques d'implantation classique avec des techniques de semis direct, et aussi, avec des implantations au travail du sol réduit sans aucun labour. Ces essais portent sur les céréales à paille d'hiver et de printemps et sur le maïs. Considérant les céréales à paille, Robinson et Boardman (1988) montrent que la réduction de l'érosion est plus importante en condition de semis direct avec résidus que sans résidu, les deux techniques produisant moins d'érosion que le semis classique. Bien que le ruissellement n'ait pas été estimé, des mesures d'infiltrabilité indiquent qu'il n'y a aucune différence d'infiltration entre les divers traitements. Une autre expérimentation relative aux céréales à paille a été conduite pendant quatre ans (Van Vliet *et al.*, 1993 - Tableau 4). Sur les quatre années de suivi, l'érosion annuelle est la plus faible avec le semis direct et la plus élevée avec le semis classique, le travail du sol réduit étant intermédiaire. Pour ce qui est du ruissellement, c'est cette dernière technique qui amène la diminution la plus importante. Le ruissellement constaté en condition de semis direct est : soit inférieur, soit supérieur au ruissellement généré par le semis classique, parfois même de manière considérable (140% en 1989-1990).

Tableau 4 : Erosion et ruissellement annuel pour trois itinéraires techniques (British Columbia, Canada) (d'après Van Vliet *et al.*, 1993)

Semis	Ruissellement annuel (mm)			Erosion annuelle (kg/ha)		
	Classique	Réduit	Direct	Classique	Réduit	Direct
1987-1988	34.4	17.1	34.2	866	605	190
1988-1989	23	6	28.3	281	92	25
1989-1990	11.5	8.9	27.9	512	257	69
1990-1991	102.5	73.1	90.2	697	468	296

Sur maïs, Seta *et al.* (1993) obtiennent de résultats différents : pour cette culture, le semis direct tend à réduire à la fois le ruissellement et l'érosion de manière significative. Cependant, l'expérimentation ayant consisté en des simulations de pluie juste après le semis, elle ne donne pas d'indication sur les pertes en terre ni sur le ruissellement annuel. En 1992 puis 1993, Van Dijk *et al.* (1996b) ont mesuré, tout au long de l'année culturale, l'érosion et le ruissellement produits sur des parcelles implantées en maïs, selon différents itinéraires techniques. D'après les résultats de cette étude, seul un couvert végétal (mulch d'une interculture ou paillage après semis) permet de limiter l'érosion par rapport à une culture semée de façon conventionnelle, ceci parce que l'ensilage du maïs ne laisse aucun résidu sur le sol. Le ruissellement n'est réduit que dans le cas d'un paillage des semis et dans une proportion moindre que l'érosion (50% au lieu de 90%).

La majorité des expérimentations décrites ci-dessus concerne les cultures de céréales et de maïs. A l'exception des études menées en Suisse et au Canada, les TCS ne sont jamais testées sur pomme de terre et betteraves sucrières, cultures pourtant fréquentes dans les zones limoneuses du nord de l'Europe. Des résultats mentionnés, nous concluons que les TCS permettent de réduire significativement l'érosion par rapport à une implantation classique mais que leur effet sur le ruissellement est variable. Il semble, en effet, qu'un non travail du sol diminue peu le ruissellement, voire l'augmente mais qu'un travail du sol réduit soit plus efficace pour limiter le ruissellement.

Insertion d'opérations culturales de travail du sol

En dehors des TCS, une autre possibilité d'intervention est d'augmenter l'infiltration et la capacité de stockage à la surface du sol par un travail du sol qui recrée une porosité et de la rugosité. Lorsque la culture est en place, il existe relativement peu de possibilités de réaliser un travail du sol⁴. La principale réside dans le binage des cultures sarclées, dans un but de désherbage, ainsi que dans le rebutage des pommes de terre. Des essais sur mini-parcelles de 500 m² emblavées en betteraves sucrières montrent qu'il est possible de réduire le ruissellement d'un facteur compris entre 7 et 20 par un binage (Ouvry, 1989-90). L'effet est durable si celui-ci est réalisé juste avant la couverture de l'interrang par les betteraves, ce qui empêche la formation d'une nouvelle croûte de battance. En revanche, l'interculture offre davantage de possibilités d'intervention, sous réserve que le climat soit favorable. Martin (1999) teste ainsi différentes techniques culturales sur des placettes de 20 m². A l'issue de cette expérimentation, il apparaît que, par rapport à un non travail du sol, un travail du sol permet de limiter le ruissellement, et ceci d'autant plus qu'il forme des grosses mottes, s'il est réalisé en condition sèche. Toutefois, il constate que le travail du sol pratiqué s'accompagne d'une augmentation de l'érosion diffuse. En outre, la présence de résidus de récolte importants a un effet bénéfique sur la limitation du ruissellement et de l'érosion, effet perdu si les résidus sont enfouis (Martin, 1997). Les résultats des expérimentations de Kwaad *et al.* (1998) confirment sur des monocultures de maïs en mini-parcelle l'effet du travail du sol en hiver sur la diminution du ruissellement par rapport à un non travail du sol après la récolte. En revanche ils obtiennent également une réduction de l'érosion. Durant l'interculture, l'implantation d'un couvert végétal permet également de réduire le ruissellement sans augmenter l'érosion. Ceci est possible si le couvert se développe assez rapidement avant que la croûte de battance ne se forme et maintienne ainsi une infiltration importante Martin *et al.* (1997).

L'ensemble de ces expérimentations montre donc qu'il est souvent difficile d'obtenir une diminution simultanée de l'érosion diffuse et du ruissellement, et ceci que ce soit par des techniques de semis simplifiées ou par des techniques culturales relatives à la gestion de

⁴ Le passage d'une houe rotative dans un semis de blé dans le but de briser la croûte de battance est actuellement testé en Haute-Normandie.

l'interculture. L'effet d'un non travail du sol et la permanence d'un couvert végétal semblent plus efficaces pour réduire l'érosion, alors qu'un travail du sol contribue à réduire efficacement le ruissellement.

1.3.3 Réduction de l'érosion par ruissellement concentré : nécessaire couplage entre aménagements et pratiques agricoles

De l'analyse des différents moyens de limiter les dégâts causés par le ruissellement érosif émergent deux points :

- pour éviter aux zones vulnérables de subir des dégâts, la mise en place d'aménagements curatifs ou préventifs est efficace mais requiert un entretien coûteux, en raison des dépôts de sédiments provenant des terres agricoles ;
- les modifications des pratiques agricoles peuvent limiter l'érosion diffuse ainsi que l'érosion concentrée par une réduction du ruissellement, mais pas toujours de façon simultanée. Dans le cadre de la présente étude, nous chercherons en premier lieu à limiter le ruissellement, les dégâts les plus importants provenant de l'érosion concentrée causée par le ruissellement, et moins de l'érosion diffuse.

En jouant de la complémentarité des deux types de solutions, il est par conséquent possible de limiter les risques de manière significative. D'une part, les aménagements permettent de limiter les dégâts catastrophiques. D'autre part, les modifications des pratiques, si elles ont un effet limité en cas d'événement pluvieux catastrophique (Dubreuil *et al.*, 2002), elles contribuent à lutter contre les dégâts chroniques. Elles augmentent aussi l'efficacité des aménagements par une moindre sédimentation (Verstraeten *et al.*, 2002). Il en résulte des frais d'entretien moindres pour les collectivités. Enfin, aménager a un coût, et si une modification des pratiques agricoles conduit à une réduction du ruissellement, cela permettra de diminuer la capacité des aménagements ou leur nombre.

Souhaitant orienter notre travail sur le fonctionnement des exploitations agricoles, nous avons fait le choix de nous focaliser sur la réduction du ruissellement et de l'érosion par les pratiques agricoles. Toutefois, nous ne nous intéresserons pas à la modification des productions de l'exploitation car elle implique souvent une remise en cause des objectifs de production de l'agriculteur. Quant aux aménagements, leur mise en place soulève principalement des questions d'ordre hydraulique ou juridique. Le fonctionnement de l'exploitation n'est perturbé que dans des situations particulières : redécoupage parcellaire suite à l'implantation d'une bande enherbée ou à la remise en herbe d'une parcelle pour créer une prairie inondable, etc. Enfin, notons que notre travail n'abordera pas les possibilités de redécoupage du parcellaire intra-exploitation.

2 Maîtrise du ruissellement érosif au sein de l'exploitation agricole

Nous avons vu, dans la partie précédente, qu'un moyen de réduire les dégâts liés à l'érosion des sols est de modifier les pratiques agricoles, aussi bien en ce qui concerne la localisation spatiale des cultures que les techniques culturales. Ces pratiques sont mises en œuvre de manière cohérente par l'agriculteur, comme l'exprime le concept de système de culture. Dans ce chapitre, nous exposons pourquoi il est primordial de conduire une étude sur les déterminants techniques des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole pour mettre en œuvre ces modifications. Puis, dans un deuxième temps, nous faisons le bilan des différentes approches employées pour étudier les possibilités de modification des pratiques agricoles en vue de maîtriser le ruissellement et l'érosion concentrée.

2.1 Les contraintes posées par une modification des pratiques au sein de l'exploitation agricole

Les modifications apportées aux pratiques agricoles peuvent avoir des répercussions sur la fonction de production des exploitations agricoles. Elles peuvent s'envisager de deux manières différentes :

- appliquer, de manière obligatoire ou facultative, des techniques dont l'efficacité vis-à-vis de la maîtrise du ruissellement érosif est avérée en proposant une compensation financière pour la perte de niveau de production éventuelle liée à leur mise en œuvre (Napier, 1990).
- appliquer uniquement des techniques n'affectant pas la fonction de production des exploitations agricoles (Papy *et al.*, 1996). Ici, les compensations financières ne sont pas nécessaires. En revanche, il importe de connaître, au-delà de la pertinence des techniques vis-à-vis du ruissellement érosif, les conséquences sur le fonctionnement des exploitations.

Nous faisons le choix de nous placer dans ce deuxième cas de figure, en considérant que toute modification compatible avec le fonctionnement des exploitations sera plus facilement adoptée par les agriculteurs, et ceci d'autant plus qu'elles n'engendrent aucun coût financier. Dans les parties suivantes, nous détaillons les différents types de répercussions liées aux modifications de pratiques, en distinguant les changements d'occupation du sol et les modifications de techniques culturales.

2.1.1 Des contraintes liées à une modification de l'occupation du sol

Certaines modifications apportées à l'occupation du sol ne peuvent s'envisager, le parcellaire des exploitations présentant un certain nombre de contraintes. Celles-ci peuvent être classées en deux catégories : les contraintes liées au terrain (pente, texture du sol, etc.) et celles inhérentes à la structure du territoire (forme des parcelles, facilité d'accès, etc.) (Morlon et Benoit, 1990). En fonction de ces contraintes, l'agriculteur fait des choix d'affectation de culture pour chaque parcelle. Par exemple, sur une parcelle caillouteuse ne sont pas implantés des cultures dont on récolte la racine ou un tubercule. La structure du parcellaire joue également un rôle. Prenons le cas des cultures fourragères : leur récolte devant être transportée à proximité des bâtiments d'élevage, elles sont, dans la mesure du possible, cultivées sur des parcelles non loin du corps de ferme. Proposer une modification de l'occupation du sol peut parfois aller à l'encontre de ces contraintes, amenant l'agriculteur à cultiver certaines cultures sur des terrains peu appropriés d'un point de vue agronomique ou organisationnel. En confrontant les exigences des cultures et les caractéristiques du territoire d'exploitation, nous pouvons identifier, pour chaque culture de l'assolement, les parcelles où l'agriculteur est susceptible de les implanter et celles où il ne l'est pas.

Un autre moyen de modifier l'occupation du sol d'un bassin versant consiste à changer l'ordre de succession des cultures sur les parcelles de l'exploitation sans modifier l'assolement. Cela permet notamment de réduire la concentration de cultures ruisselant au même moment. Cependant, ceci n'est pas sans conséquence sur le rendement des cultures. En effet, l'agriculteur applique une succession de cultures de manière à valoriser les interactions entre cultures, à savoir l'effet de la culture précédente et la sensibilité de la culture suivante. Cette pratique aide à maximiser le rendement et à maintenir sur le long terme la fertilité des sols, un faible risque de maladie cryptogamique, d'envahissement par les adventices, etc. (Sebillotte, 1990, Dogliotti *et al.*, 2003). Modifier l'ordre de succession des cultures peut avoir un effet direct sur le rendement des cultures ou bien un effet indirect sur le long terme sur les caractéristiques du milieu (fertilité du sol, pression parasitaire, etc.). Dans ce dernier cas, la baisse de rendement qui en découle peut être compensée par un recours plus important aux intrants, ce qui entraîne une augmentation du coût de production et d'autres risques environnementaux. Certaines modifications apportées à l'ordre de succession des cultures n'affectent pas la production et peuvent de ce fait être facilement acceptées par les agriculteurs. Il s'agit des permutations de cultures ayant les mêmes effets agronomiques. Pour modifier l'ordre de succession des cultures, les contraintes d'ordre agronomique à considérer se traduisent sous la forme de délais à respecter entre deux implantations de la même culture sur la même parcelle et de couples de cultures ne pouvant pas se succéder.

2.1.2 Des contraintes liées à une modification des techniques culturales

Au sein des exploitations agricoles, l'adoption d'une technique culturale peut parfois se heurter à des contraintes d'ordre agronomique. C'est le cas du semis d'une culture intermédiaire durant l'interculture précédant une culture de printemps, dans le Pays de Caux en Haute-Normandie (Martin *et al.*, accepté). Dans cette région, une part importante des terres labourables est couverte par la succession blé-lin⁵. Entre ces deux cultures, il est théoriquement possible de semer une moutarde précocement, le blé étant récolté en août. La moutarde peut se développer avant la dégradation de l'état de surface du sol, limitant ainsi le ruissellement. Une des caractéristiques de la culture de lin est sa faible exigence en azote, tout excès pouvant se traduire par la verse et donc une perte importante de chiffre d'affaire. Or l'implantation d'une moutarde a comme conséquence un piégeage de l'azote à l'automne, azote libéré au printemps lors de la reprise de la minéralisation. Il en résulte un risque d'excès d'azote pour la culture du lin qui suit. Cette culture à haute valeur ajoutée représentant dans la région une part importante du revenu, les agriculteurs préfèrent ne pas courir ce risque et n'implantent donc pas de moutarde avant un lin.

Modifier les techniques culturales peut parfois être limité par les contraintes d'organisation du travail qui s'imposent aux agriculteurs. Ceux-ci doivent, en effet, disposer de suffisamment de temps pour l'implantation des cultures intermédiaires. Or, dans les régions du nord de l'Europe, ces implantations entrent en compétition avec les travaux de récolte et de semis de cultures d'hiver, travaux prioritaires pour les agriculteurs mais parfois retardés par des conditions climatiques défavorables. Par exemple, les semis de blé, généralement réalisés entre octobre et novembre, voire début décembre, peuvent, certaines années très pluvieuses, être retardés aux mois de janvier et février. Dans ces conditions, il est évident que les agriculteurs ne sèment pas de culture intermédiaire, se consacrant aux semis des céréales d'hiver (Martin *et al.*, accepté). En résumé, les techniques culturales peuvent donc poser des problèmes d'organisation du travail, dus à des concurrences entre travaux ou bien à la non disponibilité des jours en raison des conditions climatiques.

Par ailleurs, un changement de technique culturale peut avoir des répercussions économiques. Ainsi l'insertion d'une opération culturale supplémentaire en interculture entraîne une augmentation des charges du fait de l'usure du matériel et de la consommation de gazole. S'il ne dispose pas du matériel, l'agriculteur doit investir seul ou en copropriété, ou avoir recours aux services d'un tiers. Dans le cas d'une simplification du travail du sol et des techniques de semis, le bilan économique peut être positif. Koga *et al.* (2003) estiment à 36% la diminution de consommation de gazole pour une culture de blé d'hiver semé sans labour et avec une

⁵ Martin, 1997, à partir de trois études réalisées entre 1989 et 1995, établit que cette succession occupe 14% des terres labourables des exploitations enquêtées, soit 4 433 ha de terres labourables.

préparation du sol limitée à un seul passage de herse rotative, par comparaison à un semis avec labour et deux passages de herse rotative. Cependant, cette diminution du coût de fonctionnement peut facilement être annulée, voir inversée, par une augmentation des charges de désherbage entraînées par le non labour. Un gain important ne sera généré que dans les conditions suivantes : diminution du parc matériel ou agrandissement de la surface cultivée, permis grâce à la réduction du temps de travail par hectare (Rieu, 2001).

Au travers de ces exemples, nous mettons en exergue que différents types de contraintes s'opposent à la modification des pratiques culturales :

- des contraintes issues de l'affectation des facteurs de production aux différentes productions de l'exploitation agricole : la terre, la main d'œuvre et le matériel;
- des contraintes agronomiques liées à la conduite des cultures qui ne permettent pas toujours de modifier l'ordre de succession des cultures ou les itinéraires techniques ;
- des contraintes économiques dues à une augmentation des charges de mécanisation et d'intrants. Soulignons que le passage aux techniques culturales simplifiées peut également permettre un gain.

2.2 Bilan des études traitant d'une modification des pratiques agricoles

Nous étudions maintenant comment est abordé, dans la bibliographie, le changement de pratiques culturales pour maîtriser le ruissellement et l'érosion. Cette analyse nous permettra de distinguer les approches les plus couramment utilisées de celles qui le sont plus rarement et qui peuvent générer des difficultés dans la mise en œuvre des modifications des pratiques agricoles. En effet, Helming (2001) note que si des mesures de conservation des sols ont été largement développées, leur adoption par les agriculteurs demeure faible.

Les travaux relatifs à la maîtrise du ruissellement érosif par les pratiques agricoles peuvent se classer en quatre catégories en fonction de l'échelle spatiale ou fonctionnelle d'analyse : parcelle, exploitation agricole, bassin versant et région.

2.2.1 Echelle parcellaire

Comme nous l'avons exposé au paragraphe 1.3.2.2 p. 27, à l'échelle parcellaire de nombreuses études sont conduites pour évaluer l'efficacité de différentes techniques culturales pour réduire le ruissellement et l'érosion. Certaines de ces études ne se limitent pas à ce seul critère. Ainsi, des travaux évaluent l'impact des techniques sur le rendement des cultures (Maillard *et al.*, 1990 ; Kwaad *et al.*, 1998). D'autres apportent davantage qu'une

simple évaluation du rendement ; elles cherchent à réaliser un bilan économique complet sur la base d'expérimentations portant sur le cycle de production d'une culture (Spiess *et al.*, 1999) ou sur une succession culturale (Archer *et al.*, 2002, Zenter *et al.*, 2002). L'évaluation des charges est variable d'une étude à l'autre. Si elle comprend parfois l'ensemble des charges de fonctionnement (semences, intrants et gazole), de main d'œuvre et de structure liées au matériel (Zenter *et al.*, 2002), elle n'intègre pas toujours le coût de la main d'œuvre (Spiess *et al.*, 1999) ni les charges de structure du matériel (Archer *et al.*, 2002). A partir de ces études, il est possible de réaliser un bilan économique entre le gain ou la perte de rendement et l'augmentation ou la diminution des charges, et d'estimer si la technique culturale anti-érosive représente un coût ou un bénéfice pour les agriculteurs. Enfin, quelques études évaluent même le gain que représentent les mesures anti-érosives pour le domaine public, en comparant le coût de leur mise en place avec celui des dégâts engendrés par l'érosion avant mise en place des mesures, l'efficacité de ces dernières pouvant être modulée (Elyakime, 2000).

2.2.2 Echelle de l'exploitation agricole

Assez peu d'études sont conduites à cette échelle en comparaison avec celles menées à l'échelle parcellaire. Il s'agit essentiellement d'évaluations économiques consistant, non pas à réaliser une analyse globale de l'exploitation, mais à agréger des résultats de marges brutes par hectare de culture en fonction des techniques culturales (Schuler et Kächele, 2003). Cependant, lorsque les changements de pratiques concernent la remise en herbe de terres arables, l'agrégation des résultats par hectare de culture ne peut être effectuée car la prairie n'est essentiellement valorisée qu'à travers les activités d'élevage qui lui sont associées. L'évaluation économique doit alors porter sur l'ensemble des productions de l'exploitation ; c'est d'ailleurs ce que font les éleveurs, jugeant la rentabilité des prairies à travers la rentabilité de leur exploitation (Mathieu et Joannon, 2003).

2.2.3 Echelle du bassin versant

Les travaux entrepris à cette échelle concernent avant tout l'évaluation de la mise en place de modifications des pratiques agricoles grâce à des simulations à l'aide de modèles de ruissellement et d'érosion. Ces simulations s'appuient sur des résultats obtenus à l'échelle parcellaire et s'appliquent principalement à des changements de techniques culturales. Est généralement testée une modification des techniques sur l'ensemble des terres arables du bassin versant étudié (Schmidt *et al.*, 2001). Dans d'autres cas, la modification est partielle : les pratiques sont modifiées dans les parcelles à risque (Verstraeten *et al.*, 2002), ou dans les parcelles présentant une position topographique particulière dans le bassin versant (Dubreuil *et al.*, 2002). Des simulations sont également réalisées pour tester une modification de l'organisation spatiale des cultures du bassin versant sans modifier la surface de chaque

culture (Jaziri *et al.*, accepté). Le point commun de toutes ces études est que l'entité exploitation agricole y est absente : les modifications sont testées sans que soit évaluée la possibilité de mise en œuvre des solutions préconisées par les agriculteurs, que ce soit au niveau individuel ou collectif. Pour un projet mené en Flandres, Verstraeten *et al.* (2003) rapportent que le rôle des scientifiques est d'évaluer les problèmes posés par l'érosion et l'efficacité des solutions, en ayant recours à la modélisation, mais que la mise en œuvre des programmes d'actions est du ressort des bureaux d'étude. Ce point de vue nous semble discutable : l'insertion des solutions dans le fonctionnement des exploitations agricoles nous paraît également de la compétence des scientifiques.

Néanmoins, certaines études vont plus loin que le seul test de l'efficacité des solutions. C'est le cas d'un travail réalisé sur un bassin versant en Norvège (Botterweg *et al.*, 1998). Différents scénarios (attribution de subventions pour réduire le travail du sol en automne, obligation d'implanter des cultures intermédiaires, etc.) y sont testés grâce à un modèle d'érosion. En complément, le coût engendré pour les agriculteurs par ces différents scénarios est évalué de la manière décrite au paragraphe précédent. Le Bissonnais *et al.* (2003) ont, quant à eux, évalué la rentabilité de la mise en œuvre d'aménagements dans un petit bassin versant de 94 ha dans le Pays de Caux. Pour ce faire, ils ont couplé un modèle d'érosion et un modèle économique, ce dernier calculant le coût et le gain des aménagements pour les agriculteurs ainsi que pour le domaine public, en l'occurrence une commune.

Il apparaît donc qu'à cette échelle d'étude, les travaux portent essentiellement sur l'évaluation de l'impact des solutions proposées sur le ruissellement et l'érosion. Les contraintes à la mise en place de ces modifications inhérentes au fonctionnement des exploitations sont rarement prises en compte, si ce n'est d'un point de vue économique.

2.2.4 Echelle régionale

Les études menées à l'échelle régionale s'intéressent principalement à l'impact des politiques agricoles sur les changements d'occupation du sol et à la modélisation de ces impacts afin de prévoir l'évolution de l'occupation du sol en fonction de différents contextes économiques. Ainsi, Souchère *et al.* (2003) montrent que la politique agricole de l'Union Européenne a été, entre autres, à l'origine du retournement des prairies en Haute-Normandie : les subventions accordées aux agriculteurs pour les céréales les ont poussés à remplacer l'herbe par du maïs dans l'alimentation des bovins. En Afrique du Sud, une politique de restriction des importations de blé en 1930 a entraîné une hausse des prix du blé sur le marché intérieur. Ceci a incité les agriculteurs à cultiver des zones sensibles dans la région du Western Cape, causant d'importants dégâts aux sols de la région (Meadows, 2003). Nous pouvons également citer, à l'échelle régionale, l'étude de Fohrer *et al.* (2001) qui ont modélisé l'évolution de l'occupation du sol en fonction du contexte économique, en se basant sur une maximisation du revenu tiré de l'exploitation de la terre.

Cet inventaire d'études envisageant une modification des pratiques agricoles dans le but de réduire le ruissellement et l'érosion montre que la principale contrainte considérée est d'ordre économique, ceci quelle que soit l'échelle spatiale. La contrainte agronomique de conduite des cultures est essentiellement prise en compte à l'échelle parcellaire. En revanche, celle résultant d'une répartition des facteurs de production au sein de l'exploitation agricole n'est pas intégrée. Notons que le lien entre les différentes échelles d'étude n'est pas toujours fait. En particulier, la prise en compte de l'exploitation agricole dans les travaux conduits à l'échelle du bassin versant est rarement effective.

3 Problématique : quelles marges de manœuvre au sein des exploitations agricoles pour réduire le ruissellement à l'échelle d'un bassin versant ?

3.1 Synthèse

Les points développés dans les trois premières parties de ce chapitre nous conduisent aux conclusions suivantes :

- Les dégâts, catastrophiques ou chroniques, causés par les phénomènes érosifs dans le bassin loessique du nord de l'Europe résultent essentiellement d'une accumulation d'eau de ruissellement en amont des bassins versants et sur leurs versants. Le flux d'eau qui se concentre à la faveur de dépressions topographiques ou de motifs anthropiques est à l'origine de l'érosion linéaire et des dépôts à l'aval. De cela, nous en déduisons que l'étude et la maîtrise de ces phénomènes doivent être menées à l'échelle du bassin versant. De plus, il convient de se focaliser sur le ruissellement et l'érosion concentrée, principalement mis en cause dans les problèmes rencontrés contrairement à l'érosion diffuse.
- Si les aménagements jouent un rôle important dans la maîtrise des dégâts catastrophiques, et même chroniques, leur intérêt est limité en raison de leur comblement progressif et de leur nécessaire entretien. Seule, la modification des systèmes de culture permet de ralentir la sédimentation. En effet, par ce biais, le ruissellement produit sur les parcelles agricoles ainsi que l'érosion diffuse sont réduits. Ceci aide, en outre, à réduire les quantités d'eau qui atteignent les ouvrages de stockage à l'aval. La réduction du ruissellement et celle de l'érosion diffuse pouvant être antagonistes, l'objectif prioritaire est de réduire le ruissellement à l'origine de l'érosion concentrée, cause majeure des départs de terre. Nous parlerons de « ruissellement érosif » pour signifier que le ruissellement pose problème non

seulement par les quantités d'eau générées, mais surtout par son aptitude à provoquer de l'érosion linéaire.

- A l'échelle parcellaire, de nombreuses expérimentations permettent de dégager les différents effets des systèmes de culture sur le ruissellement et l'érosion. Ces effets méritent d'être approfondis pour le contexte local de notre étude. Enfin, nous remarquons qu'à l'échelle du bassin versant, des études relativement peu nombreuses analysent l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture sur le ruissellement.
- Réduire le ruissellement par une modification des systèmes de culture nécessite la prise en compte des contraintes qui existent au niveau de l'exploitation agricole. Si les contraintes économiques et agronomiques de conduite des cultures sont bien étudiées, ce n'est pas le cas pour les contraintes de répartition des facteurs de production techniques (terre et temps de travail) au sein de l'exploitation.
- Enfin, les travaux visant à tester l'effet des modifications des systèmes de culture à l'échelle du bassin versant (entité spatiale d'étude du processus physique) ne sont que très rarement couplés à une étude des possibilités de modification des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole (entité décisionnelle de construction des systèmes de culture).

Sur la base de ces conclusions, nous avons construit notre sujet d'étude, qui tient compte des échelles d'étude correspondant aux phénomènes étudiés, et qui explore des aspects encore peu analysés. Notre étude concerne les possibilités de modifier les systèmes de culture en tenant compte des contraintes techniques au niveau de l'exploitation agricole et en évaluant l'effet de ces modifications à l'échelle du bassin versant. Celles-ci doivent être conçues de manière coordonnée entre les différentes exploitations agricoles par rapport au fonctionnement hydraulique du bassin versant. Notre objectif est donc le suivant : définir une méthodologie qui permette, en tenant compte du fonctionnement technique des exploitations agricoles, de concevoir et de localiser des modifications de systèmes de culture (localisation des cultures sur le territoire d'exploitation et itinéraire technique) au sein d'un petit bassin versant agricole, dans le but de limiter les problèmes de ruissellement érosif. Par ailleurs, nous chercherons à ce que cette méthodologie soit la plus opérationnelle possible afin d'en faciliter l'application par les acteurs de terrain. Pour cela, nous mènerons conjointement une évaluation du ruissellement à l'échelle du bassin versant et une analyse des marges de manœuvre des agriculteurs pour modifier les systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole. Il ne s'agit pas de chercher à coordonner l'ensemble des modifications à l'échelle du bassin versant mais d'envisager ce qui peut être fait individuellement à l'échelle de l'exploitation et ce qui nécessite obligatoirement une coordination entre agriculteurs voisins. Pour ces dernières actions, nous proposons d'apporter des éléments techniques sur les modifications des systèmes de culture qui pourraient la faciliter cette nécessaire coordination.

Etant donné que, dans une exploitation agricole, la répartition des facteurs techniques de production est raisonnée en fonction des objectifs de production (Papy, 2001), nous pouvons poser l'hypothèse suivante qui se décompose en deux parties :

- d'une exploitation à l'autre, les marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture varient, puisque les objectifs et les facteurs de production sont différents, et il est possible d'identifier différents types d'exploitations sur la base de ces marges de manœuvre ;
- dans un bassin versant, l'utilisation des marges de manœuvre spécifiques à chaque exploitation devrait permettre de réduire le flux de ruissellement.

3.2 Démarche d'analyse

La démarche d'analyse bâtie pour vérifier les hypothèses énoncées ci-dessus comporte trois volets complémentaires. Dans les chapitres suivants, nous les détaillerons au fur et à mesure des besoins, mais en voici les grandes lignes. Cette démarche sera appliquée sur un bassin versant pris comme cas d'étude.

Premier volet : analyser l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif

Ce travail est mené tout d'abord à l'échelle parcellaire pour évaluer l'effet de différentes occupations du sol et celui des techniques culturales sur le ruissellement. Puis nous analysons l'effet des systèmes de culture à l'échelle du bassin versant, en particulier celui de leur organisation spatiale sur le ruissellement. Pour ceci, nous proposons une méthode de diagnostic basée sur l'utilisation d'un modèle de ruissellement. Cette analyse est nécessaire dans la mesure où les connaissances à ce sujet ne sont pas toutes concordantes à l'échelle parcellaire et sont peu nombreuses à l'échelle du bassin versant. Elles ne nous permettent donc pas de concevoir des modifications des systèmes de culture ayant une efficacité optimale sur la réduction du ruissellement.

Deuxième volet : analyser les possibilités de modification des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à l'entité décisionnelle qu'est l'exploitation agricole. La finalité de ce volet est de déterminer les marges de manœuvre dont disposent les agriculteurs pour modifier leurs systèmes de culture par rapport à l'affectation des facteurs de production : terre et temps de travail. Nous considérons dans notre étude les contraintes agronomiques de conduite des cultures sur la base des règles mises en œuvre par les agriculteurs. Ce type d'étude est complémentaire de celles portant habituellement sur les répercussions économiques et agronomiques d'une modification des systèmes de culture.

Troisième volet : concevoir des modifications des systèmes de culture permettant de réduire le ruissellement à l'échelle d'un bassin versant

Ce troisième volet consiste à coupler les résultats obtenus dans les deux premières étapes du travail. L'étude de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement aura permis de déduire un classement relatif des occupations du sol et des techniques culturales par rapport à la production de ruissellement. Elle aura également mis en évidence le type d'organisation spatiale des systèmes de culture permettant de réduire le ruissellement à l'échelle du bassin versant. Nous sélectionnerons alors les types de modifications compatibles avec les marges de manœuvre identifiées à la seconde étape. Parmi les modifications, certaines ne nécessiteront qu'une coordination interne des systèmes de culture au sein de l'exploitation ; d'autres impliqueront une coordination des systèmes de culture entre exploitations. Enfin, nous testerons avec le modèle de simulation, utilisé pour le volet 1, l'effet de la combinaison des modifications conçues dans chaque exploitation agricole et organisées sur l'ensemble du bassin versant.

CHAPITRE 2

**Couplage de deux échelles d'étude
le bassin versant et l'exploitation agricole
Méthodologie**

Chapitre 2 : Couplage de deux échelles d'étude, le bassin versant et l'exploitation agricole : méthodologie

Pour répondre à notre objectif, nous avons choisi d'analyser de manière détaillée un cas d'étude. Ayant précédemment posé la problématique sur la base d'une synthèse bibliographique, nous consacrons ce deuxième chapitre à la description du dispositif d'étude. Tout d'abord, nous détaillons en trois étapes la démarche d'analyse, brièvement évoquée au chapitre précédent. Nous exposons à la fois les outils et les concepts utilisés, et la manière de les combiner entre eux. Puis, nous justifions le choix du cas d'étude, c'est-à-dire celui d'une région caractéristique des phénomènes érosifs de la ceinture loessique du nord de l'Europe, le Pays de Caux en Haute-Normandie, ainsi que celui du bassin versant plus particulièrement considéré, Bourville.

1 Démarche d'analyse

Nous avons exposé dans le premier chapitre que modifier les pratiques agricoles dans le but de maîtriser le ruissellement érosif à l'origine de l'érosion concentrée nécessite préalablement une double analyse de territoire : un premier diagnostic sur les effets des systèmes de culture à l'échelle du bassin versant et un second sur les possibilités de modifications des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole. Les résultats de ces deux analyses complémentaires permettent de concevoir des modifications des systèmes de culture, compatibles avec les marges de manœuvre des agriculteurs concernés et efficaces vis-à-vis de la réduction du ruissellement. Dans cette partie, nous allons successivement expliciter la méthode utilisée pour traiter ces trois étapes, à savoir les deux diagnostics et le couplage des résultats obtenus pour déterminer les modifications pertinentes des systèmes de culture.

1.1 Diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif

Le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif, qui doit être conduit à l'échelle du bassin versant, implique l'utilisation d'un modèle de simulation du ruissellement. Cependant, ce diagnostic est réalisable à condition que les effets des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle parcellaire soient connus. La synthèse bibliographique ayant mis en évidence des contradictions entre les différentes études menées à cette échelle, nous devons avant toute préciser ces effets pour la région d'étude sélectionnée. Dans un premier temps, nous explicitons le principe de cette analyse. Dans un second, nous expliquons ce qui a motivé le choix du modèle de simulation utilisé pour le diagnostic à l'échelle du bassin versant. Nous détaillons alors le fonctionnement du modèle retenu et les conséquences pour la réalisation du diagnostic.

1.1.1 Diagnostic à l'échelle parcellaire

A l'échelle parcellaire, pour des sols de texture limoneuse, le ruissellement est la conséquence d'une modification des états de surface du sol sous l'effet conjoint des systèmes de culture et du climat. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la formation d'une croûte de battance diminue très fortement l'infiltration et que la disparition de la rugosité de surface réduit le stockage de l'eau dans les micro-dépressions à la surface du sol. Le développement d'un couvert végétal peut contre-balancer ces effets, d'une part en stockant de l'eau sur son feuillage et en créant une zone d'infiltration préférentielle à la base de la tige, d'autre part en limitant par le couvert la dégradation de l'état de surface du sol. Des interventions culturales peuvent produire des effets similaires : travail du sol qui, en fragmentant la croûte de

battance, crée de la rugosité et augmente l'infiltration ou bien semis d'une culture intermédiaire.

Réaliser à l'échelle parcellaire un diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement consiste donc à étudier, dans un premier temps, dans quelle mesure les systèmes de culture modifient les états de surface du fait des itinéraires techniques appliqués. L'évolution des états de surface étant dépendante du climat (précipitations, température), il est donc nécessaire d'évaluer conjointement :

- les modifications des états de surface par les systèmes de culture. Ceci comprend l'effet des itinéraires techniques ainsi que de la succession culturale, l'effet d'une technique culturale sur les états de surface étant fonction non seulement de la technique mais aussi de la culture précédente. Les grandes catégories d'intervention modifiant les états de surface sont : les labours, les préparations des lits de semences, les semis, les désherbages mécaniques, les récoltes et les opérations de gestion de l'interculture (déchaumages, semis de cultures intermédiaires).
- l'effet du climat entre deux interventions culturales : dégradation des états de surface sous l'action des précipitations et développement du couvert végétal sous l'effet des précipitations et des températures.

Concrètement, nous étudions successivement ces deux types d'effets. Cela implique de disposer d'une base de données de relevés parcellaires suffisamment représentative des systèmes de culture rencontrés dans la région d'étude et de la diversité des conditions climatiques. Dans la mesure où cette base de données est suffisamment exhaustive et précise, elle pourra alors être utilisée pour établir des trajectoires d'états de surface.

La deuxième étape du diagnostic parcellaire porte sur l'analyse de l'effet des états de surface sur le ruissellement : il s'agit d'analyser comment ces états réagissent à différentes séquences pluvieuses.

1.1.2 Choix d'un modèle de simulation pour le diagnostic à l'échelle bassin versant

De nombreux modèles de simulation du ruissellement ont été élaborés, mais tous n'ont pas été développés avec le même objectif et ne simulent pas le ruissellement aux mêmes échelles spatiale et temporelle. De même, le niveau de description des processus du ruissellement, et donc les facteurs pris en compte, ainsi que la quantité de données d'entrée nécessaires, diffèrent pour chaque modèle. Tout d'abord, nous inventorions les caractéristiques souhaitées du modèle à utiliser, compte tenu de nos attentes vis-à-vis des simulations. Puis, nous faisons le bilan des principaux modèles existants et choisissons celui correspondant le mieux à nos critères de sélection.

1.1.2.1 Caractéristiques attendues

Les caractéristiques attendues du modèle de simulation concernent les échelles spatiale et temporelle ainsi que la nature des facteurs pris en compte. Nous détaillons et justifions ci-après successivement ces trois critères de sélection.

Echelle spatiale

Le type de ruissellement que nous souhaitons simuler nécessite de rendre compte de la dynamique de concentration des écoulements à l'échelle du bassin versant. C'est donc cette échelle de modélisation qui nous intéresse. Trois types de modèles peuvent être distingués.

- Le premier dit "spatialisé" correspond à l'agrégation des résultats issus d'un modèle non spatial dont une partie des données d'entrée intègre la variabilité spatiale du territoire considéré. L'espace y est découpé en mailles élémentaires individuelles. Dans chacune d'elles, le modèle de ruissellement permet de calculer une valeur de ruissellement en fonction des caractéristiques propres à la maille. L'addition des valeurs de ruissellement obtenues pour chaque maille donne une valeur totale de ruissellement pour l'étendue du territoire simulé.
- Dans le deuxième, l'espace est découpé en deux types d'entités, des plans et des vecteurs. Les plans correspondent à des versants homogènes pour lesquels une valeur de ruissellement est calculée, les vecteurs à des collecteurs concentrant le ruissellement. Ces modèles permettent de reconstituer une partie du réseau d'écoulement mais pour les versants, le ruissellement est obtenu comme pour les modèles spatialisés.
- Un troisième type de modèle permet de rendre compte de la dynamique de concentration du ruissellement et des possibilités d'infiltration à l'aval du ruissellement venant de l'amont. Il s'agit de modèles « spatiaux » dans lesquels il y a une véritable modélisation du flux d'eau entre les mailles élémentaires. Ce type de modèle de ruissellement est donc obligatoirement couplé à un système d'information géographique (SIG) pour gérer les relations entre les mailles élémentaires. C'est ce dernier type de modèle qui permet le mieux de rendre compte du processus érosif dans les plaines limoneuses.

Echelle temporelle

Une évaluation complète de l'effet des systèmes de culture implique d'être réalisée sur une année culturale entière. En effet, nous avons vu que la succession des opérations culturales en interaction avec le climat crée différents états de surface qui se succèdent dans le temps : les trajectoires d'état. Chaque état peut avoir ou non un effet différent vis-à-vis du ruissellement. Le modèle de ruissellement recherché doit donc simuler le ruissellement annuel, et de ce fait

être dynamique sur l'année pour retracer les modifications des états de surface au cours de l'année culturale. La précision de la simulation dépendra de celle des trajectoires d'états issues de l'analyse à l'échelle parcellaire. Pour intégrer la variabilité inter-annuelle due aux successions culturales, le modèle devra être utilisé sur un nombre d'années équivalent à la durée des successions culturales.

Facteurs à prendre en compte

Les systèmes de culture ont un effet sur le ruissellement du fait des modifications des états de surface à l'échelle parcellaire qui déterminent l'infiltration et de leur organisation spatiale à l'échelle du bassin versant. Il est donc nécessaire que les facteurs pris en compte par le modèle puissent traduire les effets à ces deux échelles. A l'échelle parcellaire, cela signifie que le modèle de calcul de l'infiltration ne doit pas seulement prendre en compte les propriétés permanentes du milieu, mais également les caractéristiques des états de surface du sol que créent les systèmes de culture. Ces dernières influencent, en effet, l'infiltration et la détention superficielle (faciès, rugosité et couvert végétal). A l'échelle du bassin versant, un modèle spatial permet, pour une parcelle donnée, la simulation de l'infiltration de l'eau ruisselée venant de l'amont. Toutefois, celle-ci n'est correcte que si le réseau d'écoulement du ruissellement entre les parcelles l'est. Or, comme nous l'avons décrit précédemment, dans les régions de faible pente, le réseau est en partie déterminé par le sens de travail du sol, en complément des éléments linéaires d'origine agricole (fourrières et dérayures) ainsi que par les routes et les chemins. Ces éléments qui sont susceptibles de modifier de façon significative le réseau d'écoulement sont indispensables à une modélisation correcte du ruissellement érosif.

Enfin, la dernière exigence par rapport au modèle de ruissellement est liée à l'accessibilité des données. En effet, l'objectif étant de proposer une méthode de diagnostic facilement applicable par des personnes chargées de lutter contre l'érosion, le temps de collecte des données destinées à alimenter le modèle doit être raisonnable. Par conséquent, nous nous orientons plutôt vers le choix d'un modèle de type empirique ou expert dont les données d'entrée sont généralement plus simples d'accès et moins nombreuses que celles des modèles mécanistes. Les premiers modèles sont adaptés à un contexte pédo-climatique alors que les seconds ont un domaine de validité plus large. En contre-partie, ils imposent de renseigner un certain nombre de caractéristiques pédologiques qui sont difficilement mesurables.

En plus d'une facilité d'acquisition des données d'entrée, nous attendons du modèle souhaité les caractéristiques suivantes (Tableau 5) :

Tableau 5 : Caractéristiques attendues du modèle de ruissellement			
<i>Echelles</i>		<i>Facteurs à prendre en compte</i>	
<i>Spatiale</i>	<i>Temporelle</i>	<i>Module de ruissellement</i>	<i>Module d'écoulement</i>
Modèle spatial à l'échelle du bassin versant simulant le réseau d'écoulement du ruissellement	Modèle dynamique sur une année intégrant les variations d'état de surface dues aux techniques culturales et au climat	Etats de surface pour le calcul de l'infiltration et de la rétention superficielle	Sens de travail du sol et des éléments linéaires

1.1.2.2 Modèles disponibles

Pour les principaux modèles de ruissellement connus, ou plus exactement les modules de ruissellement des modèles d'érosion, nous avons analysé les caractéristiques en lien avec nos critères de sélection. Un inventaire des modèles existants est fourni dans le Tableau 6. Quant au Tableau 7, il présente une synthèse de leurs caractéristiques. L'équation universelle des pertes en sols (USLE – Universal Soil Loss Equation ; Wischmeier et Smith, 1978) ainsi que les variantes RUSLE (Revised USLE, Renard *et al.*, 1991) et USLE-M (USLE Modified ; Kinell et Risse, 1998) ne figurent pas dans ces tableaux. En effet, ces trois équations ne sont applicables qu'à l'échelle de la parcelle et non du bassin versant. Par ailleurs, elles ne prédisent les pertes en terre qu'à partir de relations empiriques et de ce fait ne calculent pas explicitement le ruissellement. Enfin, nous n'avons pas inclus dans notre sélection les modèles limités à l'échelle parcellaire.

Tableau 6 : Liste des modèles analysés		
ANSWERS	Areal non-point source watershed environment response simulation	Beasley <i>et al.</i> , 1980
EPIC	Erosion-productivity impact calculator	Williams <i>et al.</i> , 1984
EROSION 3D	-	Schmidt <i>et al.</i> , 1997 cité par Schmidt <i>et al.</i> , 1999
EUROSEM	European soil erosion model	Morgan <i>et al.</i> , 1998
KINEROS	Kinematic runoff and erosion model	Smith <i>et al.</i> , 1995
LISEM	Limburg soil erosion model	De Roo <i>et al.</i> , 1996
RuiCells	-	Langlois et Delahaye, 2002
STREAM	Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management	Cerdan, 2001 ;Cerdan <i>et al.</i> , 2002c
TCRP/logit	Tillage-controlled runoff pattern model / Logistic model	Takken <i>et al.</i> , 2001a
TOPMODEL	-	Beven et Kirkby, 1979
WEPP	Water erosion prediction project	Flanagan et Nearing, 1995

Tableau 7 : Synthèse des principaux modules de ruissellement au regard des critères de sélection fixés

	Modèle spatial simulant les chemins d'eau	Echelle temporelle	Prise en compte du couvert, de la rugosité et du faciès dans le module d'infiltration	Paramètres de modélisation des chemins d'eau
Modèle recherché	Oui	Année	couvert / rugosité / faciès	T – WS – EL
ANSWERS	Oui	Evt Pl	couvert / rugosité	T
EPIC	Non	Jour	couvert / rugosité	-
EROSION 3D	Oui	Evt Pl	couvert / rugosité	T
EUROSEM	Partiel	Evt Pl	couvert / rugosité	-
KINEROS	Partiel	Evt Pl	couvert / rugosité	-
LISEM	Oui	Evt Pl	couvert / rugosité / faciès	T – TR – EL
RuiCells	Oui	Evt Pl	Non	T
STREAM	Oui	Evt Pl	couvert / rugosité / faciès	T – WS – EL
TCRP/logit ⁶	Oui	-	-	T – WS – EL
TOPMODEL	Non	Jour	Non	-
WEPP	Partiel	Année	couvert / rugosité / faciès	-

Légende : Modèle spatial « partiel » : modèle découpant l'espace en versants homogènes et en collecteurs

« Evt Pl » : échelle temporelle de l'événement pluvieux

« T » : topographie / « TR » : trace de roue / « WS » : travail du sol / « EL » : élément linéaire

- : Information non pertinente pour le modèle

Cet état des lieux des principaux modules de ruissellement à notre disposition nous amène à conclure qu'aucun d'eux ne répond totalement à notre attente. A ce stade, il est donc nécessaire de choisir les caractéristiques majeures que nous voulons conserver au détriment d'autres qui nous paraissent moins indispensables.

1.1.2.3 Assouplissement des critères de sélection et choix d'un modèle

Parmi les critères de choix, celui concernant l'échelle temporelle de simulation est le plus facile à dégrader. En effet, si le modèle retenu n'est pas dynamique, ou l'est, mais à une échelle de temps courte (événement pluvieux ou journée), il est possible d'évaluer l'effet des systèmes de culture en simulant le ruissellement aux moments de l'année caractéristiques de la diversité des états créés. En revanche, il est impossible d'utiliser un modèle spatialisé à l'échelle parcellaire pour rendre compte du cheminement de l'eau dans le bassin versant. Il nous faut donc adopter un modèle spatial modélisant explicitement les relations entre les éléments de base du découpage de l'espace. De même, il semble indispensable d'utiliser un modèle qui ne considère pas que la topographie comme facteur d'orientation des écoulements, mais qui prenne en compte le sens de travail du sol et les éléments linéaires. En conséquence, priorité est donnée à l'aspect spatial par rapport à l'aspect temporel.

⁶ TCRP/logit est uniquement un modèle d'écoulement

Dans ces conditions, seuls trois modèles conviennent : LISEM, STREAM et TCRP/logit. TCRP/logit n'étant qu'un modèle d'écoulement simulant les chemins d'eau, il est nécessaire de le coupler avec un modèle de ruissellement complet : (Takken *et al.*, 2001b) l'ont ainsi associé au modèle LISEM. Au final, nous avons donc le choix entre deux modèles, STREAM et LISEM/TCRP/logit.

Ces deux modèles simulent le ruissellement à l'échelle de l'événement pluvieux, en prenant en compte les états de surface du sol pour calculer l'infiltration et la détention superficielle. Ils déterminent l'orientation de l'écoulement par une fonction discriminante. Celle-ci est basée sur la rugosité du sol, le degré et la direction de la pente et le sens du travail du sol (apport du modèle TCRP/logit au modèle LISEM qui n'offre pas cette fonctionnalité). Elle tient compte également des différents éléments linéaires : fourrières, dérayures, fossés, chemins et routes. De part leur construction, ces deux modèles permettent de rendre compte correctement de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement. Cependant, on note certaines différences. Deux fonctions du module de ruissellement LISEM ne sont pas incluses dans le modèle STREAM. D'une part, LISEM prend en compte le réseau de collecteurs internes aux parcelles, constitué par les traces de roue laissées par les passages successifs pour les opérations de traitement et de fertilisation. D'autre part, LISEM est un modèle dynamique, ce qui lui permet de réactualiser, à chaque pas de temps, les propriétés d'infiltration et de détention superficielle en fonction des processus simulés au pas de temps précédent. LISEM peut, en particulier, gérer au cours du temps le stockage de l'eau dans les collecteurs (traces de roue, fossés, ravines) et les faire déborder, générant ainsi un ruissellement diffus orienté par la topographie. STREAM est, quant à lui, un modèle statique : ses paramètres sont fixés pour toute la durée de l'événement pluvieux et ne peut donc pas gérer les débordements des collecteurs. En revanche, son atout par rapport à LISEM est la relative simplicité d'acquisition des paramètres d'entrée et leur faible nombre. En effet, STREAM est un modèle expert dont la démarche de construction a consisté à analyser les mécanismes du ruissellement pour en faire émerger les principaux déterminants. Des expérimentations sous simulateur de pluie et en conditions réelles ont permis, par la suite, de quantifier ces paramètres pour des sols limoneux du nord de l'Europe. A l'inverse, LISEM est un modèle mécaniste qui reproduit assez fidèlement les processus physiques élémentaires. En conséquence, un grand nombre de paramètres d'entrée sont requis pour mettre en œuvre les différentes équations établies sur la base de lois physiques (Ludwig *et al.*, accepté).

Comme nous l'avons mentionné plus haut, notre objectif est de bâtir une méthode de diagnostic simple et facilement reproductible dans différents bassins versants. STREAM, sans aller aussi loin que LISEM/TCRP dans la modélisation du ruissellement, permet néanmoins de simuler les principaux effets des systèmes de culture sur le ruissellement. C'est donc le modèle STREAM que nous retenons.

1.1.3 Fonctionnement du modèle STREAM (Cerdan *et al.*, 2002c)

La version la plus complète du module de ruissellement du modèle STREAM a été développée avec le SIG Arc/Info en mode raster, sous UNIX. Le bassin versant modélisé est ainsi divisé en mailles élémentaires carrées, appelées pixels, dont le côté est de longueur variable. Il se compose de deux sous-modules dont nous allons exposer le fonctionnement, illustré à partir d'une simulation réalisée dans le cadre d'un projet de recherche sur un bassin versant de 94 ha, Blosserville en Seine-Maritime (Le Bissonnais *et al.*, 2003). Au préalable, nous détaillons les paramètres d'entrée du modèle, ainsi que leur notation.

1.1.3.1 Les paramètres d'entrée du modèle

Les paramètres d'entrée du module de ruissellement de STREAM sont peu nombreux. Certains concernent les états de surface du sol (illustrations de quelques états de surface caractéristiques en annexe 2) :

- le faciès avec 4 valeurs correspondant aux différents stades d'évolution de la battance : F0 l'état initial fragmenté, F11 la croûte structurale, F12 l'état transitionnel vers la croûte sédimentaire et F2 la croûte sédimentaire ;
- la rugosité dans le sens du travail du sol appelée rugosité orientée et la rugosité perpendiculaire au sens de travail du sol, exprimées en cm et réparties en 5 classes : R0 (moins de 1 cm), R1 (1 à 2 cm), R2 (2 à 5 cm), R3 (5 à 10 cm) et R4 (plus de 10 cm) ;
- le taux de couvert végétal⁷, en 3 classes, exprimé en pourcentage de sol recouvert : C1 (moins de 20%), C2 (21 à 60%) et C3 (plus de 61%).

D'autres paramètres d'entrée concernent les motifs agraires et linéaires : parcellaire, sens de travail du sol, fourrières, dérayures, fossés, routes et chemins.

Enfin, le modèle prend aussi en compte :

- la pente : orientation, intensité ;
- les caractéristiques de l'événement pluvieux : cumul des pluies, pluie antécédente cumulée sur les 48 heures précédant le début de l'événement pluvieux et durée efficace. La durée efficace est calculée à partir de la durée réelle de l'événement pluvieux ; les périodes de très faible intensité pluvieuse en sont retranchées. Le détail du calcul est expliqué dans le chapitre 3.

⁷ Le couvert végétal comprend la culture en place, les résidus de récolte de la culture précédente et les adventices.

1.1.3.2 Module infiltration

Pour chaque pixel, le volume d'eau ruisselant ou infiltrant est calculé à partir de la capacité d'infiltration, de la pluie d'imbibition et des caractéristiques de l'événement pluvieux.

La capacité d'infiltration du pixel est déterminée en fonction des trois paramètres d'état de surface que nous avons listés au paragraphe précédent. Le Tableau 8 ci-dessous renseigne les valeurs d'infiltration pour les différentes combinaisons possibles.

Tableau 8 : Capacité d'infiltration (Inf en mm) en fonction des paramètres : faciès, rugosité et couvert végétal						
		Faciès				
Rugosité	Couvert végétal (%)	F0	F11	F12	F2	
>10 cm	>61	50	50	50	10	
	21-60			20		20
	<20		50			50
5-10 cm	21-60			20		5
<20	50			10		5
2-5 cm	>61		50	20		10
	21-60	20	10	5		
	<20					
1-2 cm	>61	20	10	5		
	21-60					
	<20					
<1 cm	>61	50	20	10	5	
	21-60	20	10	5	2	
	<20	10				

La pluie d'imbibition est celle qu'infiltrer le sol avant d'atteindre le régime stationnaire. La valeur de la pluie d'imbibition est fonction de la capacité d'infiltration et de la pluie antécédente (Tableau 9).

Tableau 9 : Hauteurs de pluie d'imbibition (P_i en mm) en fonction de la capacité d'infiltration (Inf) et de la pluie antécédente (P48)				
Inf \ P48	P48			
	0 mm	1-15 mm	16-40 mm	>40 mm
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

Pour un événement pluvieux donné, de durée efficace DE et d'une hauteur de pluie cumulée PC, la formule de calcul suivante permet de déterminer, pour des caractéristiques d'états de surface du sol données, le volume d'eau ruisselant ou infiltrant du pixel :

$$RI = PC - Pi - (Inf * DE)$$

Nous appelons le résultat de ce calcul bilan ruissellement / infiltration : « bilan RI ». La formule de calcul du modèle STREAM est adaptée aux conditions du ruissellement hortonien sur des sols limoneux profonds ; la capacité de stockage du sol est considérée comme illimitée et le ruissellement ne peut provenir que d'un dépassement de la capacité d'infiltration et de stockage à la surface du sol.

Si le bilan RI est positif, cela signifie que le pixel est ruisselant. S'il est négatif, le pixel est infiltrant. Pour un pixel, la valeur absolue de RI donne la quantité d'eau ruisselante ou la capacité d'infiltration restante. La Figure 6 permet de visualiser le bilan RI sur l'ensemble du bassin versant de Blossesville pour un événement pluvieux donné. Sur cette figure, nous constatons que, sur la majeure partie du bassin versant, le bilan est excédentaire d'au moins 8 mm.

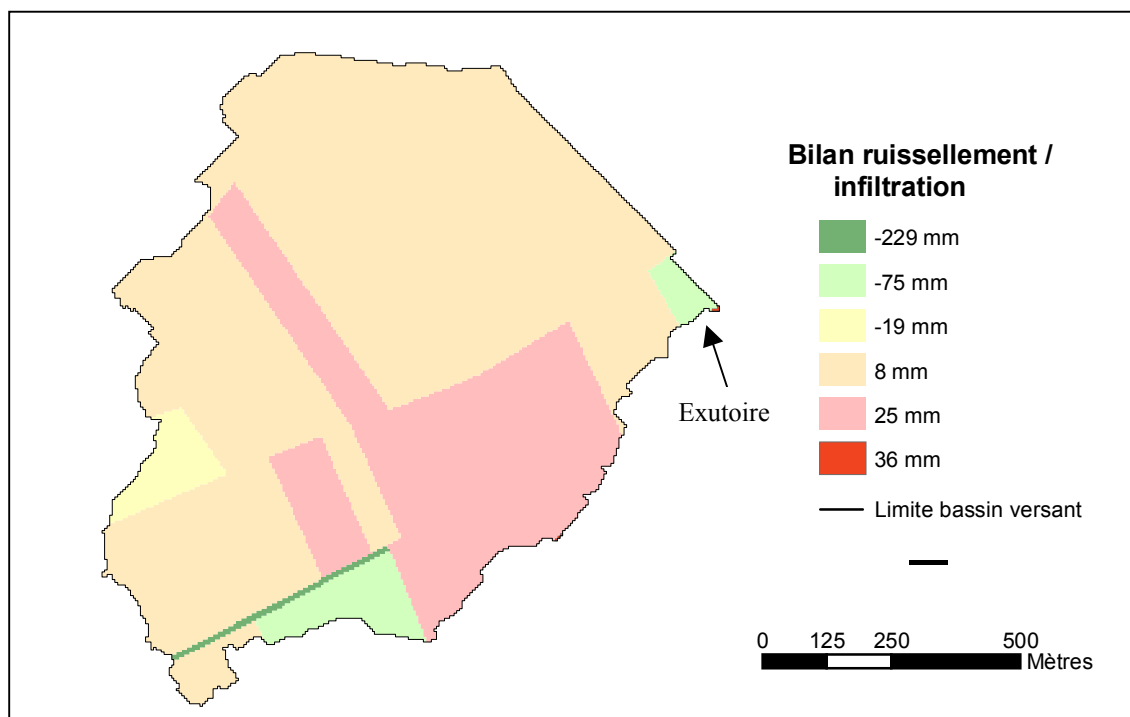


Figure 6 : Exemple de carte du bilan ruissellement / infiltration bassin versant de Blossesville

1.1.3.3 Module écoulement

Ce module permet de déterminer la direction de l'écoulement pour chaque pixel du bassin versant modélisé et de relier ainsi les pixels entre eux. La direction du ruissellement dépend

de la topographie, des motifs agraires et des éléments linéaires. Les différentes situations sont :

- les routes et les chemins : surfaces considérées comme lisses et ruisselantes sur lesquelles le ruissellement suit le sens de la pente ;
- les fossés et les dérayures : ces éléments imposent la direction d'écoulement, le sens étant déterminé par la pente de la dérayure ou du fossé ;
- les parcelles agricoles cultivées : si la rugosité du sol orientée est nettement plus forte que celle perpendiculaire au sens du travail du sol, le sens d'écoulement est imposé par les sillons et correspond alors au sens de travail du sol. Lorsque ce n'est pas le cas, une fonction discriminante utilisant la direction et l'intensité de la pente ainsi que la direction du travail du sol, détermine si l'écoulement suit le sens du travail du sol ou celui de la pente ;
- les fourrières : elles sont traitées de la même manière que les parcelles agricoles ;

Dans tous les autres cas, le sens d'écoulement est imposé par la pente.

La limite du réseau d'écoulement obtenu est liée au mode raster du SIG utilisé qui impose des mailles carrées élémentaires. Ceci limite les directions d'écoulement possibles à 8, chacune espacée de la plus proche de 45°. Une dérive peut alors apparaître si l'orientation de l'écoulement est comprise entre deux directions, dérive qui se répercute de pixel en pixel sur les parcelles agricoles (Souchère, 1995 ; King *et al.*, 1997).

Une fois la connexion entre pixels établie, il est alors possible de calculer le volume d'eau ruisselé à l'échelle du bassin versant. Pour chaque pixel, le ruissellement provenant des pixels situés à l'amont est ajouté au bilan RI. Cette opération est réalisée de pixel en pixel, de ceux les plus à l'amont du bassin versant à celui situé à l'exutoire. Elle permet, en outre, de connaître le ruissellement cumulé, en hauteur d'eau, en tout point du bassin versant. Pour obtenir le volume ruisselé, il convient de multiplier au préalable les bilans de chaque pixel par leur surface. La Figure 7 donne un exemple de carte d'accumulation du ruissellement. Nous voyons sur cette figure de nombreux axes de concentration du ruissellement, qui sont parallèles. Ceux-ci correspondent à une concentration dans les sillons laissés par le travail du sol (partie supérieure du bassin versant). Ils rejoignent ensuite l'axe topographique principal situé perpendiculairement.

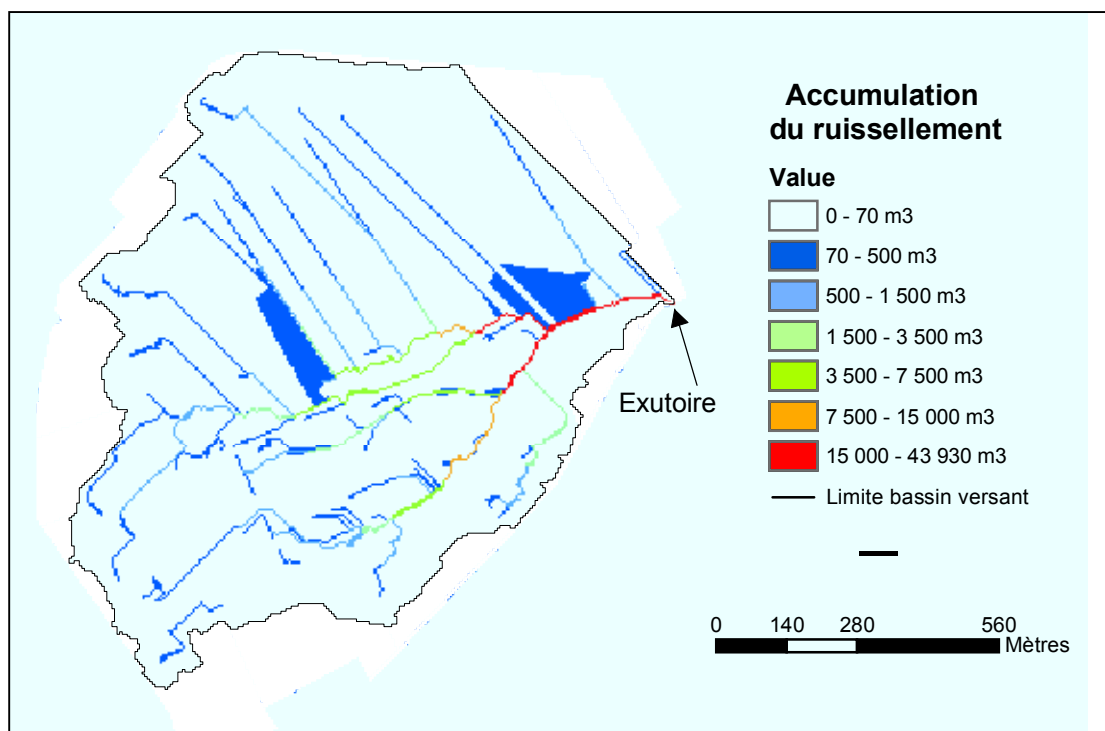


Figure 7 : Exemple de carte d'accumulation du ruissellement

1.1.4 Conséquences du choix du modèle STREAM pour le diagnostic

Le choix du modèle STREAM pour réaliser le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement n'est pas sans conséquence sur le déroulement du diagnostic. Cela résulte du formalisme adopté lors de la construction du modèle et d'une non-adéquation rigoureuse entre les caractéristiques du modèle et celles attendues pour l'étude.

STREAM est un modèle qui fonctionne à l'échelle de l'événement pluvieux. Analyser l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif à l'échelle du bassin versant nécessite de réaliser des simulations aux différentes saisons culturales, afin de rendre compte des modifications des états de surface par les systèmes de culture et le climat. A chacune de ces saisons, il faut choisir le ou les événements pluvieux en fonction d'une probabilité d'occurrence : nous tenons compte ainsi du climat local et de sa variabilité ainsi que de l'état de surface des parcelles lors de la simulation. Enfin, les simulations doivent être répétées plusieurs années de suite. Ceci permet de prendre en compte l'effet des modifications de l'organisation spatiale des systèmes de culture, qui résultent des successions culturales appliquées sur chaque parcelle du bassin versant.

La version du modèle STREAM que nous avons choisie d'utiliser est celle développée avec le SIG Arc/View sous Windows. Cette version est beaucoup plus conviviale dans son utilisation que la version développée avec le SIG Arc/Info sous station Unix. Cependant, elle ne permet pas d'établir le réseau d'écoulement en fonction des motifs agraires et des éléments linéaires comme la version Arc/Info, mais seulement d'utiliser un réseau d'écoulement prédéfini ou de

calculer un réseau topographique. Dans la mesure où nous nous assurons au préalable que les modifications des systèmes de culture proposées modifient peu le réseau d'écoulement, il sera possible d'utiliser un réseau unique pour l'ensemble des simulations. Ceci revient à ne réaliser qu'une seule simulation avec la version Arc/Info pour calculer le réseau d'écoulement, toutes les autres étant effectuées avec la version Arc/View. Le gain se mesurera en convivialité d'utilisation du modèle et en temps, la simulation du réseau d'écoulement étant la phase la plus longue.

Enfin, le diagnostic réalisé à l'échelle parcellaire a pour but de déterminer l'effet des systèmes de culture sur l'état de surface du sol, en interaction avec le climat. Cette connaissance des relations entre systèmes de culture / climat et états de surface est à la base du diagnostic à l'échelle du bassin versant. La caractérisation des états de surface du sol doit donc être identique pour les deux diagnostics. Le modèle STREAM requérant un formalisme particulier pour la description des états de surface, il convient de l'adopter également pour le diagnostic à l'échelle parcellaire.

1.2 Analyse des marges de manœuvre techniques pour modifier les systèmes de culture

La deuxième étape de notre analyse consiste à déterminer, à l'échelle de l'exploitation agricole, les marges de manœuvre permettant de modifier les systèmes de culture dans le but de limiter le ruissellement. En effet, nous avons décidé de ne chercher à réduire le ruissellement que par des modifications compatibles avec les contraintes dues au fonctionnement technique des exploitations. Nous rappelons ici que les contraintes que nous analysons concernent la répartition des facteurs de production - terre et travail - entre les différentes productions de l'exploitation agricole. Nous ne remettons donc pas en cause les systèmes de production qui résultent en grande partie du contexte économique, ni les règles agronomiques de conduite des cultures. Ces deux derniers types de contraintes sont en effet généralement bien étudiés, alors que celles que nous nous proposons d'analyser le sont peu.

L'analyse nécessite tout d'abord d'établir les règles de constitution des systèmes de culture. Ce n'est qu'à cette condition que nous pouvons évaluer s'il est possible de mettre en œuvre des systèmes de culture différents, respectant à la fois les objectifs de production et les règles identifiées. Pour ce faire, nous mobilisons des concepts et des méthodes d'analyse des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole.

Dans cette partie, nous explicitons pourquoi les systèmes de culture d'une exploitation résultent d'ajustements et ne correspondent pas à une optimisation de la conduite de chaque culture d'un point de vue purement agronomique. Nous exposons ensuite comment analyser

ces règles d'ajustement en rapport avec l'organisation spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation et la constitution des itinéraires techniques.

1.2.1 Les systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole

Le concept de système de culture a été défini à l'échelle de la parcelle ou du groupe de parcelles comme étant « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une portion de territoire traitée de manière identique ; chaque système de culture se caractérise par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à chacune de ces cultures » (Sebillotte, 1990). Ce concept illustre le fait que les techniques culturales appliquées aux différentes cultures en vue d'obtenir une production, ainsi que l'ordre de succession de ces cultures, doivent être considérés comme un ensemble, et non pas chacune individuellement. En effet, les nombreuses interactions entre les techniques culturales et les cultures, auxquelles s'ajoutent celles avec le milieu et le climat, font que l'effet d'une technique sur une culture n'est pas indépendant des autres techniques ni de l'ordre de succession des cultures. Partant de là, il est possible de définir des successions culturales et des itinéraires techniques favorisant les interactions positives et réprimant celles qui sont négatives, afin d'obtenir une production supérieure en quantité et en qualité.

Au sein de son exploitation, l'agriculteur fait des choix de production et se fixe des objectifs à atteindre en matière de rendement et de qualité. Les systèmes de culture de l'exploitation résultent du fait que l'agriculteur, pour réaliser ses objectifs, cherche à utiliser au maximum les interactions positives entre techniques, cultures et milieu pour la production des espèces cultivées. Cependant, il ne lui est pas toujours possible d'optimiser ces interactions sur chacune des parcelles, les facteurs de production de son exploitation étant limités et difficilement modifiables. Le modèle de fonctionnement technique de l'exploitation que nous utilisons consiste à considérer les successions de cultures et les itinéraires techniques comme résultant de décisions d'attribution des facteurs de production, notamment la terre et le travail. (Papy, 2001). Par exemple, la main d'œuvre et le matériel disponibles n'offrent pas toujours la possibilité de réaliser l'ensemble des travaux dans les délais optimaux. Un autre exemple lié à la disponibilité de la terre illustre ce propos. Dans certaines exploitations, le parcellaire ne permet pas d'implanter, à proximité des bâtiments de stockage, une surface suffisante en cultures fourragères pour satisfaire les besoins du troupeau. L'agriculteur est alors obligé d'en semer sur des parcelles éloignées. Ceci entraînera une augmentation du temps de transport lors de la récolte et par répercussion, une diminution du temps disponible pour d'autres chantiers.

1.2.2 Localisation spatiale des cultures

La localisation spatiale des cultures dans un bassin versant est la conséquence de la répartition des cultures sur chaque territoire d'exploitation agricole. A l'échelle de l'exploitation, cette répartition spatiale des cultures résulte d'une combinaison de différentes règles de décisions (Maxime *et al.*, 1995) que nous pouvons analyser de la manière exposée ci-après.

Au préalable, il convient de déterminer l'assolement de l'exploitation, c'est-à-dire les cultures implantées et la surface de chacune d'elles. L'assolement dépend en partie du contexte économique, mais aussi des facteurs de production que l'agriculteur a rassemblés : la terre (qualité des terrains, organisation spatiale du parcellaire), le capital d'exploitation (matériel, bâtiment de stockage en particulier) et la main-d'œuvre (familiale et salariée). Comme nous nous plaçons dans le cadre d'un contexte économique stable sur le court terme (rapport de prix entre les cultures et primes à la production), nous pouvons considérer l'assolement fixe. Dans ces conditions, la localisation spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation est fonction de trois types de règles.

Règles de délimitation des zones cultivables

Les contraintes inhérentes au territoire d'exploitation déterminent la zone cultivable pour chacune des cultures. En fonction des caractéristiques du milieu (profondeur du sol, pierrosité, hydromorphie, pente, etc.) et des parcelles (forme et taille des parcelles, éloignement des bâtiments, etc.), l'agriculteur peut juger que certaines parcelles ne sont pas appropriées à l'implantation d'une culture donnée. Sur la base de ces connaissances, il est ainsi possible de délimiter des zones cultivables pour chaque culture. Les parcelles de l'exploitation caractérisées par de fortes contraintes appartiennent à des zones cultivables de seulement quelques cultures de l'assolement. A l'opposé, les parcelles sans contrainte font partie des zones cultivables de l'ensemble des cultures.

Règles de succession culturale

Les règles de succession culturale déterminent pour chaque parcelle, en fonction des cultures précédentes, les cultures possibles une année donnée. Ces règles sont liées au délai de retour des cultures, c'est-à-dire le nombre d'années entre deux implantations d'une même culture, et aux cultures précédentes possibles pour une culture donnée. On distingue ainsi les cultures peu exigeantes dont le délai de retour est faible (à l'extrême nul dans le cas d'une monoculture) et qui autorisent de nombreux précédents, des cultures très exigeantes présentant un délai de retour élevé et seulement un ou deux précédents possibles.

Des règles de regroupement de cultures

Pour des raisons de simplification d'organisation du travail, les agriculteurs regroupent certaines cultures sur des parcelles voisines. Dans la plupart des cas, il s'agit de la même culture, ceci afin de faciliter les traitements phytosanitaires, les épandages d'engrais et la

récolte. Dans d'autres, les cultures diffèrent mais soit une partie des itinéraires techniques est identique soit leur position dans la succession culturale est la même.

Au final, l'identification de l'ensemble de ces règles permet de reconstituer les successions culturales appliquées sur chaque parcelle. Il peut s'agir de successions culturales où toutes les cultures de la succession sont définies, ou bien de rotations cadre (Maxime *et al.*, 1997) dans lesquelles la place de quelques cultures est déterminée mais où, entre ces cultures pivots, différentes cultures peuvent être implantées. Les parcelles sur lesquelles la même succession culturale est appliquée forment ce que nous convenons d'appeler un bloc de cultures (Aubry *et al.*, 1998). Par ailleurs, connaissant les assolements des années passées, il nous est possible de déterminer la répartition spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation agricole, pour une année donnée.

1.2.3 Les itinéraires techniques

Modifier les itinéraires techniques, en ajoutant des opérations culturales ou en décalant les dates de réalisation de certaines opérations, dépend des contraintes d'organisation du travail au sein de l'exploitation, contraintes liées à la disponibilité de la main d'œuvre et du matériel (Aubry, 1995).

Pour analyser l'organisation du travail liée aux cultures, nous devons procéder en plusieurs étapes (Papy, 2001) :

- Tout d'abord, nous inventorions la main d'œuvre et le matériel (y compris ce qui n'est pas disponible sur l'exploitation mais via l'entraide ou une entreprise agricole), en précisant les périodes de disponibilité.
- Ensuite, pour chaque culture, nous déterminons les itinéraires techniques, en détaillant pour chaque opération culturale le chantier, à savoir la main d'œuvre et le matériel mobilisés. Chaque chantier est caractérisé par une période optimale de réalisation et une vitesse d'avancement. Disposant de toutes ces informations pour chaque culture, nous identifions des périodes de concurrence au cours desquelles plusieurs chantiers doivent être conduits simultanément. Deux possibilités sont alors envisageables : soit les moyens disponibles permettent de réaliser ces chantiers simultanément, soit ils ne le permettent pas. Dans ce dernier cas, il importe de mettre en évidence des règles de priorité entre les chantiers, priorités qui peuvent être différentes d'une période à l'autre (des travaux non prioritaires à une période donnée, peuvent le devenir, passée une date limite).
- Enfin, il est nécessaire de déterminer les charges de travail supplémentaires que la main d'œuvre de l'exploitation doit assumer. Il s'agit en premier lieu des astreintes liées à l'élevage. En effet, elles peuvent diminuer considérablement le temps

disponible quotidiennement pour les travaux de culture, et donc diminuer la vitesse de réalisation des chantiers. Il faut également évaluer des travaux de culture que l'agriculteur effectue en entraide sans oublier les charges de travail extérieures non agricoles qui rend la main d'œuvre de l'exploitation indisponible à certaines périodes de l'année.

L'ensemble de ces règles permet de simuler l'organisation du travail en fonction de différents scénarios climatiques. Le logiciel OTELO (Organisation du Travail Et Langage Objet) permet de le faire dans la mesure où les règles de détermination des jours disponibles sont connues (Poussin, 1992 ; Attonaty *et al.*, 1990). En effet, les différents chantiers ne peuvent être réalisés que dans certaines conditions climatiques précises. Les jours satisfaisant ces conditions sont appelés jours disponibles. Le logiciel OTELO fonctionne au pas de temps journalier, de la manière suivante :

- pour chaque jour, il détermine les chantiers à réaliser en fonction des périodes de réalisation souhaitées et de l'avancement des chantiers,
- puis, si plusieurs chantiers doivent être réalisés le même jour, il détermine s'il est possible de les faire tous ou s'il faut appliquer des règles de priorité,
- enfin, pour les chantiers à réaliser, il vérifie que la journée est effectivement disponible en appliquant le modèle de calcul des jours disponibles pour le scénario climatique testé.

Le logiciel OTELO, développé sous DOS, est un programme peu convivial qui demande un temps important pour saisir toutes les données et réaliser les simulations. C'est pourquoi nous avons décidé de ne pas l'utiliser mais de développer une feuille de calcul sous le logiciel Excel, selon le même principe; deux simplifications ont toutefois été apportées :

- un seul ordre de priorité entre les chantiers est défini pour toute l'année bien que souvent un chantier prioritaire sur un autre à une période donnée, ne le soit plus, passée une certaine date ;
- lorsque deux chantiers se succèdent, le second ne peut débuter que lorsque le premier est complètement achevé. Or, dans la pratique, si le premier chantier est partiellement achevé et qu'il est stoppé en raison du climat, le chantier suivant peut débuter s'il est moins exigeant vis-à-vis des conditions climatiques.

Si ces simplifications permettent d'alléger la collecte et la saisie des données nécessaires aux simulations, elles nous conduisent à surestimer les contraintes d'organisation du travail, et donc à sous-estimer les marges de manœuvre.

1.3 Modification des systèmes de culture en vue d'une réduction du ruissellement érosif

La troisième étape de notre étude consiste à concevoir des modifications des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole pour diminuer le ruissellement érosif à l'échelle du bassin versant ; pour ce faire, nous nous basons sur les résultats des deux premières étapes de l'étude. Dans cette partie, nous montrons que l'on peut aborder la réduction du ruissellement par les pratiques agricoles sous différents angles. Puis, nous détaillons la démarche appliquée pour concevoir les modifications des systèmes de culture.

1.3.1 Objectif des modifications des systèmes de culture

Réduire le ruissellement s'envisage de différentes manières. Suivant le but poursuivi, les modifications proposées et leur localisation dans le bassin versant pourront différer.

Concernant l'échelle spatiale, nous pouvons choisir de réduire le ruissellement pour l'ensemble du bassin versant ou bien plus particulièrement dans certaines zones à risque du bassin.

L'échelle temporelle des simulations est celle de l'événement pluvieux ; des simulations sont effectuées à différentes périodes de la campagne culturale, afin de prendre en compte la diversité des états de surface. En conséquence, réduire le ruissellement peut signifier :

- réduire le ruissellement à toutes les périodes simulées,
- réduire le ruissellement à des périodes particulièrement à risque, en s'assurant de ne pas l'augmenter à d'autres périodes.

Du fait des successions culturales, les modifications des systèmes de culture une année donnée, ont des répercussions les années suivantes. Aussi est-il possible de chercher à réduire le ruissellement :

- sur plusieurs années de suite, de manière à assurer un risque moyen toutes les années ;
- chaque année individuellement, en s'assurant qu'il n'y ait pas de répercussion négative sur le ruissellement, l'année suivante.

Seul, le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement nous permettra de définir les différentes possibilités de réduction du ruissellement par les pratiques agricoles. Nous pourrions alors définir les modifications à envisager.

Cependant, nous pouvons d'ores et déjà faire un choix quant à l'objectif annuel ou pluriannuel de la réduction du ruissellement. Réduire le risque de manière homogène sur plusieurs années supposerait d'être certain de la stabilité des assolements. Or dans les régions de grande

culture, les agriculteurs modifient parfois leur assolement en fonction du contexte économique, et toute prévision sur plusieurs années est délicate. Il nous semble donc plus judicieux de nous orienter vers la construction d'une méthodologie visant à réduire le ruissellement chaque année, et non sur le long terme, en considérant les conséquences l'année suivante.

1.3.2 Principe de conception des modifications des systèmes de culture

Pour une année donnée, nous pouvons concevoir différentes modifications des systèmes de culture au sein des exploitations agricoles du bassin versant, une fois identifiées pour chacune d'elles les marges de manœuvre permettant ces changements. Pour réduire le ruissellement à l'échelle du bassin versant, il convient alors de raisonner l'organisation spatiale de l'ensemble de ces modifications sur le bassin. Rappelons que modifier les systèmes de culture revient, dans notre étude, à réorganiser les cultures sur le territoire des exploitations agricoles et à introduire des opérations culturales supplémentaires limitant le ruissellement.

A partir des règles de localisation spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation et de la connaissance des assolements passés, nous pouvons déterminer pour chaque parcelle du bassin les différentes cultures que l'agriculteur peut implanter, l'année étudiée. Pour les parcelles autorisant plusieurs cultures, nous pouvons choisir celles à implanter en fonction des connaissances acquises sur l'effet des systèmes de culture vis-à-vis du ruissellement. La sélection d'une occupation du sol, pour une parcelle donnée, dépend des choix effectués pour les autres parcelles de l'exploitation, l'agriculteur ayant un assolement à respecter ; elle dépend aussi des décisions prises par les autres agriculteurs sur les parcelles voisines du fait de la connexion hydraulique des parcelles.

L'analyse de l'organisation du travail permet de déterminer le nombre de jours disponibles pour réaliser les opérations culturales supplémentaires envisagées. La connaissance de l'assolement des exploitations nous permet, en parallèle, de connaître les surfaces concernées par les modifications des itinéraires techniques, ainsi que le nombre de jours nécessaire pour les réaliser. La comparaison entre le nombre de jours disponibles et le nombre de jours nécessaire indique si la surface peut être traitée totalement ou seulement en partie. Dans ce dernier cas, il importe de choisir les parcelles où seront réalisées les modifications d'itinéraires techniques, selon le principe appliqué pour la localisation des cultures.

Enfin, nous devons nous assurer que les modifications envisagées n'ont pas de répercussions négatives sur le ruissellement dans les bassins versants où sont situées les parcelles des exploitations non comprises dans le bassin versant considéré.

1.4 Synthèse de la démarche d'analyse

La démarche d'analyse que nous avons établie est donc structurée en trois parties (Figure 8) :

- le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement, en particulier à l'échelle du bassin versant ;
- l'analyse des déterminants des systèmes de culture afin d'en déduire les marges de manœuvre pour les modifier ;
- la conception de modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement à partir des marges de manœuvre identifiées à l'étape précédente, et en orientant les modifications en fonction des résultats du premier diagnostic.

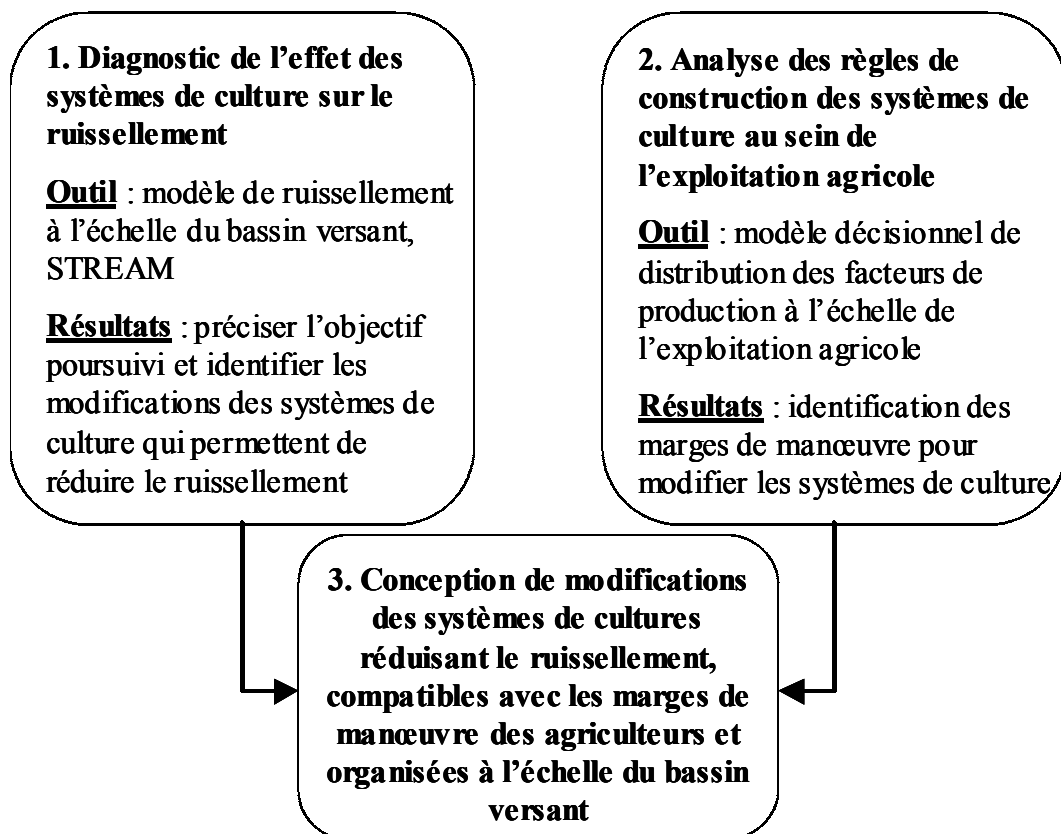


Figure 8 : Schéma récapitulatif de la démarche d'analyse

2 Le dispositif d'étude

Dans cette partie, nous donnons les arguments qui justifient le choix de la région d'étude et du bassin versant sélectionné. Nous présentons aussi le dispositif d'enquête des exploitations agricoles mis en place suivant la méthodologie décrite dans la partie relative à la démarche d'analyse. Enfin, nous présentons brièvement les caractéristiques des exploitations du bassin versant sélectionné.

2.1 Choix du cas d'étude

Le bassin versant sélectionné comme cas d'étude doit être représentatif des phénomènes de ruissellement et d'érosion de la ceinture loessique du nord de l'Europe, à la fois en terme de fonctionnement et aussi de problèmes posés. Nous devons également disposer pour la région d'étude des connaissances nécessaires pour mener à bien notre travail. Nous examinons ici en quoi la petite région agricole du Pays de Caux situé en Haute-Normandie, et le bassin versant de Bourville répondent à nos attentes.

2.1.1 Le Pays de Caux en Haute-Normandie

Nous avons retenu, en Haute-Normandie, la petite région agricole du Pays de Caux, qui présente des facteurs favorables au processus d'érosion, source de nombreux problèmes. Un atout non négligeable est la somme des travaux menés antérieurement dans cette région, travaux qui nous permettent de disposer des données nécessaires pour conduire à bien notre étude.

2.1.1.1 De nombreux problèmes

Le bilan de l'érosion hydrique des sols en France (Le Bissonais *et al.*, 2002) montre que la région de Haute-Normandie figure parmi les régions les plus touchées par les phénomènes de coulées boueuses. Elle est la cinquième région française en nombre de coulées boueuses entre 1985 et 2001, et la seconde en ce qui concerne la densité des coulées. Ce rapport souligne également que cette région est soumise à ce genre de problèmes tout au long de l'année, contrairement à la majorité des autres régions françaises qui sont essentiellement touchées lors des saisons orageuses (par exemple le printemps et l'été en Alsace ou l'automne et l'hiver en Languedoc Roussillon). Au sein de la Haute-Normandie, la petite région agricole du Pays de Caux est particulièrement sensible. Entre 1985 et 1995, 400 coulées boueuses ont été recensées en Haute-Normandie (Souchère *et al.*, 2003), et la majorité concerne le Pays de Caux (Le Bissonais *et al.*, 1996).

De plus, le sous-sol de cette région, et en particulier celui du Pays de Caux est un karst qui rend les captages d'eau potable vulnérables par rapport à une pollution due à des matières en suspension. Ce type de pollution est devenu de plus en plus fréquent au cours de la décennie 90 (Vandewiele, 1999).

2.1.1.2 Un milieu naturel favorable au ruissellement érosif

Le sous-sol géologique de la Haute-Normandie est constitué de craie, mais celle-ci affleure rarement. En effet, la partie supérieure de ce plateau crayeux de l'ère secondaire a été altérée à l'ère tertiaire, donnant naissance à un horizon d'argile à silex. Des limons éoliens ou lœss ont ensuite recouvert ce plateau sur une épaisseur pouvant atteindre une dizaine de mètres ; c'est la formation géologique qui affleure actuellement sur la majeure partie de la Haute-Normandie. Le plateau crayeux et les limons sont entaillés par différentes vallées. Seule la boutonnière du Pays de Bray présente un sous-sol géologique différent dû à la remontée de couches géologiques anciennes et à l'érosion de la craie et des limons éoliens.

La diversité des substrats géologiques superficiels est à l'origine des sols rencontrés (Figure 9).

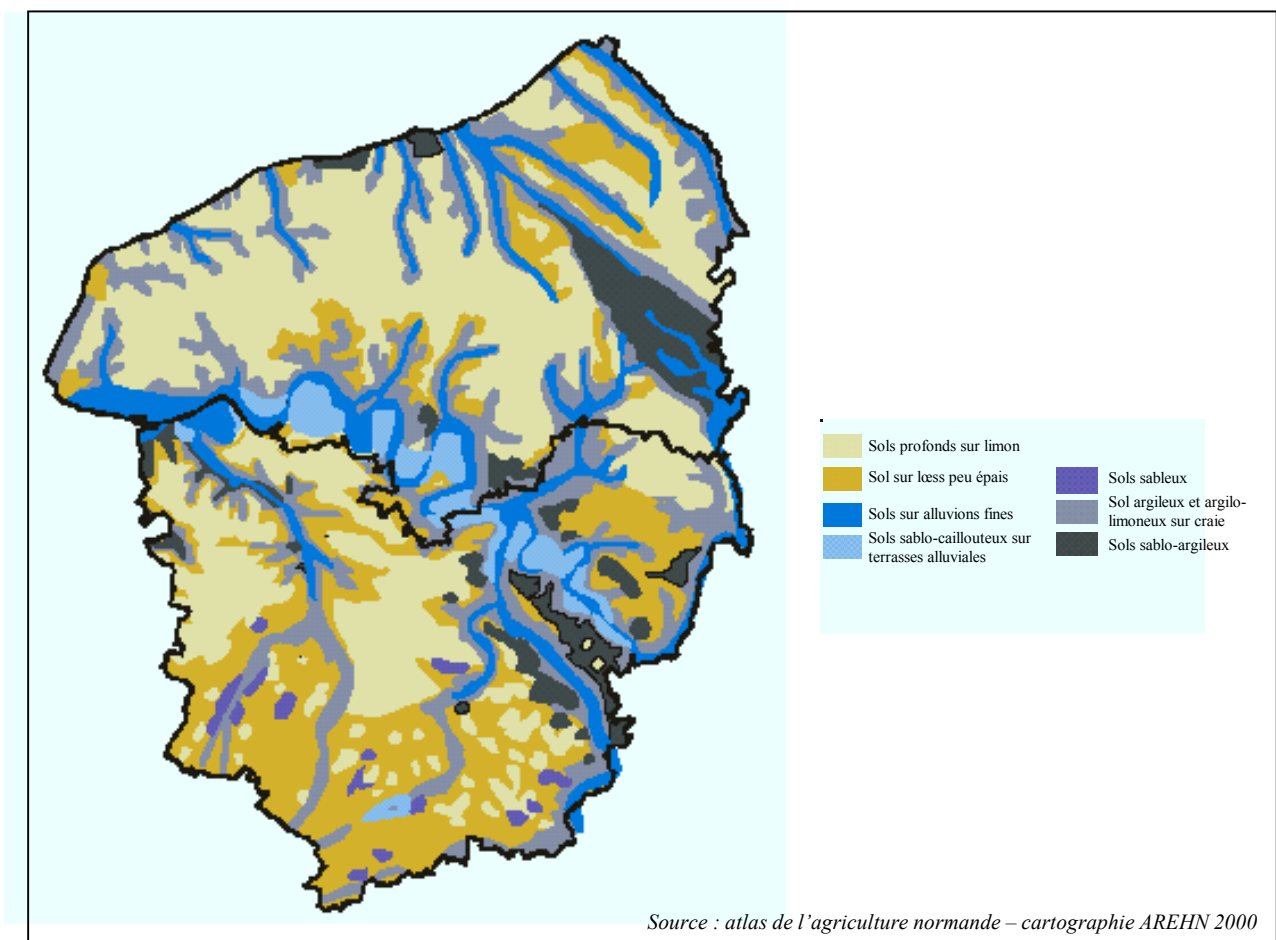


Figure 9 : Carte simplifiée des sols de Haute-Normandie

- Sur le plateau dominant les sols bruns lessivés, développés sur des limons qui présentent une très grande sensibilité à la battance. Deux types : les sols bruns lessivés présents en Seine-Maritime et au nord de l'Eure, développés sur des limons épais à forte capacité hydrique, et ceux du sud de l'Eure sur des limons peu épais donc plus argileux, avec des silex.
- Dans les vallées coexistent les sols sur alluvions en fond de vallée, argileux et hydromorphes, et, les sols limono-argileux à silex, sur les coteaux, là où le plateau crayeux a été décapé.
- Trois autres types de sols sont présents mais très localisés : des sols sablo-argileux dans le Pays de Bray essentiellement, des sols sableux et caillouteux sur les anciennes terrasses de la Seine et quelques sols sableux développés sur des dépôts de sable de Fontainebleau au sud de l'Eure.

En Haute-Normandie, on distingue deux influences climatiques : océanique en Seine-Maritime et continentale dans l'Eure. Cela se traduit par des amplitudes thermiques journalière et annuelle plus importantes dans l'Eure qu'en Seine-Maritime. Néanmoins la température moyenne annuelle varie peu sur l'ensemble de la région et elle se situe autour de 10°C. Le contraste entre les deux départements est beaucoup plus marqué si l'on considère la pluviométrie annuelle (Figure 10).

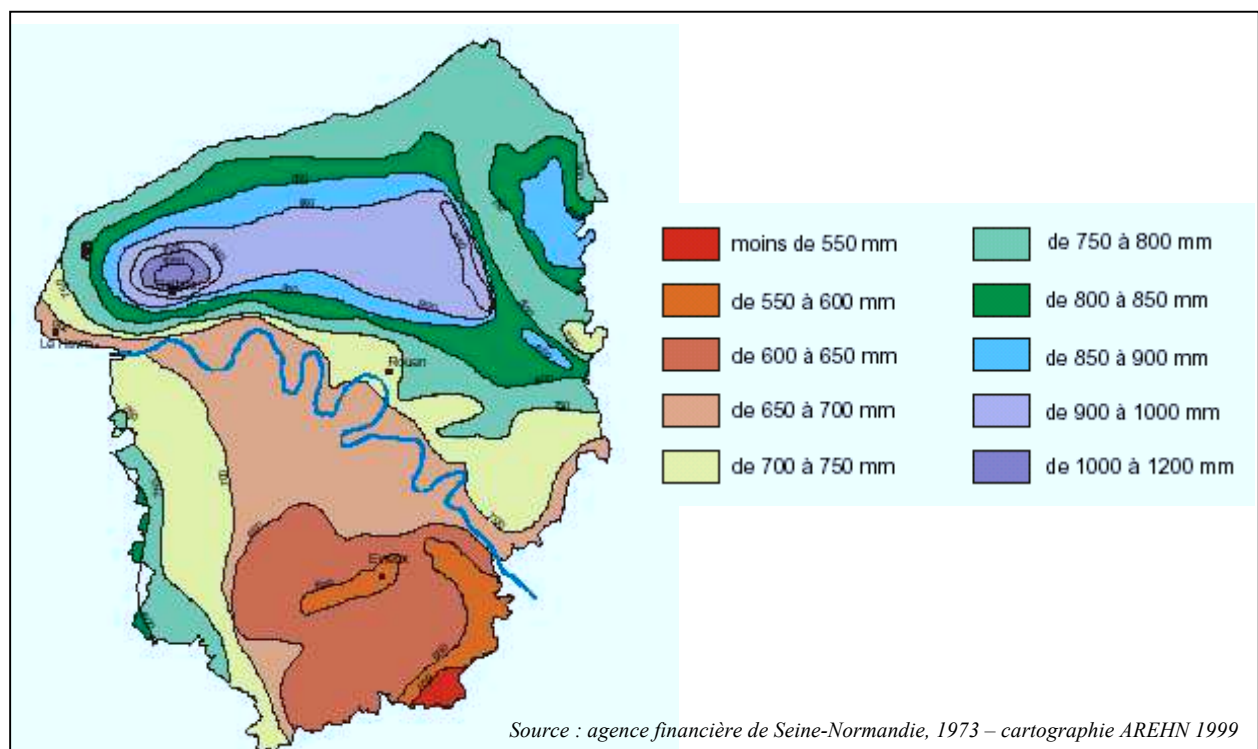


Figure 10 : Variabilité des précipitations annuelles en Haute-Normandie

Les précipitations annuelles vont du simple au double entre le sud de l'Eure et l'ouest du plateau du Pays de Caux. Plus généralement, nous observons une différence de 150 à 200 mm

entre la majeure partie de l'Eure et le plateau du Pays de Caux, au centre de la Seine-Maritime. Sur ce plateau, les précipitations s'étalent tout au long de l'année. La Figure 11 fournit la pluviométrie médiane mensuelle à Saint-Laurent-en-Caux, au cœur du Pays de Caux. Nous remarquons que, si la période d'octobre à janvier est la plus pluvieuse, aucun mois n'est faiblement arrosé, la médiane mensuelle étant toujours supérieure à 50 mm. Par ailleurs, l'érosivité des pluies est globalement faible en comparaison avec les régions du sud de la France. Toutefois, des valeurs importantes sont mesurées au mois de juin en moyenne une année sur cinq (Pihan, 1978).

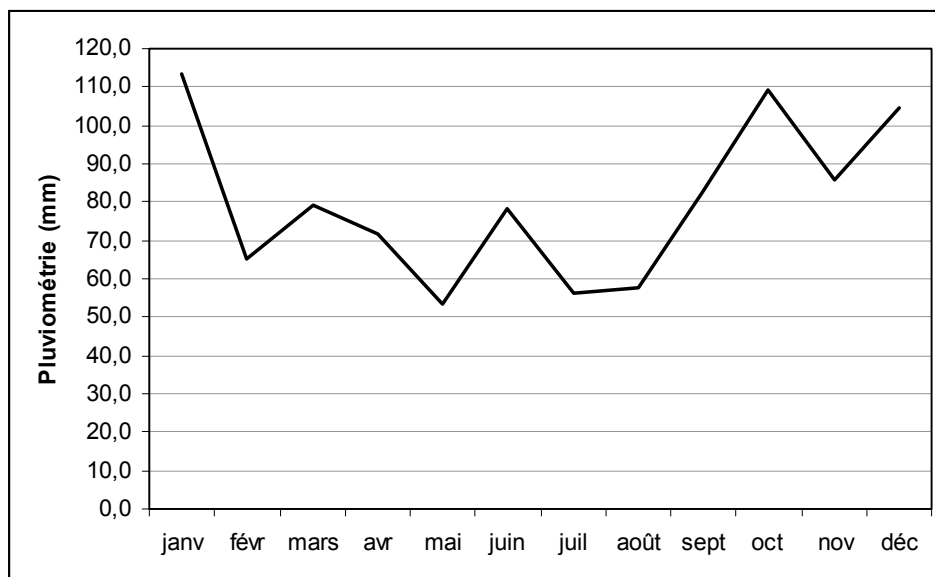


Figure 11 : Précipitations médianes mensuelles à Saint-Laurent-en-Caux (1985-1999)

Cette analyse du milieu naturel montre que les sols sensibles à la battance recouvrent une part importante de la Haute-Normandie, ce qui en fait une région très favorable au ruissellement et à l'érosion concentrée. Dans le Pays de Caux, cette caractéristique des sols est couplée à une forte pluviométrie, ce qui rend cette zone encore plus propice à l'apparition de coulées boueuses malgré la faible érosivité des pluies.

2.1.1.3 Une évolution du paysage favorisant le ruissellement érosif

Au cours du XX^{ème} siècle, et en particulier des trente dernières années, le paysage de la Haute-Normandie a subi une profonde transformation, celle-ci favorisant à terme l'apparition de coulées boueuses. Les changements concernent les modes d'occupation du sol, en particulier la surface en herbe et l'anthropisation des terres, ainsi que des éléments du paysage telles que les haies et les mares.

Si Vivier et Douyer (1985) constate que, de 1914 à 1970 la surface en prairie n'a cessé d'augmenter dans le pays de Caux, à partir de 1970 la tendance s'est inversée, et ceci jusqu'à nos jours. La diminution atteint 50% entre 1970 et 2000 pour l'ensemble de la Haute-

Normandie, soit une perte de 200 000 ha de prairie (Souchère *et al.*, 2003). L'augmentation des terres cultivables qui en découle s'accompagne d'un accroissement de la taille des parcelles en lien avec la mécanisation et la diminution de la main d'œuvre agricole. Par ailleurs, force est de constater que les sols artificialisés occupent de plus en plus d'espace : entre 1982 et 1990 la superficie des sols bâtis a augmenté de 13,9 %, celle des sols revêtus de 1,3 % et celle des sols artificialisés non bâtis de 19,8 % (Thorez, 1997). Or l'augmentation des sols artificialisés de même que la diminution des prairies au profit des cultures provoquent une augmentation des surfaces potentiellement ruisselantes.

Le net recul des mares et des haies a également contribué à la modification du paysage (Thorez, 1997). Ainsi au cours du XX^{ème} siècle, 90% des mares de Haute-Normandie ont disparu, il n'en reste aujourd'hui que 8 000 environ. La fonction de ces mares était de recueillir les eaux de ruissellement et servaient de ressource en eau potable et d'abreuvoir pour les animaux, aucune source ne jaillissant sur le plateau crayeux. Indirectement, elles limitaient donc le volume d'eau ruisselant en stockant une partie du ruissellement. En parallèle, le réseau de haies a partiellement disparu. Dans le département de l'Eure, 38% des haies ont été arrachées entre 1975 et 1988. En Seine-Maritime, ce sont 66% des haies aux abords des parcelles et 46% des haies ceignant les clos-masures, qui ont disparu. Ces haies sont typiques du Pays de Caux : il s'agit de talus d'un mètre de haut plantés de hauts arbres (hêtre et chênes essentiellement) entourant les corps de ferme et les villages. Leur intérêt principal est de protéger les habitations et les vergers des vents soufflant sur le plateau cauchois. Elles jouent également un rôle vis-à-vis du ruissellement en ralentissant la vitesse de l'eau et en infiltrant une partie du ruissellement. Cependant, en Haute-Normandie, notamment en Pays de Caux, les haies n'ont jamais formé de réseau continu contrairement aux régions bocagères que sont la Bretagne ou la Basse-Normandie. Déjà à la fin du XIX^{ème} siècle, Ardouin-Dumazet (1898) décrivait le paysage du Pays de Caux comme un vaste plateau cultivé avec des hameaux entourés de hauts arbres. Ceci nous permet d'affirmer que la suppression des haies n'a pas eu un effet sur le régime d'écoulement de l'eau aussi important qu'en pays bocager.

2.1.1.4 Des données disponibles issues d'études antérieures

Le choix de la Haute-Normandie comme région d'étude est aussi lié à l'antériorité des travaux sur le ruissellement et l'érosion dans cette région. Il existe notamment un ensemble de relevés parcellaires décrivant l'état de surface du sol. Cet ensemble couvre la période des années 90 et a été acquis dans différents sites du Pays de Caux (Le Bissonnais *et al.*, accepté). Or une telle base de données nous est indispensable pour la réalisation du diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur les états de surface à l'échelle parcellaire. Une autre étude réalisée dans cette région nous intéresse. Elle a trait à l'analyse de l'organisation du travail dans quelques exploitations. Une partie de cette étude portait sur la détermination des règles de

calcul le nombre de jours disponibles (His, 1996). Nous pourrions donc utiliser ces résultats pour l'étude relative à l'organisation du travail.

En conclusion, le Pays de Caux en région Haute-Normandie nous paraît pertinent par rapport à notre problématique. De part les caractéristiques de ses sols et de son climat, cette petite région agricole présente des risques élevés d'apparition de coulées boueuses. Ce risque est accru depuis le début du XX^{ème} siècle, en raison des changements paysagers qui contribuent à augmenter le flux de ruissellement et à restreindre la capacité de stockage des sols. En outre, nous disposons pour le Pays de Caux de données indispensables au diagnostic préalable de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle parcellaire, ainsi que de données sur les jours disponibles pour l'analyse de l'organisation du travail. Pour le choix du bassin versant comme cas d'étude, nous proposons en conséquence de nous focaliser sur la petite région agricole du Pays de Caux.

2.1.2 Le bassin versant de Bourville

Nous avons retenu le bassin versant de Bourville : il est caractérisé par un fort risque d'apparition de coulées boueuses, et a fait les frais par le passé de dégâts dus aux eaux de ruissellement. De plus, le bassin versant de Bourville est utilisé par plusieurs agriculteurs et offre donc une diversité de systèmes de production et de culture à organiser.

Le bassin versant de Bourville se trouve à l'amont du bassin versant hydrographique du Dun, lui-même localisé au nord-est du Pays de Caux. (Figure 12). Il se situe donc sur le plateau cauchois, au sein de la zone de fortes précipitations où prédominent les sols sur limons profonds, très battants. Il est relié hydrauliquement au Dun au niveau de la commune de Saint-Pierre-le-Vigier par l'intermédiaire d'un talweg sec. La superficie du bassin versant de Bourville est de 1 086 ha, soit 10% de celle du bassin versant du Dun (10 877 ha). Les terres labourables occupent 75% de la surface du bassin versant de Bourville, ce qui le classe parmi les bassins très ruisselants dans l'étude de Dubreuil (2001). Dans cette partie du Pays de Caux, une étude réalisée par des géographes a mis en évidence des différences notables de morphologie de part et d'autre d'une faille orientée est-ouest (Delahaye *et al.*, 2002). Le bassin versant du Dun est situé au nord de cette faille : il présente une morphologie peu accidentée avec de faibles pentes par comparaison aux bassins versants situés au sud de la faille. Il en résulte un nombre élevé de blocs de parcelles en culture de plus de 200 ha dans la zone amont du bassin versant du Dun et à l'inverse aucun bloc de parcelles en prairie de plus de 50 ha : les surfaces potentiellement ruisselantes sont donc nombreuses.

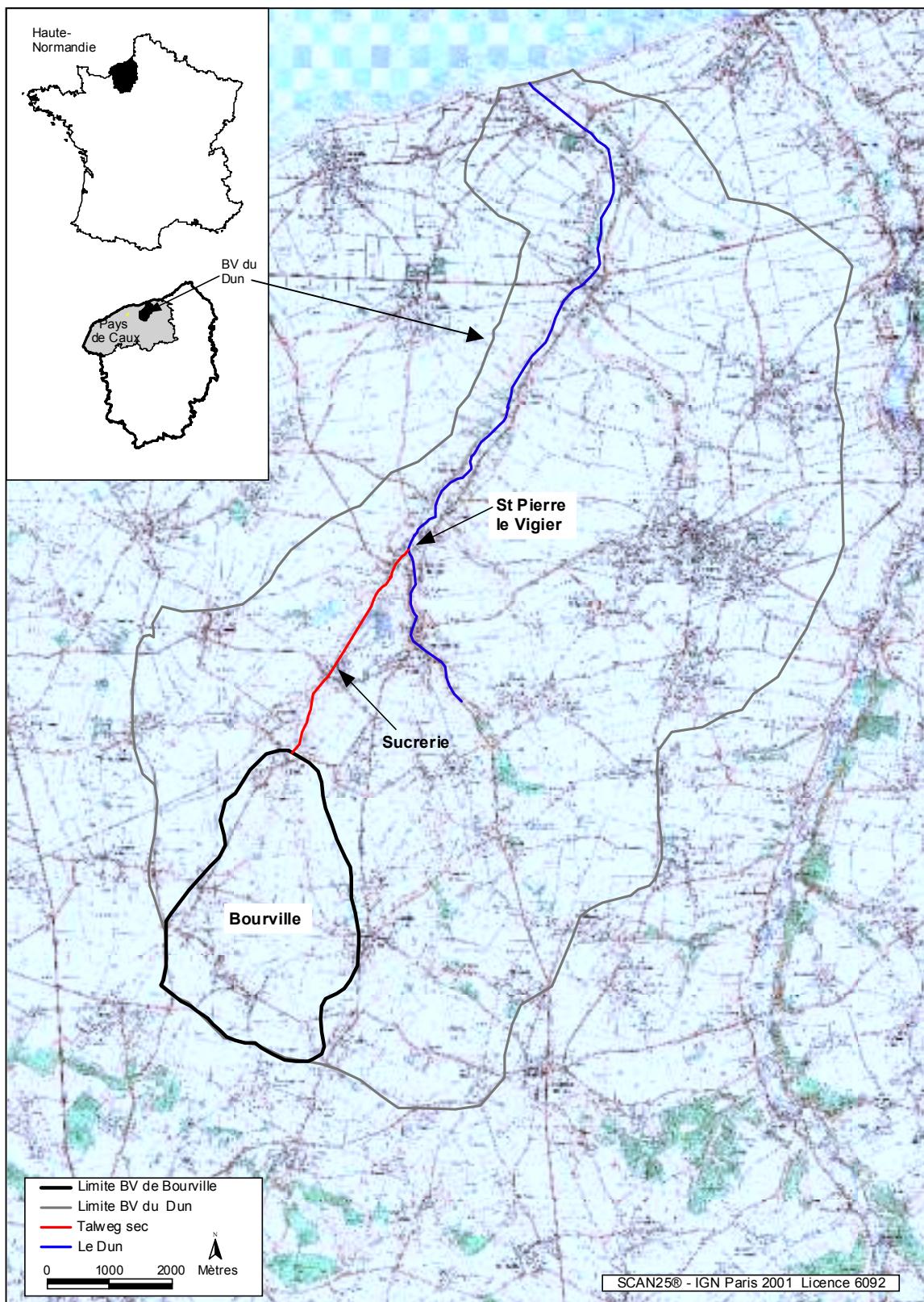
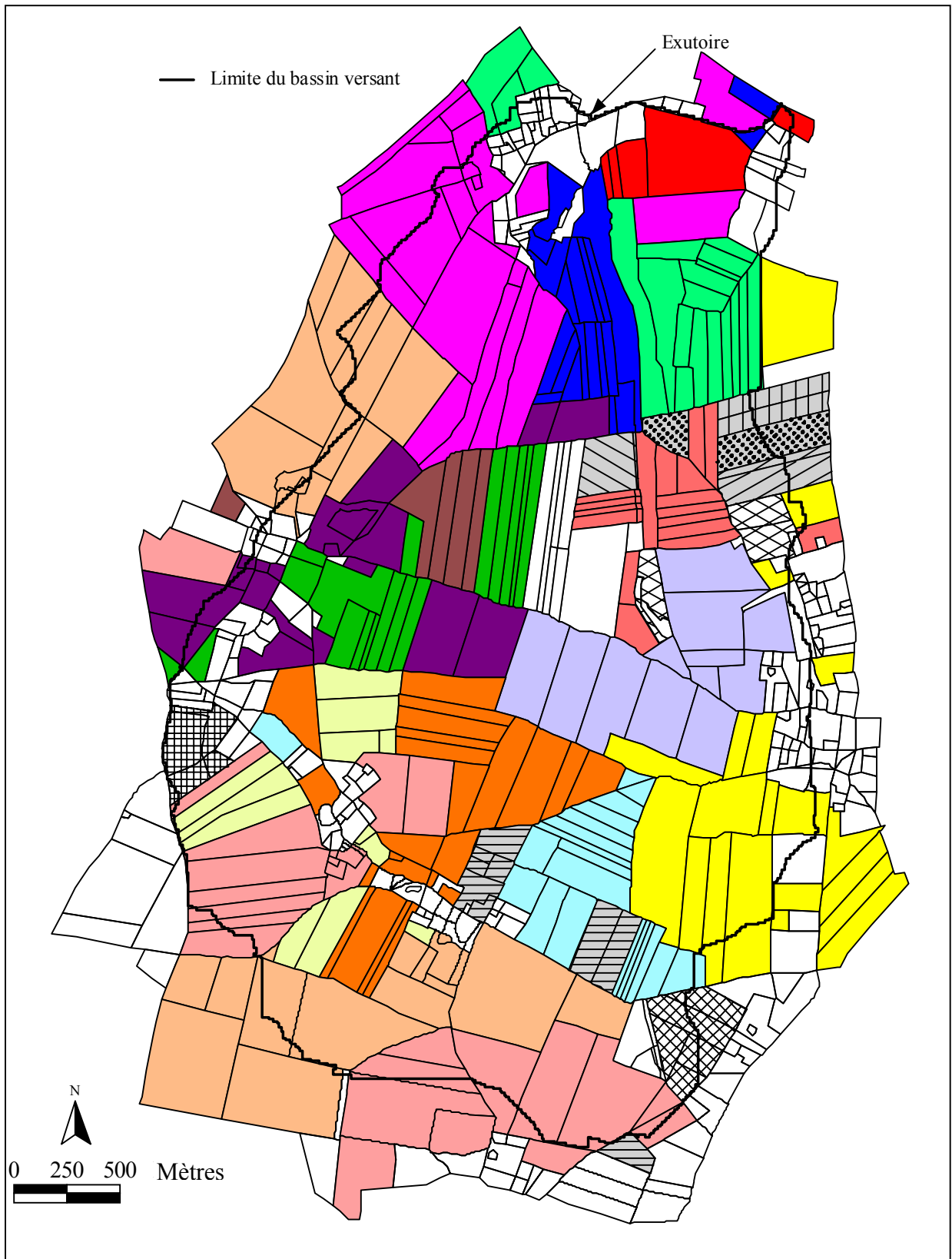


Figure 12 : Carte de situation du bassin versant de Bourville

Concernant les dégâts, cette même étude montre que la densité des ravines est plus importante dans les bassins versants situés au nord de la faille, comme Bourville, que dans ceux situés au sud : 0,47 à 0,65 km/km² au nord contre 0,15 à 0,53 km/km² au sud. Dans le bassin versant de Bourville plus particulièrement, les dégâts sont principalement survenus à l'aval. L'inventaire des déclarations de catastrophes naturelles révèle que trois sont la conséquence du ruissellement produit dans le bassin versant de Bourville : le 19 juillet 1994 sur la commune de Bourville, et fin décembre 1993 et fin janvier 1995 sur la commune de Saint-Pierre-le-Vigier. Notons aussi que la sucrerie située entre l'exutoire du bassin versant et la commune de Saint-Pierre-le-Vigier, sur l'axe du talweg, est régulièrement inondée sans que ces inondations fassent l'objet de déclarations en catastrophe naturelle. En revanche, au sein même du bassin versant, les dégâts sont mineurs. Il s'agit essentiellement de routes inondées et encombrées par des sédiments, mais non d'inondations d'habitations. Au sein du territoire agricole, les problèmes sont surtout liés à l'apparition de ravines et pas à des dépôts de sédiments.

La Figure 13 montre la répartition des parcelles agricoles (terres arables et prairies) entre les différents agriculteurs exploitant le bassin versant de Bourville. Le bassin versant est exploité par 28 agriculteurs. Quinze d'entre eux exploitent 90% de la surface agricole du bassin (parcelles en couleur), soit 48,75 ha par agriculteur en moyenne. Les 13 autres agriculteurs travaillent les 10% restants (parcelles en noir et blanc), soit 6,25 ha par agriculteur en moyenne. Le bassin versant de Bourville n'est donc pas exploité majoritairement par seulement quelques agriculteurs, comme cela peut être le cas dans d'autres bassins versants de la région, et c'est pourquoi il nous intéresse d'autant plus.



Les parcelles en blanc correspondent à la surface non agricole du bassin versant : bois, jardin, etc.
 Pour les autres parcelles, chaque motif correspond à un agriculteur différent.

Figure 13 : Morcellement du bassin versant de Bourville entre les différents territoires des exploitations agricoles

2.2 Le dispositif d'enquête

2.2.1 Objectifs et structuration des enquêtes en exploitations agricoles

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons détaillé les données nécessaires à l'analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement et des marges de manœuvre existantes pour les modifier. Les informations à recueillir chez les agriculteurs concernent :

- les assolements et les techniques culturales appliquées lors des campagnes culturales passées afin de pouvoir réaliser le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant, ceci sur la durée d'une succession culturale. Dans la région, les successions culturales étant établies sur une durée de 5 à 6 ans en général (Poujade, 1989 ; Martin *et al.*, 1998), nous avons retenu la durée maximale de 6 ans. Nos enquêtes ayant débuté au printemps 2001, nous avons recueilli les assolements sur les campagnes culturales 1995-1996 jusqu'à 2000-2001.
- les règles de localisation spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation et les règles d'organisation du travail afin de pouvoir déterminer les marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures ainsi que les itinéraires techniques.

Nous avons vu précédemment que deux groupes d'agriculteurs se partagent le bassin versant de Bourville : 15 agriculteurs forment le groupe A, exploitant 89% de la surface en terres labourables du bassin, et 13 le groupe B, exploitent les 11% restant. Ce dernier groupe correspond à des agriculteurs dont la majeure partie de l'exploitation est située en dehors du bassin versant et dont le siège d'exploitation est parfois éloigné (15 km au maximum). Pour cette raison, nous avons considéré que ces agriculteurs n'agissaient pas en priorité sur les parcelles localisées dans le bassin versant de Bourville, mais plutôt sur celles proches de leur exploitation, où ils font probablement face aux mêmes types de problèmes.

2.2.2 Enquêtes du groupe A

Dans ce groupe, nous avons pu enquêter 14 des 15 agriculteurs concernés, l'un ayant refusé de participer à notre étude. L'ensemble des informations a été recueilli au cours de deux enquêtes de 3 heures chacune.

La première enquête, dont le questionnaire se trouve en annexe 3, comporte trois rubriques. La première porte sur la description de l'exploitation :

- les caractéristiques générales de l'exploitation permettant de préciser la taille de l'exploitation en terme de surface et de main d'œuvre ;

- la description du système de production, avec en particulier l'explicitation des raisons du choix des cultures,
- la localisation de l'ensemble du parcellaire de l'exploitation sur fond de carte IGN au 1/25000^{ème}, l'identification des caractéristiques de chaque parcelle (hydromorphie, pierrosité ...), ainsi que l'historique des cultures implantées sur les 6 campagnes culturales enquêtées.

La seconde rubrique permet de faire le point sur les problèmes de ruissellement et d'érosion sur le territoire de l'exploitation au sein du bassin versant de Bourville, à savoir :

- les différents dégâts occasionnés sur les parcelles incluses dans le bassin,
- les moyens existants selon les agriculteurs pour y remédier
- les contraintes à la mise en œuvre de ces solutions.

La troisième rubrique porte spécifiquement sur les règles de localisation spatiale des cultures, à savoir pour chaque culture :

- la zone cultivable,
- le délai de retour,
- les cultures précédentes envisageables.

Ces informations permettent de reconstituer avec l'agriculteur les successions culturales appliquées sur son exploitation.

La seconde enquête (annexe 4) est centrée sur les itinéraires techniques et l'organisation du travail. Les différentes informations recueillies concernent :

- la main d'œuvre : les différentes personnes travaillant sur l'exploitation, en permanence ou occasionnellement, les tâches qu'elles réalisent et leur disponibilité ;
- le matériel disponible sur l'exploitation ou en copropriété, ainsi que celui manquant et pour lequel l'agriculteur a recours à une entreprise ;
- les itinéraires techniques pour chaque culture, en détaillant pour chaque opération culturale, le matériel et la main d'œuvre mobilisés, ainsi que la vitesse de réalisation du chantier ;
- la gestion des concurrences entre les différents chantiers lorsque la main d'œuvre ou le matériel disponibles ne permettent pas de réaliser tous les chantiers concurrents en même temps.

A ce questionnaire, nous avons ajouté une rubrique plus générale portant sur les projets de l'exploitation en rapport avec les systèmes de culture. En effet, il nous semble judicieux de

tenir compte des changements éventuels d'outil ou de culture dans l'analyse et les simulations des modifications des systèmes de culture.

Grâce à l'ensemble de ces informations, nous pouvons établir un diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement pour les campagnes culturales passées et analyser les marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture. Les informations complémentaires relatives au ruissellement et à l'érosion au sein des exploitations nous permettent d'orienter les modifications des systèmes de culture conçues vers une réduction des problèmes à l'aval plutôt qu'au sein du bassin versant.

2.2.3 Enquête du groupe B

Partant du principe que les agriculteurs appartenant au groupe B donnent la priorité aux parcelles situées à proximité de leur exploitation, nous n'envisageons pas de modifier les systèmes de culture sur leurs parcelles situées dans le bassin versant de Bourville. Ils ont toutefois fait l'objet d'enquêtes mais celles-ci n'ont porté que sur la connaissance des systèmes de culture et non sur la compréhension détaillée des règles de constitution des systèmes de culture, comme pour l'autre groupe. Le premier objectif est d'obtenir les informations nécessaires au diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement dans le bassin versant de Bourville. Le second, de mettre en évidence les systèmes de culture en place afin d'en tenir compte dans les simulations des modifications sur les années à venir. Pour ce groupe, une seule enquête simplifiée d'environ une heure et demi a suffi. Les points abordés sont les suivants (annexe 5) :

- caractéristiques générales de l'exploitation, productions végétales et animales (partie similaire à la première enquête du groupe A) ;
- localisation des parcelles situées dans le bassin versant de Bourville et inventaire des problèmes liés au ruissellement et à l'érosion. Pour ces parcelles, nous avons listé les cultures implantées lors des campagnes culturales de 1995-1996 à 2000-2001, ainsi que les opérations culturales ayant un effet sur le ruissellement (gestion de l'interculture, roulage des semis, binage des betteraves sucrières) ;
- successions culturales mises en œuvre sur l'ensemble des parcelles de l'exploitation puisque ce qui est fait sur le bassin versant de Bourville dépend en partie de ce qui est réalisé sur les autres parcelles de l'exploitation.

2.3 Présentation des exploitations du bassin versant de Bourville

Au total 26 exploitations agricoles ont été enquêtées, 14 appartenant au groupe A et 12 au groupe B. Le Tableau 10 récapitule les principales caractéristiques des exploitations en 2001. Nous observons une diversité de systèmes de production qui va d'une petite exploitation produisant des foies gras de canard à une exploitation de grande culture de 246 ha produisant des pommes de terre. La quasi-totalité des exploitations disposent d'un atelier d'élevage (bovins laitiers ou allaitants), systématiquement associé à une surface en prairie variable, bien qu'au total les prairies ne représentent que 25% de la surface du bassin versant de Bourville. Notons de plus que, dans le groupe A, la surface en prairie est généralement inférieure à 30% de la SAU totale de l'exploitation, alors que dans le groupe B, c'est l'inverse. Une partie des exploitations du groupe B a son siège d'exploitation dans des zones plus contraignantes (pente, sols hydromorphes de vallées), d'où cette proportion plus élevée de prairies. Cependant, la majorité des exploitations a une orientation grande culture, avec une part importante des terres labourables implantées en lin et betteraves sucrières. Habituellement, la part du lin ne dépasse pas 16-17% en raison d'un délai de retour de 6 ans. En 2001, quelques agriculteurs en ont implanté davantage. Cette augmentation de la sole de lin répond à une plus forte demande. La superficie en lin n'excède cependant pas 20-21%, proportion significative d'un délai de retour de 5 ans. Cet exemple illustre la difficulté à prévoir sur plusieurs années l'assolement des exploitations, difficulté précédemment évoquée.

L'ensemble des exploitations du groupe B, constitué des exploitations qui n'ont qu'une faible part de leur surface dans le bassin (moins de 15 ha), exploite seulement 11% des terres labourables du bassin versant. Au sein de chaque exploitation, cette surface représente moins de la moitié des terres labourables, excepté dans un cas (ODO). Cette dernière exploitation, dont l'activité principale est l'élevage de canards, n'a, en tout et pour tout, qu'une seule parcelle alternativement cultivée en céréales ou louée à d'autres agriculteurs pour y cultiver du lin ou des pommes de terre.

Groupe	Exploitation	SAU (ha)	Productions végétales							Productions animales		Autres productions
			TL (ha)	Ha BV	% BV	% Lin	% BS	% PDT	% Prairie	Type	Effectif	
Groupe A	ARO	60	58	39,5	68%	17%	10%	11,5% *	3,5%	Non	-	
	BOL	91,5	71	19,5	27,5%	21%	8,5%	0	22,5%	VL	22 vaches	
	FBL	44,5	21,5	21,5	100%	0	0	0	51,5%	VA	23 vaches	
	GLA	176,5	140,5	86	61%	19%	5,5%	0	20,5%	VL	75 vaches	
	JCO	91,5	65,5	33	50,5%	19%	11%	0	28,5%	VL	45 vaches	
	JMO	246	236 ⁸	98	41,5%	20%	15%	18%	4%	Non	-	
	JVO	205,5	161,5	72	44,5%	21%	11,5%	0	21,5%	VA	75 vaches	
	MDE	183	164,5	110	67%	19%	13%	13%	10%	VA	35 vaches	
	MRO	178	154,5	101	65,5%	16%	15%	16%	13%	VL	45 vaches	
	PCE	39	24	19,5	81%	0	6%	0	38,5%	VL	27 vaches	
	ROL	126	104	42	40,5%	19%	12,5%	0	17,5%	VL	37 vaches	
	RTE	71,5	44	33,5	76%	11,5%	9%	0	38,5%	VL	35 vaches	
	VRO	98,5	86,5	69,5	80,5%	17%	9%	0	12%	VA	25 vaches	
XDE	114,5	89,5	23	25,5%	10,5	25%	0	22%	Ovin	150 brebis	Haras	
Groupe B	DAN	200	138	5	3,5%	14,5%	13%	3,5% *	31%	VA	80 vaches	
	DBO	250	200	3	1,5%	20%	15%	0	20%	Engraisseur	400 bovins	
	EDE	33	15	4,5	30%	20%	6,5%	0	54,5%	VL	24 vaches	
	ERO	89,5	62,5	10	16%	16%	15%	0	30%	VA	50 vaches	
	FDE	60	30	7	23,5%	0	10%	0	50%	VL	20 vaches	
	GLE	31	18	5,5	30,5%	0	0	0	42%	VA	28 vaches	
	JBA	145	70	9	13%	0	0	0	51,5%	VL	50 vaches	VA : 40 vaches
	ODO	11,5	3,5	3,5	100%	0	0	0	69,5%	Fois gras de canard : 1 000 – 1 200 canards		
	PBU	160	125	14	11%	16%	16%	0	22%	VL	28 vaches	
	PCO	190	120	15	12,5%	9%	6,5%	6% *	37%	VL	45 vaches	VA : 40 vaches
	PLA	103	61,5	7,5	7,5%	10%	2%	0	40,3%	VA	55 vaches	
PMA	89	52	5	9,5%	14,5%	6,5%	0	41,6%	VA	22 vaches	VL : 19 vaches	

« Ha BV » : surface dans le bassin versant de Bourville / « TL (ha) » : surface en terres labourables / « % BV » : % des terres labourables dans le bassin versant de Bourville
« BS » : betterave sucrière / « PDT » : pomme de terre / « VL » : vache laitière / « VA » : vache allaitante

⁸ Cet agriculteur cultive annuellement 300 ha car il sous-loue des terres pour y implanter de la pomme de terre / * Sous-location à d'autres agriculteurs

Conclusion du chapitre

Le dispositif d'étude que nous avons établi est structuré en trois parties, les deux premières permettant de réaliser la troisième. Il s'agit, d'une part, d'étudier l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif à l'échelle parcellaire ainsi qu'à l'échelle du bassin versant, en utilisant le modèle de simulation du ruissellement STREAM. Cela nous permet de définir les modifications des systèmes de culture à envisager et d'en préciser les objectifs. D'autre part, nous analysons les règles de constitution des systèmes de culture au sein des exploitations agricoles en utilisant un modèle décisionnel. Nous en déduisons les marges de manœuvre qui peuvent être mises à profit pour modifier les systèmes de culture, les modifications proposées respectant les objectifs de production et les règles des agriculteurs. Ces deux types de résultats nous permettent de concevoir des modifications des systèmes de culture efficaces vis-à-vis de la réduction du ruissellement et compatibles avec les marges de manœuvre des agriculteurs. Ces modifications sont conçues pour chaque exploitation individuellement mais organisées à l'échelle du bassin versant en fonction du phénomène physique de ruissellement.

Pour mener à bien cette étude, nous avons choisi le bassin versant de Bourville qui présente plusieurs caractéristiques intéressantes :

- il est situé dans le Pays de Caux en Haute-Normandie, petite région agricole soumise à de nombreuses coulées boueuses du fait de ses sols limoneux très battants et de son régime pluviométrique soutenu ;
- des événements pluvieux ruisselants de forte ampleur ont déjà eu lieu sur le site d'étude : ils affectaient principalement les zones à l'exutoire ;
- le bassin versant est exploité par différents agriculteurs, ce qui nous permet d'étudier les possibilités d'organisation spatiale de différents systèmes de culture à l'échelle d'un bassin versant.

Le choix du Pays de Caux comme région d'étude se justifie d'autant mieux que, par le passé, des études y ont été conduites sur l'érosion des sols. Certaines d'entre elles ont, en particulier, permis de constituer une base de données de relevés d'état de surface, que nous utiliserons pour la première partie de notre étude. Pour cette région, nous disposons également de données relatives aux jours disponibles, données qui nous sont nécessaires pour analyser l'organisation du travail.

CHAPITRE 3

**Diagnostic de
l'effet des systèmes de culture
sur le ruissellement érosif**

Chapitre 3 : Diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif

La synthèse bibliographique réalisée au premier chapitre nous a montré que les connaissances de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif méritaient d'être approfondies, en particulier à l'échelle du bassin versant. C'est ce que nous nous proposons de faire dans ce chapitre, à partir du cas d'étude du bassin versant de Bourville. L'analyse est basée sur l'évaluation du ruissellement érosif à l'aide du modèle STREAM, modèle capable de simuler le ruissellement à l'échelle de l'événement pluvieux. Plusieurs simulations seront donc effectuées afin de rendre compte de la modification des états de surface au cours du temps. Pour alimenter ce modèle, nous faisons correspondre aux systèmes de culture les états de surface qu'ils créent en interaction avec le climat (faciès, rugosité orientée, rugosité perpendiculaire au sens de travail du sol). Ce chapitre sera donc décomposé en deux parties. La première partie est consacrée à l'étude de la variabilité des états de surface sous l'effet conjoint des systèmes de culture et du climat à une date donnée, et celle de l'évolution de ces états de surface au cours du temps. Dans une deuxième partie, nous analysons l'effet des états de surface sur le ruissellement érosif.

1 Les états de surface : résultat d'une interaction, à un instant donné, entre climat et système de culture

L'objectif de cette partie est d'analyser la variabilité des états de surface sous l'effet conjoint du climat et des techniques culturales. Ceci nous permettra de définir le domaine de validité temporel de notre diagnostic, à savoir, les périodes de stabilité des états de surface, et, pour ce domaine, d'établir un lien entre systèmes de culture et états de surface.

1.1 Etude de la variabilité des états de surface à un instant donné et de leur évolution au cours du temps⁹

Dans un premier temps, nous analysons la variabilité des états de surface au cours de la campagne culturale due aux itinéraires techniques appliqués sur l'ensemble des cultures présentes dans les successions culturales. Pour les périodes de stabilité mises en évidence, nous étudions par la suite la variabilité des états de surface, ainsi que leur évolution au cours du temps, sous l'effet du climat. Cette analyse est réalisée à partir d'enquêtes parcellaires effectuées entre 1992 à 2000 dans le Pays de Caux.

1.1.1 Variabilité des états de surface due aux techniques culturales

Les différentes opérations culturales qui modifient les états de surface sont les suivantes¹⁰ :

- les labours, les opérations de travail du sol pour la préparation des semis et les semis. Les labours sont généralement effectués peu de temps avant l'implantation des cultures. Dans le Pays de Caux, on peut donc considérer que ces opérations s'échelonnent entre le 25/08 (premier semis de colza) et le 15/11 (dernier semis de blé) pour les cultures d'hiver, et entre le 15/02 (premier semis de pois) et le 01/05 (dernier semis de maïs) pour les cultures de printemps. Il arrive parfois que les agriculteurs labourent leurs terres en hiver pour l'implantation du lin et de pommes de terre, mais ceci est assez marginal.
- les récoltes qui commencent rarement avant le 15/07 (début du battage du colza et de l'escourgeon) et se terminent généralement au 15/11 (arrachage des dernières betteraves sucrières).

⁹ Nous nous limitons au faciès, à la rugosité orientée et au taux de couvert végétal. Le cas de la rugosité perpendiculaire sera traité plus simplement dans le paragraphe 1.2.2, suite à l'analyse détaillée des autres paramètres.

¹⁰ Les dates citées sont spécifiques au Pays de Caux et correspondent à des conditions climatiques favorables.

- les opérations de déchaumage qui sont réalisées à la suite des récoltes, rarement au-delà du 15/11 ; les sols sont généralement très humides après cette date et donc peu favorables à ce type d'opérations culturales.
- les semis de cultures intermédiaires ou de cultures dérobées, après la récolte et avant le 30 septembre pour que le couvert végétal se développe suffisamment.

Partant de là, il est possible de découper une campagne culturale en quatre saisons culturales homogènes du point de vue des modifications des états de surface par les opérations culturales :

- Saison 1, du 15/07 au 15/11 : elle correspond à l'enchaînement des récoltes, des semis des cultures d'hiver, des déchaumages et des semis des cultures intermédiaires ou dérobées.
- Saison 2, du 15/11 au 15/02 : période durant laquelle les opérations culturales modifient relativement peu les états de surface. Les éventuelles modifications concernent le broyage des cultures intermédiaires, les labours d'hiver pour l'implantation du lin et la destruction chimique des repousses de céréales.
- Saison 3, du 15/02 au 01/05 : cette période correspond à l'implantation des cultures de printemps.
- Saison 4, du 01/05 au 15/07 : période sans opérations culturales systématiques, excepté des semis de « gel fourrager » jusqu'au 31/05 et le binage des betteraves sucrières au mois de juin. Durant la première quinzaine de mai, il peut y avoir également des opérations de buttage des dernières plantations de pomme de terre. Ces trois opérations ne représentent qu'une faible proportion des surfaces en culture.

Nous avons ainsi deux saisons culturales de transition (1 et 3) au cours desquelles les états de surface sont fortement modifiés par les opérations culturales, et deux saisons culturales stables (2 et 4) sans modification majeure.

Réaliser un diagnostic durant les périodes de transition nécessiterait de considérer plusieurs dates rapprochées afin de pouvoir prendre en compte la succession des états de surface du sol durant ces périodes. Or ceci contredit avec une des contraintes que nous nous sommes fixées pour l'étude, à savoir le nombre limité de simulations. Mais ce qui supprime toute hésitation dans le choix des périodes c'est que les saisons culturales 2 et 4 correspondent respectivement aux périodes de risque climatique hivernal et printanier. Pour la suite de l'analyse, nous conserverons donc uniquement ces deux saisons culturales.

1.1.2 Variabilité des états de surface due au climat

Si pendant les saisons culturales 2 et 4, les états de surface ne sont pas modifiés par les techniques culturales, en revanche le climat peut générer des modifications qu'il importe

d'analyser. Ceci permettra de déterminer s'il est possible ou non de trouver des périodes durant lesquelles les états de surface sont stables sous l'effet des techniques culturales et du climat.

1.1.2.1 Données disponibles pour l'analyse

Pour l'analyse de la variabilité des états de surfaces, nous disposons de relevés parcellaires réalisés par l'UMR SAD-APT (INRA, INA P-G) (Blosseville et Fongueusemare) et par l'UR INRA Sciences du sol d'Orléans (Bourville, Blosseville_1, Le Hanouard) entre le 05/11/1992 et le 15/05/2000 (Annexe 6). Les relevés de l'INRA d'Orléans nous renseignent sur le taux de couvert végétal, le faciès, la rugosité orientée (parallèle au sens du travail du sol) et l'occupation du sol. Les relevés de l'INRA SAD-APT nous fournissent les mêmes renseignements, excepté le taux de couvert végétal pour les semis de culture d'hiver. En revanche, ils comprennent des indications sur les opérations de travail du sol. Au total, nous disposons de 4 255 relevés de parcelles de terres labourables, se répartissant de la sorte : 2 812 pour la saison 2 et 1 443 pour la saison 4.

Précisons que l'absence d'information pour le taux de couverture végétale dans les relevés de Blosseville et Fongueusemare n'a pas été limitant pour l'analyse. En effet, la majorité des relevés réalisés sur les autres bassins versants à des périodes voisines présentaient un taux de couvert végétal uniforme correspondant à la classe 1. Nous avons donc considéré qu'il en était de même pour les relevés de Blosseville et de Fongueusemare. L'occupation du sol pour laquelle cette extrapolation n'a pas été possible est le semis de colza. Nous verrons plus loin comment nous avons traité ce cas particulier.

Concernant la précision et l'homogénéité des données, nous avons été confrontés au problème de la multiplicité des enquêteurs qui se sont succédés de 1992 à 2000. En effet, deux équipes différentes sont intervenues sans avoir comparé initialement leur méthode d'enquête parcellaire. Les différences de notation portaient sur la rugosité : les enquêteurs de l'INRA SAD-APT estimaient la rugosité sur de plus courtes distances (1 à 2 m) que ceux de l'INRA d'Orléans (10 à 15 m) (communication orale Philippe Martin). Pour un même relevé, la note de rugosité pouvait donc être supérieure dans le cas d'un enquêteur de l'INRA SAD-APT. Les relevés de l'INRA SAD-APT correspondant aux années pluvieuses 92-93 et 93-94, les relevés caractérisent globalement des états de surface très dégradés avec une faible rugosité : la différence de notation de la rugosité n'intervient donc pas. Pour les autres années, il s'agit uniquement de relevés de l'INRA d'Orléans.

Les relevés à la base de notre travail constituent un sous-ensemble des relevés analysés par Le Bissonais *et al.* (accepté)¹¹. Leur analyse s'avère insuffisante dans le cadre de notre

¹¹ Nous nous sommes limités à un sous ensemble à cause du format des données qui n'était pas homogène pour l'ensemble des relevés.

travail car elle donne la gamme des états de surface rencontrée dans le Pays de Caux sans référence aux techniques culturales qui les ont générés. En outre, la variabilité temporelle est analysée sur la base des saisons climatiques, différentes des saisons culturales identifiées précédemment.

L'ensemble des relevés sur lequel nous travaillons se répartit sur six campagnes culturales. Afin de connaître la représentativité climatique des années étudiées, nous avons analysé la variabilité climatique sur la base des précipitations. Les données de précipitations journalières utilisées sont celles relevées par le pluviomètre de l'Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols (AREAS) situé à l'aval du bassin versant de Bourville pour la période allant du 01/07/1995 au 30/08/2000. Elles ont été complétées par les enregistrements du poste du réseau pluviométrique complémentaire de l'AESN localisé à Saint Laurent-en-Caux entre le 01/09/1992 et le 30/06/1995. Le poste de Saint Laurent-en-Caux a également permis de compléter les données manquantes du poste de Bourville (32 jours sur 1 889 jours au total). Ces deux postes de relevé de la pluviométrie sont les plus proches du bassin versant de Bourville.

L'évolution du cumul des précipitations pour les 6 campagnes est reportée sur la Figure 14, qui affiche aussi le cumul des précipitations moyennes calculées sur 15 ans (1985-1999), pour le poste de Saint Laurent-en-Caux.

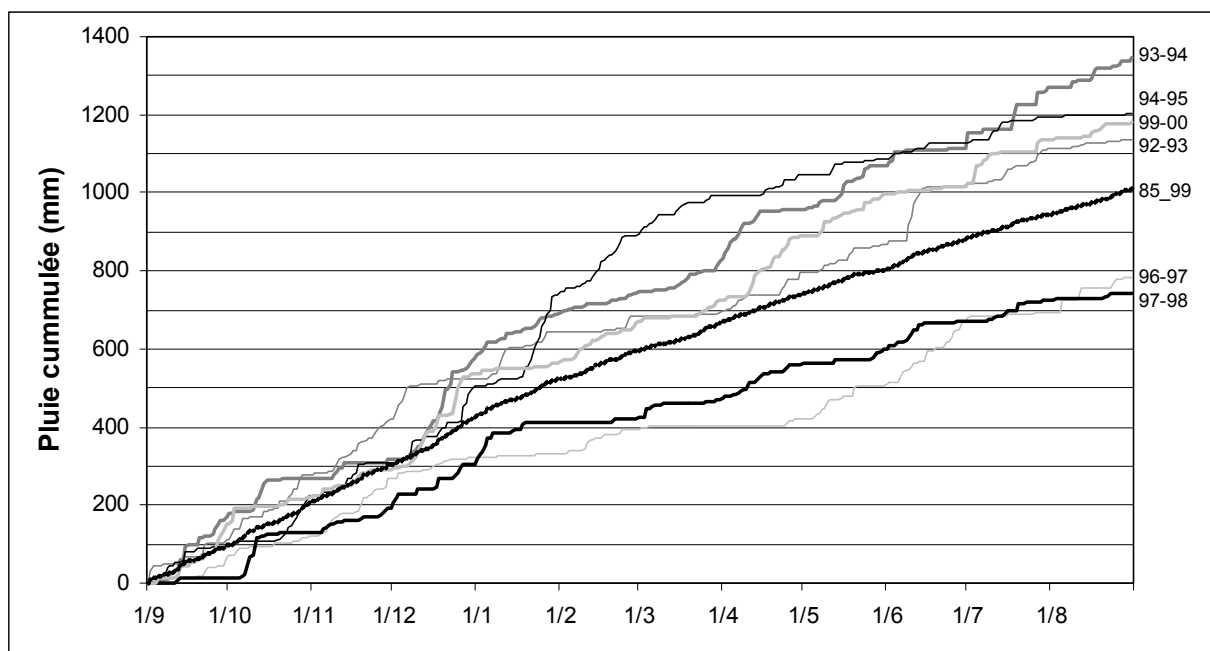


Figure 14 : Cumul des précipitations des 6 campagnes culturales analysées (en mm)

Nous distinguons nettement les campagnes culturales 96-97 et 97-98 qui totalisent chacune environ 750 mm de pluies. Pour les quatre autres campagnes, le cumul des précipitations est plus élevé, compris entre 1 130 mm et 1 350 mm. Ces deux types de cumul des précipitations se répartissent de part et d'autre de la moyenne, dont le cumul est de 1 009 mm. La répartition

des précipitations au cours des campagnes culturales est relativement similaire pour les deux campagnes les plus sèches. A l'inverse, nous constatons une hétérogénéité entre les quatre campagnes les plus pluvieuses. En particulier, entre le 15 janvier et le 1^{er} juin, la répartition journalière des précipitations peut être très variable. Ainsi, du 15 janvier au 31 mars, le total des précipitations est de 470 mm pour la campagne 94-95, et il n'est que de 150 mm au maximum pour les campagnes 99-00 et 92-93. Bien que la différence au 31 mars soit conséquente, 320 mm de précipitations cumulées en deux mois et demi, au 1^{er} juin l'écart se réduit nettement : 100 mm au maximum entre les trois campagnes. Entre les quatre campagnes les plus humides, l'hétérogénéité de la répartition des pluies est donc essentiellement la conséquence des précipitations en fin d'hiver et au printemps. Alors que la moyenne sur 15 ans affiche une régularité des précipitations, l'analyse des 6 campagnes culturales indique que la répartition intra-annuelle des pluies est très variable d'une année à l'autre. En conclusion, les 6 campagnes culturales pour lesquels nous disposons de relevés parcellaires présentent une diversité de conditions climatiques intéressante pour l'analyse des états de surface.

1.1.2.2 Principes d'analyse

L'état de surface créé étant une combinaison des trois paramètres facies, rugosité orientée et couvert végétal, nous les avons analysés conjointement. L'analyse a porté sur la variabilité des états de surface au cours de chacune des deux saisons culturales, toutes années climatiques confondues, et ceci pour chaque état des systèmes de culture identifié dans les relevés, qu'il s'agisse d'une culture ou d'une interculture. Dans la suite du document, nous parlerons d'occupation du sol.

Dans la plupart des cas, les dates des observations diffèrent d'un bassin versant à l'autre. Pour cette raison, nous avons regroupé les dates de relevés proches pour former des séries d'observations échelonnées sur les deux saisons culturales. Pour repérer les séries d'observations, nous avons utilisé les interruptions remarquables entre les dates des relevés. Nous nous sommes assurés que chaque série était représentée par un nombre minimum d'observations et que la durée séparant deux séries était supérieure à l'intervalle entre les dates de relevés les plus éloignées au sein de chacune des deux séries consécutives. Dans ces conditions, nous pouvons considérer que la variabilité temporelle au sein de chaque série est faible. Nous avons ainsi pu analyser la variabilité des états de surface au sein de chaque série d'observations, et l'évolution des états de surface au cours du temps, en comparant les différentes séries entre elles.

Signalons une limite de l'analyse menée, liée aux données utilisées : celles-ci ne permettent pas de suivre l'évolution des états de surface de chaque parcelle, d'une série à l'autre. Nous avons, en effet, constitué les séries d'observations en regroupant les relevés de différents bassins versants et, par conséquent, les différentes séries identifiées ne caractérisent pas un

même ensemble de parcelles. En conséquence nous ne sommes pas en mesure d'établir des trajectoires d'état précises mais uniquement une tendance globale d'évolution des états de surface au cours du temps.

Pour caractériser les états de surface, nous utilisons les notations des paramètres définies pour le modèle STREAM. Un état de surface de faciès F2 et de rugosité inférieure à 1 cm dont le taux de couvert végétal est de 10% est noté : F2-R0-C1 (cf. paragraphe 1.1.3.1, p. 50). Pour permettre la lecture à la fois des types de faciès et de l'infiltration qui en résulte, nous avons utilisé les classes d'infiltration définies pour le modèle STREAM ; nous rappelons ici que l'infiltration potentielle est déterminée par la combinaison des 3 paramètres faciès, rugosité et couvert végétal. Les graphes peuvent être lus de deux manières différentes : soit en considérant la couleur caractéristique de chaque état de surface, soit en considérant le ton de couleur adopté, qui indique l'infiltration potentielle associée. Le ton bleu correspond à une infiltration de 2 mm/h, le vert à 5 mm/h, le jaune/rouge à 10 mm/h et le rose à 20 mm/h. Les états de surface visualisés dans les tons de bleu sont donc les plus dégradés et ont la capacité d'infiltration la plus faible.

1.1.2.3 Variabilité au cours de la saison culturale 2 (15/11 – 15/02)

Pour la saison culturale hivernale, nous disposons de relevés parcellaires à 13 dates différentes, que nous avons regroupés en cinq séries d'observations (Tableau 11). Le nombre de parcelles dans chaque série est variable, compris entre 323 et 861. Une analyse rapide de l'ensemble des relevés a fait apparaître que la campagne culturale 1997-1998 présentait des états de surface beaucoup moins dégradés que les autres années. Pour cette raison, nous avons décidé de l'isoler et les relevés parcellaires effectués le 26/11/97 et le 19/02/98) ont été retirés de l'analyse globale. *Exit* de la série 5, celle-ci ne comprenant que les relevés en date du 19/02/98.

Les occupations du sol représentées à cette saison sont : les semis de blé, d'escourgeon et de colza, les chantiers de récolte non travaillés, les semis de cultures intermédiaires et les chantiers de récolte déchaumés. Nous détaillerons l'analyse pour les semis de blé et d'escourgeon. Pour les autres occupations du sol, nous nous limiterons à exposer les résultats, les détails figurant en annexe.

Tableau 11 : Définition des séries hivernales d'observations (Sh) – Saison 2					
	Sh1 : début novembre	Sh2 : Fin novembre – début décembre	Sh3 : fin décembre – début janvier	Sh4 : mi janvier	Sh5 : mi février
Blo_Fong	05/11/92 03/11/93	27/11/92 08/12/93	21/12/92	18/01/93 19/01/94	
Blosseville_1			05/01/95		
Le Hanouard		01/12/94	05/01/95		
Bourville		26/11/97		21/01/97	19/02/98
Nb parcelles	492	861	323	814	322

Nous présentons ici l'analyse pour les semis de blé et d'escourgeon. Le détail pour les autres occupations du sol est présenté en annexe 7.

Semis de blé et d'escourgeon (Figure 15)

Qu'il s'agisse de blé ou d'escourgeon, sur l'ensemble des 4 séries, l'état de surface le plus dégradé (F2-R0-C1) est toujours le plus représenté (entre 33% à 91% des cas). Si nous cumulons les deux états les plus dégradés (F2-R0-C1 et F2-R1-C1), nous couvrons alors au minimum 50% des états de surface. La proportion de ces états de surface est en constante augmentation de la série 1 à la série 4, représentant 50% à 75% des états dans les séries 1 et 2, et 85% à 100% dans les séries 3 et 4. La campagne culturale 1997-1998 se distingue par une répartition totalement différente, en particulier pour les semis de blé. Les états de surface les plus dégradés sont absents à la date du 27/11/97 et représentent à peine plus de 30% des états décrits le 19/02/98. Cette année-là se caractérise par des semis tardifs en raison de fortes précipitations début octobre (110 mm entre le 6 et le 20 octobre) dont les états de surface se sont peu dégradés sous l'action des pluies (hiver relativement sec après ces épisodes pluvieux).

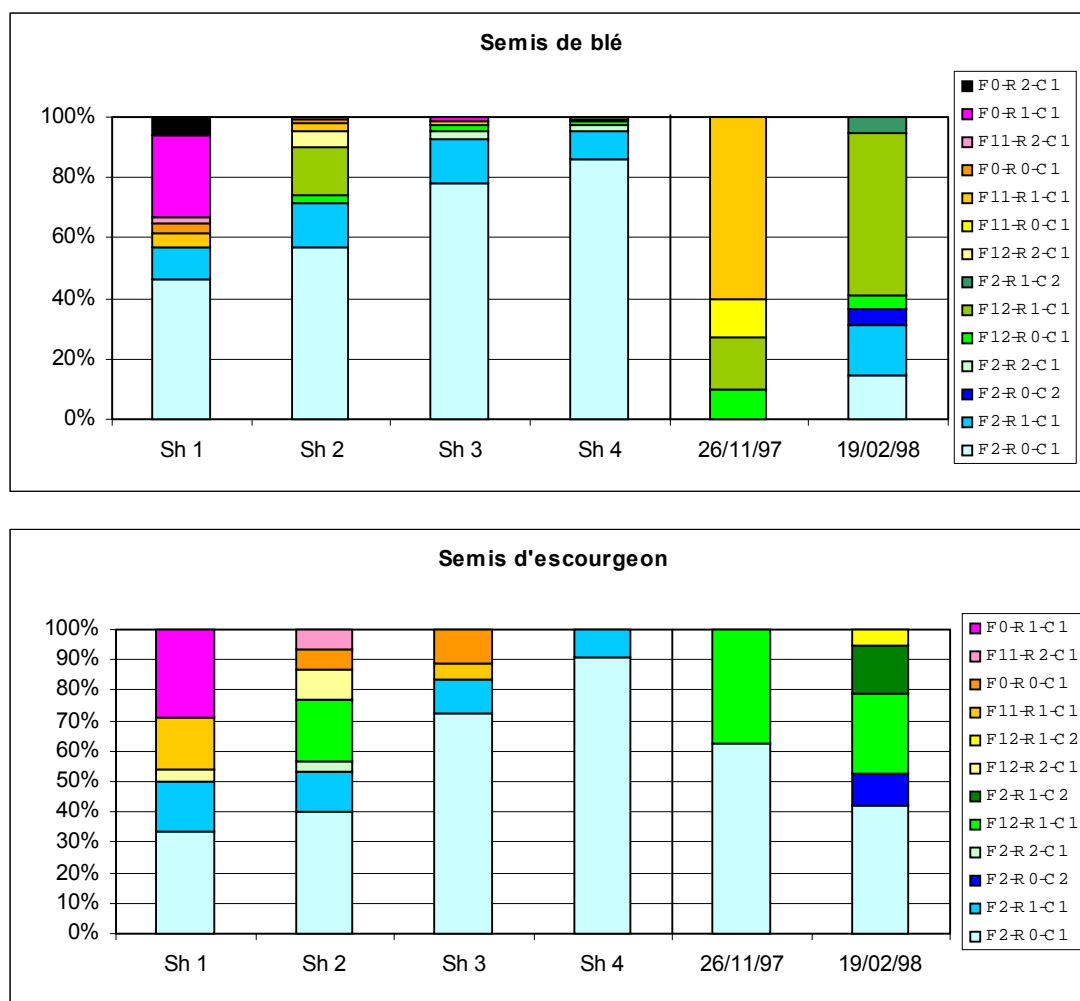


Figure 15 : Répartition des états de surface pour les céréales d'hiver – saison 2

En conclusion, nous observons une dégradation des états de surface de début novembre à mi-janvier et avec une variabilité au sein de chaque série qui s'atténue au fil du temps, les états les plus dégradés étant majoritaires. La saison 97-98 peut être considérée comme une exception vis-à-vis des 4 autres campagnes culturelles, résultant de conditions pluviométriques particulières.

Conclusion sur la variabilité au cours de la saison culturelle 2 (15/11-15/02)

Pour les occupations du sol étudiées, à savoir les semis de blé, d'escourgeon, de colza et les chantiers de récolte non travaillés (annexe 7), pour lesquelles nous disposons de suffisamment d'information, deux états de surface sont dominants : F2-R0-C1 et F2-R1-C1, tous deux correspondant à des états de surface très dégradés. A eux deux, ils représentent au moins 50% de l'ensemble des relevés, et même plus de 80% des relevés dans les séries 3 et 4. Dans l'ensemble, l'effet des conditions climatiques sur les états de surface est homogène vis-à-vis des différentes occupations du sol et on note une évolution rapide vers un état de surface dégradé.

1.1.2.4 Variabilité au cours de la saison culturelle 4 (01/05 – 15/07)

Nous disposons de 9 dates de relevés parcellaires pour la saison culturelle printanière et nous avons distingué 3 séries d'observations (Tableau 12). L'ensemble des relevés s'étale sur cinq campagnes culturelles.

Les occupations du sol pour lesquelles nous disposons de relevés sont : le blé, l'escourgeon, le colza, et les semis de lin, de pois, de betteraves sucrières, de maïs et les plantations de pomme de terre.

Tableau 12 : Définition des séries printanières d'observations (Sp) – Saison 2			
	Sp1 : début mai ¹²	Sp2 : mi mai	Sp3 : mi juin
Blo_Fong	Fin avril – début mai		
Blosseville_1	25/04/95	20/05/97 15/05/00	
Le Hanouard	30/04/95	07/05/97 15/05/98	
Bourville	29/04/97		20/06/97 16/06/98
Nb parcelles	645	154	644

L'analyse détaillée pour chaque occupation du sol est présentée en annexe 7. Les résultats montrent que pour les cultures d'hiver, l'état de surface des parcelles est homogène quelles que soient les cultures. Ceci est cohérent avec les observations de la saison 2 : les états de

¹² Cette série inclut principalement des relevés effectués fin avril, mais nous l'avons quand même considérée dans notre analyse car la majorité des parcelles en culture était semée lors des différents relevés.

surface dégradés par le climat en hiver ne sont modifiés par aucune intervention de travail du sol, et, seul le taux de couvert végétal, identique pour l'ensemble des cultures, est modifié. A l'inverse pour les cultures de printemps, aucune homogénéité entre cultures et aucune stabilité des états de surface pour une culture donnée n'apparaît entre les séries 1, 2 et 3. A cela, deux raisons principales :

- le régime pluviométrique au printemps est très différent d'une année à l'autre (cf. Figure 14, p.82), d'où une variabilité de la dégradation du faciès et de la rugosité qui évoluent sous l'effet des pluies,
- le développement du couvert végétal des cultures de printemps est important au printemps mais ce n'est pas pour autant qu'il limite totalement la dégradation des états de surface. Ce n'est que dans le cas d'un développement rapide (en lien avec la somme des températures) que le couvert protège efficacement la surface du sol.

1.1.3 Définition du domaine de validité du diagnostic

L'analyse de la variabilité des états de surface a montré qu'une fois les opérations culturales terminées, l'évolution des états était différente en hiver (saison 2) et au printemps (saison 4) :

- En hiver : le faible développement du couvert végétal et la régularité des précipitations entraînent une dégradation quasi-systématique des états de surface pour les semis de culture d'hiver et les chantiers de récolte non travaillés. Seule une campagne culturale se distingue par une dégradation moindre des états de surface pour les semis de cultures d'hiver, en raison de conditions pluviométriques particulières.
- Au printemps : le fort développement du couvert végétal des semis de cultures de printemps et la forte variabilité des précipitation ont pour conséquence une grande variabilité des états de surface du sol. A cela, s'ajoute une variabilité des itinéraires techniques (roulage et binage) que nous n'avons malheureusement pas pu analyser faute de données. Pour cette période, un certain nombre de facteurs peuvent donc limiter ou non la dégradation des états de surface.

Les périodes au cours desquelles les états de surface sont stables sous l'effet des systèmes de culture et du climat n'ont pas la même durée ni la même représentativité, en hiver et au printemps.

En hiver, si nous ne prenons pas en compte les chantiers de déchaumage et les semis de culture intermédiaire (nous verrons dans la partie suivante comment nous les traitons), nous pouvons définir une période de stabilité des états de surface : du 15 décembre jusqu'au 15 février. A partir de cette date, le couvert végétal des céréales se développe comme l'indique le relevé du 19/02/1998 et les préparations du sol pour les semis de pois et lin débutent. Pour le

diagnostic, nous pourrions réaliser une simulation, valable pour l'ensemble de cette période, soit environ 2 mois.

Au printemps, il n'est pas possible de définir une aussi longue période de stabilité des états de surface. Souhaitant nous limiter à une simulation, nous devons donc choisir une date au sein d'une période de relative stabilité des états de surface qui nous permette d'évaluer l'effet des modifications des systèmes de culture sur le ruissellement érosif au printemps. Parmi les 3 séries d'observations analysées au cours de la saison 4, c'est celle du 15 mai qui semble la mieux correspondre à nos attentes : à cette date, tous les semis ont été réalisés et on observe une diversité des états de surface. L'avantage de disposer d'une situation caractérisée par une diversité d'états de surface est qu'elle conduit à différents comportements vis-à-vis du ruissellement : et il sera possible d'étudier les conséquences de différentes répartitions spatiales de ces états. Nous n'avons pas retenu la série de fin avril car les plantations de pomme de terre et les semis de maïs ne sont pas toujours terminés. Quant à la série du 15 juin, bien que toutes les implantations soient terminées, elle affiche une grande homogénéité des états : les états F2-R0/R1-C3 représentent la majorité des états observés pour les semis des cultures d'hiver, de lin et de pois dans les relevés utilisés pour notre analyse. Si nous considérons cette série, la répartition des états de surface sera peu différente d'une situation à l'autre. En conclusion, une période centrée autour du 15 mai semble donc plus intéressante pour mettre en évidence l'effet de la répartition spatiale des cultures sur la production de ruissellement érosif. Le domaine de validité du diagnostic au printemps sera donc limité à une courte période comprise entre la fin des derniers semis, début mai, et la fin du mois de mai.

1.2 Choix des paramètres d'entrée du modèle STREAM

La partie précédente a permis de déterminer deux périodes de stabilité des états de surface, ainsi que les valeurs des trois paramètres les caractérisant, lorsque les données disponibles nous le permettaient. Nous allons maintenant transposer ces valeurs des paramètres d'état de surface en valeurs des paramètres d'entrée du modèle STREAM que nous utilisons pour le diagnostic. Ces paramètres se répartissent en trois catégories : l'infiltration potentielle, le sens d'écoulement et le réseau d'écoulement. Notre analyse ne nous a pas toujours permis de conclure sur les valeurs d'état de surface et le Tableau 13 ci-dessous résume la situation. Dans le cas où l'analyse est insuffisante, nous avons défini les valeurs des paramètres d'entrée en collaboration avec un expert local, Jean-François Ouvry de l'AREAS. Le choix de cet expert repose sur deux constats. Tout d'abord, il a une bonne connaissance des états de surface associés aux systèmes de culture du Pays de Caux, travaillant dans la région depuis 20 ans (Ouvry, 1987, Ouvry, 1989-90). D'autre part, il a été associé aux recherches de l'INRA dès le commencement, ce qui l'a conduit, en particulier, à utiliser les mêmes notations des paramètres d'état de surface.

Tableau 13 : Récapitulatif des états de surface du sol pour lesquels nous avons pu fixer les valeurs suite à notre analyse et de ceux nécessitant une expertise

	Période Hivernale	Période printanière
Blé	Analyse	Analyse
Colza	Analyse	Analyse
Escourgeon	Analyse	Analyse
Chantier de récolte	Analyse	<i>Non concerné</i>
Déchaumage	Analyse et Expertise	<i>Non concerné</i>
Culture intermédiaire	Analyse et Expertise	<i>Non concerné</i>
Betterave sucrière	<i>Non concerné</i>	Analyse
Gel	<i>Non concerné</i>	Analyse et Expertise
Lin	<i>Non concerné</i>	Analyse
Maïs	<i>Non concerné</i>	Analyse et Expertise
Pois	<i>Non concerné</i>	Analyse
Pomme de terre	<i>Non concerné</i>	Analyse et Expertise

1.2.1 L'infiltration potentielle

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'infiltration potentielle est déterminée à partir de la combinaison des 3 caractéristiques des états de surface : le faciès, la rugosité orientée et le taux de couvert végétal.

1.2.1.1 Valeurs d'infiltration potentielle résultant de l'analyse des états de surface

Période hivernale

Les occupations du sol pour lesquelles nous avons pu effectuer l'analyse des états de surface sont les cultures d'hiver (blé, colza et escourgeon) et les chantiers de récolte non travaillés. Dans tous les cas, les états de surface dominants (plus de 80%) sont F2-R0/R1-C1, les deux conduisant à une infiltration de 2 mm/h. C'est donc cette valeur d'infiltration potentielle que nous retenons pour ces occupations du sol.

Période printanière

Pour les cultures d'hiver, nous observons, pareillement à la période hivernale, une homogénéité des états de surface qui sont dans plus de 90% des cas F2-R0/R1-C3, ce qui correspond à 5 mm/h d'infiltration potentielle.

A l'inverse, pour les cultures de printemps analysées (pois, lin et betteraves sucrières), nous faisons face à une diversité des états de surface et des valeurs d'infiltration potentielle, même en nous restreignant à la période du 15 mai. Sur la Figure 16, les couleurs indiquent l'infiltration potentielle associée à l'état de surface : bleu pour 2 mm/h, vert pour 5 mm/h, jaune/rouge pour 10 mm/h et rose pour 20 mm/h.

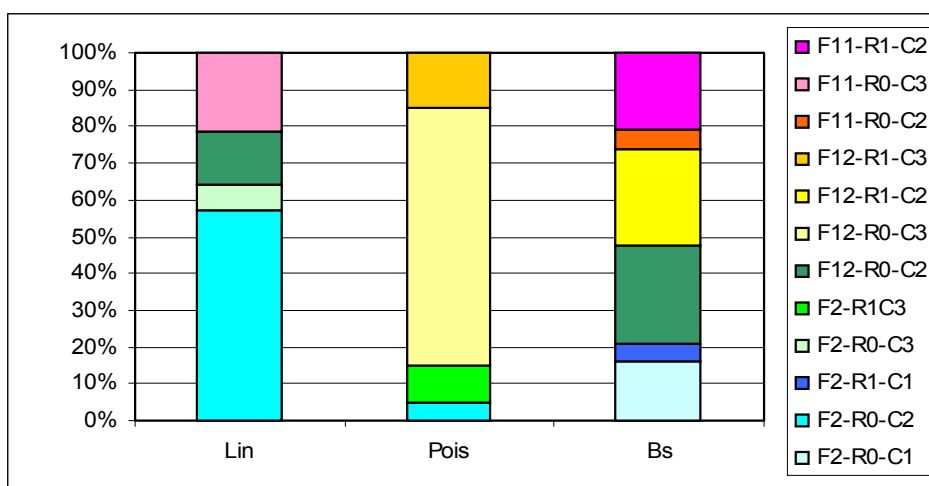


Figure 16 : Variabilité des états de surface des cultures de printemps au 15 mai

La figure montre que les infiltrations potentielles sont globalement plus faibles pour la culture du lin (2 et 5 mm/h en majorité) que pour la culture du pois (10 mm/h pour plus de 80%). Concernant la culture du pois, nous pouvons supposer une sous-estimation de l'état F2-R0-C2/C3 (infiltration de 2 ou 5 mm/h). En effet, pour la série de début mai (annexe 7.), l'état F2-R0-C1 est présent dans 30% des relevés et, à la dans la série d'observations de mi-juin, l'état F2-R0-C3 représente près de 50% des relevés. Il serait donc logique d'observer des états de surface F2-R0-C2 mi-mai dans des proportions semblables, ce qui correspondrait à un développement du couvert végétal du pois. Une explication possible est que les parcelles observées mi mai sont différentes, en partie, de celles observées aux autres périodes. Cette diversité peut aussi être le résultat à la fois du climat et du roulage ou non des semis mais les données disponibles ne nous permettent pas de distinguer les deux effets. Pour compléter notre analyse, nous avons donc eu recours à l'avis de l'expert local sus-cité. Après consultation, nous avons décidé d'affecter une infiltration de 2 et 5 mm/h respectivement au lin roulé et non roulé, et de 5 et 10 mm/h respectivement au pois roulé et non roulé. Ces valeurs reflètent la moindre dégradation des semis de pois par rapport au semis de lin en raison d'un lit de semence plus grossier. Précisons que, pour le choix des valeurs d'infiltration potentielle, nous nous sommes placés volontairement dans le cas de conditions climatiques favorables à une faible dégradation des états de surface ce qui permet d'obtenir une diversité des états de surface à la période du 15 mai. Nous nous situons hors de conditions climatiques orageuses pouvant conduire localement à une forte dégradation des états de surface, et, donc à une très faible infiltration.

Pour les semis de betteraves sucrières, il y a une répartition quasi-égale des relevés entre les 4 classes d'infiltration (2 à 20 mm/h). Le cas de l'infiltration potentielle égale à 2 mm/h résulte probablement de conditions de semis tardives et orageuses. En effet, l'état de surface est très dégradé et le couvert peu développé (C1), contrairement aux autres observations pour lesquelles le couvert végétal est noté C2 ou C3. Ayant choisi de ne considérer que des

conditions climatiques printanières non orageuses, nous n'en tiendrons pas compte. Pour les autres relevés, la répartition des valeurs d'infiltration potentielle est à relier à l'étalement des dates de semis. Pour les agriculteurs du bassin versant de Bourville, les dates optimales de semis des betteraves sucrières s'étendent, en effet, de début mars à début avril. Il est donc logique de penser que les états les plus dégradés correspondent aux semis les plus précoces et d'affecter l'infiltration 5 mm/h au semis de début mars, 10 mm/h pour les semis de mi-mars, 20 mm/h pour fin mars - début avril.

1.2.1.2 Valeurs d'infiltration potentielle résultant de l'expertise locale et d'expérimentations

Période hivernale

En période hivernale, les occupations du sol pour lesquelles nous ne pouvons établir une valeur d'infiltration potentielle sont les chantiers de déchaumage et les semis de cultures intermédiaires. Des expérimentations conduites entre 1993 et 1995 dans le Pays de Caux, sur des placettes de 20 m² au sein de parcelles d'agriculteurs ont permis de définir un classement relatif des différents itinéraires techniques sur la base du ruissellement cumulé, sur la durée de l'interculture (Martin, 1997). L'ordre des itinéraires techniques testés est, du moins ruisselant au plus ruisselant : culture intermédiaire de moutarde, déchaumage avec une déchaumeuse à socs, déchaumage avec un outil à dent réalisé précocement après la récolte, témoin non travaillé et déchaumage avec un outil à dents réalisé tardivement après la récolte. Cependant, ce classement ne nous permet pas de définir des classes d'infiltration, et il ne comprend pas l'ensemble des itinéraires techniques rencontrés : déchaumage avec outil à disques et semis de trèfle ou ray grass anglais (RGA). Nous avons donc fait appel à l'expert local afin de compléter l'éventail des itinéraires techniques et leur classement relatif. Nous avons affecté une valeur d'infiltration potentielle à chacun des itinéraires techniques en utilisant ce classement ainsi que les classes d'infiltration définies dans le modèle STREAM. Le tableau suivant (Tableau 14) regroupe l'ensemble des infiltrations potentielles choisies. A noter que les infiltrations relatives aux chantiers de déchaumage correspondent à celles de chantiers réalisés à la suite de récoltes dans de bonnes conditions d'humidité du sol (Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie, 1998b). Dans ces conditions de réalisation, nous pouvons considérer que les états de surface sont stables à partir du 15 décembre. Cependant, nous avons aussi introduit le cas d'un déchaumage à dent ou disque réalisé tardivement en condition humide (après le 30/09), en nous appuyant sur les résultats des expérimentations citées ci-dessus. Dans ces derniers cas, l'état de surface peut également être considéré comme stable puisqu'il correspond à l'état le plus dégradé.

Tableau 14 : Infiltration potentielle des chantiers de déchaumages et des semis de cultures intermédiaires – Période hivernale	
Itinéraire technique	Infiltration potentielle (mm/h)
Chantier récolte non travaillé	2
Déchaumage socs après céréales à paille	20
Déchaumage socs après autres cultures.	10
Déchaumage outils à dents ou disques précoce	5
Déchaumage outils à dents ou disques tardif	2
Semis de moutarde après pois / pomme de terre	5
Moutarde après autres cultures.	10
RGA semé début septembre	10
RGA semé fin septembre	5
Trèfle semé début septembre	5
Trèfle semé fin septembre	2

Période printanière

Concernant les plantations de pomme de terre et les semis de maïs, nous ne disposons d'aucune référence dans les conditions locales du Pays du Caux. Les valeurs d'infiltration potentielle retenues résultent donc uniquement d'une discussion avec l'expert consulté :

- pour la pomme de terre : à la période du 15 mai, l'état de surface peut être dégradé ou non selon que les pommes de terre ont été rebutées ou non. Cependant, même si l'état de surface est peu dégradé, le très fort affinement de la terre lors de la plantation entraîne une dégradation rapide. Par ailleurs, les billons formés ont tendance à concentrer le ruissellement et à diminuer la surface d'infiltration, ce qui n'est pas pris en compte par le module d'infiltration, basé uniquement sur les états de surface. Pour ces différentes raisons, nous avons décidé de retenir une infiltration potentielle équivalente à l'état de surface le plus dégradé (F2-R0-C1) soit 2 mm/h.
- pour le maïs : cette culture est semée fin avril – début mai, avec un affinement du lit de semence moindre que le lin et le pois. Au 15 mai, l'état de surface est donc peu dégradé. C'est pourquoi nous choisissons l'état F12-R1-C1 et donc 5 mm/h d'infiltration potentielle.

Concernant les surfaces en gel (RGA, trèfle ou moutarde pour l'essentiel), les semis ont lieu autour du 15 mai. Durant la période printanière qui s'étend du 1^{er} au 31 mai, les états de surface des semis de gel correspondent en moyenne à ceux de semis de 15 jours. Pour en déterminer les états de surface et l'infiltration potentielle, nous disposons des résultats d'une expérimentation conduite dans le Pays de Caux (Gallien *et al.*, 1995). Celle-ci consiste à comparer, entre autres, un semis de moutarde et un semis d'un mélange trèfle-RGA. Les résultats montrent qu'il existe une différence de vitesse de développement du couvert en faveur de la moutarde, mais dans les deux cas, le couvert est inférieur à 20% (C1) dans les 15 jours suivant le semis. Le suivi de l'évolution du faciès fait apparaître que, 15 jours après le

semis, la situation est transitoire entre une structure de lit de semence et une croûte structurale (F11). Aucun résultat n'est disponible pour la rugosité. L'état le plus probable est R0 car ce type de semis est généralement roulé. Au final, l'état de surface retenu pour des semis de surfaces en gel est F11-R0-C1, soit 10 mm/h d'infiltration potentielle.

1.2.1.3 Cas des prairies et autre couverts végétaux herbacés permanents

Nous regroupons sous l'appellation prairies, l'ensemble des prairies permanentes et temporaires, ainsi que les surfaces en gel fixe ou de longue durée. Peu de références existent pour ce type d'occupation du sol. On peut citer toutefois le travail de Trevisan (1984). Il s'agit de simulations de pluie sur des placettes de 1 m², dans les Pays de Loire, sur des sols limoneux drainés. Les intensités simulées sont très importantes, entre 45 et 80 mm/h et l'infiltration observée supérieure à 25 mm/h. Il nous est difficile d'extrapoler ces résultats étant donné les différences de sol et de précipitations entre les deux régions d'étude. Dans le Pays de Caux, l'infiltration de référence utilisée pour les prairies est 50 mm/h. Cependant, elle correspond à des prairies jamais pâturées (Gallien *et al.*, 1995). Après discussion avec l'expert, nous avons décidé de moduler cette infiltration (Tableau 15). Nous avons conservé la valeur mentionnée pour les prairies uniquement fauchées mais, pour les prairies pâturées, nous avons différencié l'hiver et le printemps. En hiver, nous avons réduit l'infiltration à 20 mm/h supposant que, suite au pâturage, les sols sont moins infiltrants. Des mesures de perméabilité à saturation, effectuées par le CEMAGREF dans le Pays de Caux, laissent penser que l'infiltration pourrait être encore plus faible dans des conditions de saturation du profil (Nedelec *et al.*, 1998). Ils ont ainsi obtenu des valeurs de l'ordre de quelques mm/h. Nous avons toutefois conservé la valeur de 50 mm/h au printemps en faisant l'hypothèse qu'en l'absence de pâturage hivernal, les prairies retrouvaient leur capacité d'infiltration initiale.

Tableau 15 : Infiltration potentielle des prairies	
Itinéraire technique	Infiltration potentielle (mm/h)
Prairie uniquement fauchée (hiver et printemps)	50
Prairie pâturée ou fauchée et pâturée (hiver)	20
Prairie pâturée ou fauchée et pâturée (printemps)	50

1.2.1.4 Limite d'une classification des valeurs d'infiltration potentielle en cinq classes

Nous avons récapitulé dans les deux tableaux suivants l'ensemble des valeurs d'infiltration potentielle (Tableau 16 et Tableau 17).

Occupation du sol / Itinéraire technique	Infiltration potentielle (mm/h)
Semis de blé, escourgeon et colza	2
Chantier récolte non travaillé	2
Déchaumage socs après céréales à paille	20
Déchaumage socs après autres cultures.	10
Déchaumage outils à dents ou disques	5
Semis de moutarde après pois / pomme de terre	5
Moutarde après autres cultures.	10
RGA semé début septembre	10
RGA semé fin septembre	5
Trèfle semé début septembre	5
Trèfle semé fin septembre	2
Prairie uniquement fauchée	50
Prairie pâturée ou fauchée et pâturée	20

Occupation du sol / Itinéraire technique	Infiltration potentielle (mm/h)
Semis de blé, escourgeon et colza	5
Semis de pois roulé	5
Semis de pois non roulé	10
Semis de lin roulé	2
Semis de lin non roulé	5
Semis de betteraves sucrières	5-10-20
Plantation de Pomme de terre	2
Semis de maïs	5
Semis gel RGA/trèfle/moutarde	10
Prairie	50

La principale limite de ces références réside dans le faible nombre de classes d'infiltration du logiciel STREAM. Cette dernière résulte d'une décision prise lors de la construction du modèle car les données d'expérimentation disponibles ne permettaient pas d'être plus précis dans la correspondance état de surface – infiltration. Bien qu'il soit possible de différencier assez finement les états de surface des différents chantiers, le modèle STREAM ne permet pas d'en rendre compte complètement. Nous pouvons illustrer ce propos à travers l'exemple des chantiers de déchaumage avec des outils à dents ou disques pour lesquels l'expert nous avait fourni en détail les états de surface (Tableau 18).

Bien que l'expert soit capable de décrire six états de surface différents d'une infiltration potentielle s'étalant entre 3 et 8 mm/h, la grille STREAM ne distingue que deux niveaux d'infiltration, 2 ou 5 mm/h, chacun regroupant trois états de surface différents. Le même problème se pose pour les chantiers de récolte. Les expérimentations citées précédemment (Martin, 1997) montrent qu'un chantier de récolte de pois ruisselle plus qu'un chantier de

récolte de blé. Il semble raisonnable de penser que l'infiltration d'un chantier de récolte de betteraves sucrières, compacté par les passages de roues en condition humide, infiltre moins qu'un chantier de récolte de céréales avec pailles broyées. Nous avons toutefois placé tous ces chantiers de récolte sur le même plan, avec une infiltration potentielle de 2 mm/h. Cette non différenciation est problématique, en particulier durant la période hivernale, car les pluies sont de faible intensité et une différence d'infiltration de 1 ou 2 mm/h peut avoir des répercussions sur le volume d'eau à l'exutoire du bassin versant.

Tableau 18 : Limite des classes d'infiltration du modèle STREAM*				
Période hivernale	Faciès	Rugosité orientée	Couvert végétal	Infiltration potentielle (mm/h)
Dec disques Céréales PE	F2	R0	C1	2
Dec dents pois/PDT	F2	R0	C1	2
Dec disques Colza	F2	R0	C2	2
Dec dents Céréales PE	F2	R1	C1	2
Dec dents précoce BS/Lin/Maïs	F2	R1	C1	2
Dec dents Céréales PB	F2	R2	C2	5
Dec dents Colza	F2	R1	C2	5
Dec disques Céréales PB	F2	R1	C2	5
Dec dents tardif BS/Lin/Maïs	F2	R2	C1	5

* Chaque couleur correspond à un même état de surface identifié par l'expert
 « Dec » : déchaumage / « PE » : pailles exportées / « PB » : pailles broyées

Cette analyse montre qu'il est nécessaire d'avoir une caractérisation plus fine de l'effet des techniques culturales sur l'érosion et le ruissellement à l'échelle parcellaire. Ceci est particulièrement vrai pour les techniques de déchaumage et les opérations de semis. Le réseau d'expérimentations mis en place dans le pays de Caux se situe tout à fait dans cette optique (Martin *et al.*, 2002). Les résultats pourront à terme fournir des indications pour aider à choisir entre les différentes techniques culturales et également préciser les classes d'infiltration du modèle STREAM.

1.2.2 Le sens d'écoulement

Le modèle STREAM détermine le sens d'écoulement de l'eau dans les parcelles agricoles en fonction de l'intensité de la pente, du sens du travail du sol, de l'angle entre la direction du travail du sol et la direction de la plus grande pente, de la rugosité orientée et de la rugosité perpendiculaire au sens du travail du sol. Lorsque la différence entre la rugosité perpendiculaire et celle parallèle au sens du travail du sol est strictement supérieure à 2 classes alors le sens d'écoulement suit le sens de travail du sol. Sinon, le sens d'écoulement dépend de l'angle entre la direction du travail du sol et la direction de la pente de la parcelle, et de l'intensité de la pente (Souchère *et al.*, 1998). L'analyse de la différence entre les deux rugosités sur l'ensemble des relevés disponibles montre que :

- hormis dans le cas des chantiers de déchaumage et des plantations de pomme de terre, la rugosité perpendiculaire au sens du travail du sol est inférieure ou égale à R2, et donc la différence entre les deux rugosités est inférieure ou égale à 2 ;
- pour les chantiers de déchaumage, dans la majorité des cas, si la rugosité perpendiculaire est supérieure à R2, alors la rugosité orientée est elle-même importante ; dans ce cas également, la différence entre les deux rugosités est rarement supérieure à 2 ;
- à l'inverse, les plantations de pomme de terre au printemps présentent une rugosité perpendiculaire égale à R4 ou R5, pour une rugosité orientée comprise entre R0 et R2. La différence est donc souvent supérieure à 2.

En conséquence, le seul cas pour lequel le sens d'écoulement est imposé systématiquement par celui du travail du sol en raison d'une forte rugosité perpendiculaire, est le cas des plantations de pomme de terre. Dans tous les autres, le sens d'écoulement dépend de l'angle entre le sens de travail du sol et l'orientation de la plus grande pente de la parcelle, paramètres indépendants des systèmes de culture.

1.2.3 Le réseau d'écoulement

1.2.3.1 Objectif et dispositif d'analyse

Potentiellement, la version actuelle de STREAM permet de générer le réseau d'écoulement propre à chaque agencement spatial des cultures et des motifs agraires associés dans le bassin versant. Toutefois, afin de simplifier le diagnostic environnemental, nous avons choisi de travailler avec un réseau d'écoulement fixe. Ceci nous permet de limiter considérablement la durée d'une simulation. Cette simplification nous semble possible dans la mesure où les modifications que nous testerons ne concerneront que les systèmes de culture et leur organisation spatiale, mais ni les aménagements ni la structure du parcellaire. Par ailleurs, nous avons préféré ne prendre en compte que les dérayures fixes. En effet, il nous semble difficile de prévoir si une dérayure va être conservée ou non après le labour : l'agriculteur peut l'effacer lors de la préparation du lit de semence ou bien lors du labour de la parcelle voisine. Aussi, tous les éléments linéaires d'orientation du réseau d'écoulement intégrés dans le modèle STREAM et l'orientation du travail du sol dans les parcelles ne sont pas modifiés. Dans ces conditions, nous faisons l'hypothèse que le réseau d'écoulement est relativement stable. Nous entendons par là que :

- les différences entre les réseaux d'écoulement principaux, c'est-à-dire drainant au moins une superficie de 5 ha, sont faibles et ne sont dues principalement qu'à une différence du réseau à l'intérieur de parcelles individuelles ; la connexion hydraulique entre parcelles reste, elle, inchangée.

- les surfaces drainées en différents points de concentration du ruissellement, sont peu modifiées quels que soient les systèmes de culture mis en place.

Afin de tester cette stabilité du réseau d'écoulement, sous hypothèse de simple modification de systèmes de culture, nous avons réalisé deux simulations avec le modèle STREAM ArcInfo qui permet de calculer le réseau d'écoulement en fonction de la topographie, du sens du travail du sol, des motifs agraires (dérayures, fourrières) et des motifs linéaires permanents (fossés, chemins, routes). En ne changeant que les systèmes de culture, le réseau d'écoulement est modifié seulement en raison des modifications de la rugosité perpendiculaire au sens de travail du sol. Les deux configurations testées correspondent donc à des situations extrêmes en terme de rugosité et de conséquence sur la concentration du ruissellement :

- pour l'une, la différence de classe entre les deux rugosités (dans le sens et perpendiculairement au sens de travail) est nulle : dans ce cas le sens d'écoulement est déterminé par la fonction discriminante du modèle, et sera donc soit la direction de la plus grande pente, soit la direction du travail du sol. Nous appellerons ce réseau « réseau TP » (Travail-Pente)
- pour l'autre, la différence de classe entre la rugosité perpendiculaire et la rugosité dans le sens du travail du sol est supérieure à 2 : dans ce cas, l'écoulement suit toujours la direction du travail du sol. Cependant, ce type de rugosité ne correspond qu'au cas des plantations de pomme de terre. Puisque nous ne remettons pas en cause les systèmes de production et donc le choix des cultures, il paraît judicieux de limiter la modification de la rugosité, par rapport à la configuration précédente, uniquement aux parcelles où peut être implantée une culture de pomme de terre. Il s'agit des parcelles exploitées par des producteurs de pomme de terre et des parcelles en sous-location pour cette culture. Nous avons inclus également les parcelles des agriculteurs envisageant de modifier leur système de production en développant la culture de pomme de terre. Au total, l'ensemble de ces parcelles représente 369,5 ha, soit 45,5 % des terres labourables du bassin versant et 34 % de la superficie totale. Ce réseau sera nommé « réseau PDT » (Pomme De Terre).

La comparaison des réseaux issus de ces deux simulations permettra de vérifier si notre hypothèse est correcte, pour le cas du bassin versant de Bourville et avec les systèmes de culture actuels. Nous pourrions ainsi choisir un réseau d'écoulement pour la réalisation du diagnostic.

1.2.3.2 Comparaison des réseaux d'écoulement obtenus par simulation

Sur la Figure 17, nous avons superposé les réseaux d'écoulement topographique (Topo) et TP d'une part, les réseaux TP et PDT d'autre part. Il s'agit des réseaux d'écoulement principaux :

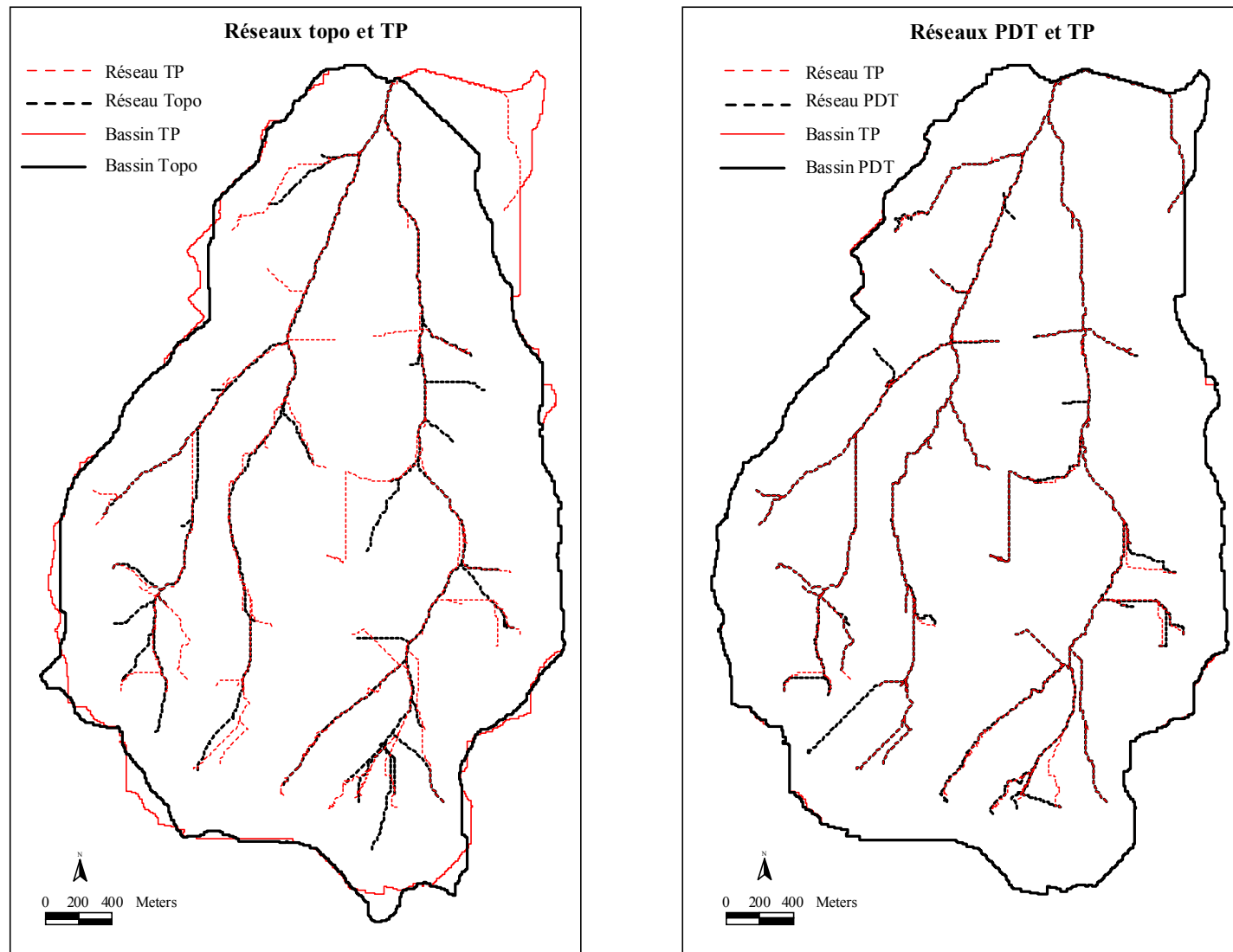


Figure 17 : Comparaison des réseaux d'écoulement principaux des configurations Topo, TP et PDT

chaque point du réseau draine au minimum 5 ha. Sur les cartes produites, figurent aussi les limites des bassins versants correspondant à chaque réseau d'écoulement. Sur la carte située à gauche de la figure, nous remarquons de nombreuses différences entre les réseaux topographique et TP. La prise en compte du travail du sol et des éléments linéaires dans le calcul du réseau d'écoulement génère des axes de concentration supplémentaires, modifie la localisation de certains axes et en fait disparaître d'autres. De surcroît, les limites du bassin versant ne sont similaires. En particulier, une zone d'une quarantaine d'hectares, située au nord-est du bassin, est incluse dans le bassin versant TP mais ne l'est pas dans le bassin versant topographique : cette zone est drainée par un chemin et une route qui rejoignent l'exutoire du bassin versant en franchissant la limite topographique. Au total, la superficie du bassin TP est supérieure de 49,7 ha à celle du bassin topographique, soit une augmentation de la surface de 4,6%. Une comparaison avec le réseau d'écoulement obtenu par Pivain et Faucon (1995) à partir d'observations de terrain montre que c'est le réseau TP qui correspond le mieux à la réalité. En particulier, la zone située au nord-est du bassin versant est réellement incluse dans le bassin. Prendre en compte le travail du sol et les éléments linéaires apparaît donc nécessaire dans ce bassin versant. Si nous comparons maintenant les réseaux TP et PDT (carte de droite), nous constatons que ces derniers sont assez semblables. Une dizaine de différences ne concerne que des modifications mineures : dans les deux réseaux, les axes de concentration sont présents, mais leur localisation diffère légèrement au sein des parcelles. La présence de pomme de terre dans le bassin versant n'engendre que cinq axes de concentration supplémentaires : compte-tenu de la configuration parcellaire de ce bassin versant, lorsque le sens de travail du sol impose le sens d'écoulement, le ruissellement a tendance à se concentrer plus en amont.

Nous avons par la suite comparé les surfaces drainées en différents points des deux réseaux. Pour ce faire, nous avons choisi des points communs aux deux réseaux correspondant soit à des raccordements de différents axes de concentration, soit à des points marquants du bassin versant (essentiellement à des intersections entre les routes et le réseau principal d'écoulement, là où se produisent régulièrement des dépôts de sédiments). Ces points permettent de délimiter des sous bassins versants. Au total, 22 sous bassins versants ont été individualisés (annexe 8). Nous avons comparé les surfaces des sous bassins versants correspondant aux réseaux TP et PDT, en prenant comme référence le réseau TP pour évaluer les variations de surface (Figure 18). La superficie totale du bassin versant est identique dans les deux cas, 1 086 ha, ainsi que celle des deux grands sous bassins versants, Gonzeville (SBV1) et Canville (SBV2), dont les surfaces sont respectivement 509,5 ha et 516,5 ha. Pour les autres sous bassins versants, les disparités vont de +2 ha à -5,5 ha. En pourcentage, la différence n'excède +/- 3% qu'une seule fois. Enfin, huit sous bassins versants sont rigoureusement identiques. Globalement, la différence de superficie est donc faible. Sur la Figure 19, nous avons indiqué les zones susceptibles d'être affectées à des sous bassins versants différents en fonction du réseau d'écoulement choisi. Nous voyons ainsi que seulement sept zones sont concernées, deux d'une superficie supérieure à 5 ha, et les autres

d'une surface comprise entre 0,5 et 1,5 ha. Une parcelle n'est jamais affectée par un changement dans son intégralité. Au total, l'ensemble de ces zones représente 18 ha, soit seulement 1,7% de la superficie totale du bassin versant.

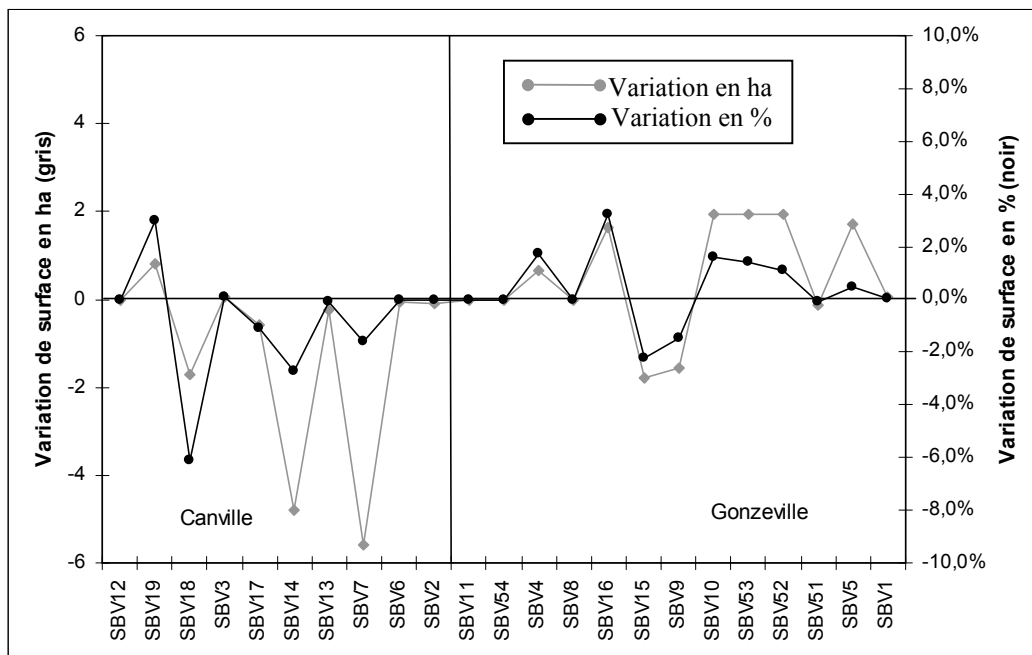


Figure 18 : Comparaison des superficies des sous bassins versants

En conclusion, les simulations des réseaux d'écoulement correspondant aux configurations TP et PDT nous ont permis de vérifier nos deux hypothèses de départ. D'une part, augmenter fortement la rugosité perpendiculaire au sens du travail du sol dans certaines parcelles, modifie faiblement le réseau d'écoulement principal et l'écoulement de l'eau d'une parcelle à l'autre n'est pas remis en cause. D'autre part, les surfaces drainées en des points communs aux deux réseaux sont peu différentes. Le choix de conserver le seul réseau d'écoulement TP pour l'ensemble des simulations semble donc pertinent.



Figure 19 : Zonages des portions de territoires affectées à différents sous bassins versant en fonction du réseau d'écoulement choisi

2 Effet des états de surface sur le ruissellement érosif : interaction avec le type d'événement pluvieux

Après avoir caractérisé les états de surface créés par les systèmes de culture aux deux périodes au cours desquelles le risque associé au ruissellement érosif est le plus important, nous analysons maintenant l'effet de ces états sur le ruissellement érosif, en interaction avec le type d'événement pluvieux. En effet, l'intensité moyenne des événements pluvieux est variable, en raison de leur durée mais aussi du cumul des pluies, ce qui peut avoir des conséquences sur le ruissellement. Nous nous proposons d'étudier la diversité des événements pluvieux en menant une première analyse à l'échelle parcellaire, pour les saisons culturales 2 et 4. Pour cela nous utilisons une base de données des événements pluvieux de 10 campagnes culturales (01/09/92 au 31/08/02). Dans une seconde analyse nous étudions l'effet de différentes configurations d'occupation du sol sur le ruissellement à l'exutoire du bassin versant au moyen de simulations avec le modèle STREAM. Celui-ci fonctionnant au pas de temps de l'événement pluvieux, nous ne pouvons pas faire des simulations pour tous les événements pluvieux : elles prendraient un temps considérable. C'est pourquoi nous avons décidé de sélectionner seulement deux événements pluvieux caractéristiques.

2.1 Base de donnée des événements pluvieux

Avant de présenter les résultats des analyses conduites à l'échelle de la parcelle et du bassin versant, nous détaillons dans cette partie la constitution de la base de donnée des événements pluvieux, ainsi que ses caractéristiques. Les événements pluvieux utilisés par le modèle STREAM sont définis par la pluie cumulée de l'événement, les précipitations des dernières 48 heures et la durée efficace de l'événement. Les données disponibles sur le site d'étude pour l'analyse ne couvrent que trois campagnes culturales, d'octobre 1995 à septembre 1998 (Lecomte, 1999), dont deux particulièrement sèches pour la région (cf. paragraphe 1.1.2, p. 80). Ce constat nous a conduit à calculer des événements pluvieux sur une plus longue série climatique, afin d'avoir une base de données représentative de la diversité des campagnes culturales en terme de pluviométrie.

2.1.1 Calcul des événements pluvieux

Pour établir la série climatique, nous avons combiné les données de trois pluviomètres fonctionnant avec un dispositif d'augets de 1 ou 2 mm, et dont les basculements successifs sont enregistrés en continu : l'un situé à Bourville même (01/07/95 au 31/08/02), et les deux autres à Blossville (01/09/92 au 31/12/94 et du 01/01/95 au 30/06/95). Au total, nous disposons de données pluviométriques sur 10 campagnes culturales, entre le 01/09/92 et le 31/08/02. Nous avons, tout d'abord, individualisé chaque événement, en prenant comme

intervalle minimum le temps de concentration du ruissellement, c'est à dire le temps nécessaire au ruissellement pour atteindre l'exutoire du bassin versant depuis le point le plus à l'amont. Pour le bassin versant de Bourville, le temps de concentration du ruissellement est de 5 heures (Lecomte, 1999). Ensuite, nous avons déterminé la durée efficace (DE) de chaque événement pluvieux identifié. Celle-ci se calcule en retranchant à la durée réelle (DR) de l'événement, les phases de l'événement pluvieux durant lesquelles l'intensité instantanée (I_i) des pluies est faible. Les règles de décision pour le calcul font intervenir l'intensité moyenne (I_m) de l'événement (Cerdan, 1997) :

- Si $I_m \leq 2,5$ mm/h alors $DE=DR$;
- Si $1,5 \leq I_m < 2,5$ alors $DE=DR$ - temps durant lequel $I_i < 1$ mm/h ;
- Si $1 \leq I_m < 1,5$ alors $DE=DR$ - temps durant lequel $I_i < 2$ mm/h ;
- Si $I_m < 1$ alors $DE=DR$ - temps durant lequel $I_i < 2$ mm/h - 10 minutes pour chaque arrêt de plus d'une heure.

Une feuille Excel a été élaborée pour automatiser le calcul. Notons un de ses atouts : elle est utilisable pour d'autres bassins versants car elle permet de faire varier le laps de temps entre deux événements pluvieux.

Au total, nous aboutissons à 457 événements pluvieux, dont la durée efficace est non nulle¹³, pendant les saisons culturales 2 et 4 pour lesquelles nous allons effectuer le diagnostic. Ils se répartissent de la façon suivante : 251 événements entre le 15/11 et le 15/02 (saison 2), et 206 entre le 01/05 et le 15/07 (saison 4).

2.1.2 Caractéristiques des événements pluvieux

Les résultats sont présentés sur la (Figure 20). Une première analyse de la durée réelle des événements pluvieux et de leur intensité moyenne montre que les événements hivernaux sont plus longs et moins intenses que les événements printaniers. En effet, la courbe de fréquence cumulée de la durée réelle des événements hivernaux est toujours inférieure à celle des événements printaniers ; pour l'intensité moyenne, nous constatons l'inverse. L'événement pluvieux médian est plus long de 2h 20min en hiver qu'au printemps (+69%), et l'événement du quatrième quintile est plus long de 7h 24min (+83%). Concernant l'intensité moyenne, la différence est de 0,47 mm/h pour les événements médians (+41%), et de 1,17 mm/h pour le quatrième quintile (+57%). La différence entre les événements pluvieux est donc plus marquée pour la durée des événements que pour leur intensité moyenne.

¹³ Les événements pluvieux dont la durée efficace est nulle sont en grande majorité des événements de très faible intensité (moins de 0,5 mm/h), et donc non ruisselants, l'infiltration minimale étant de 2 mm/h.

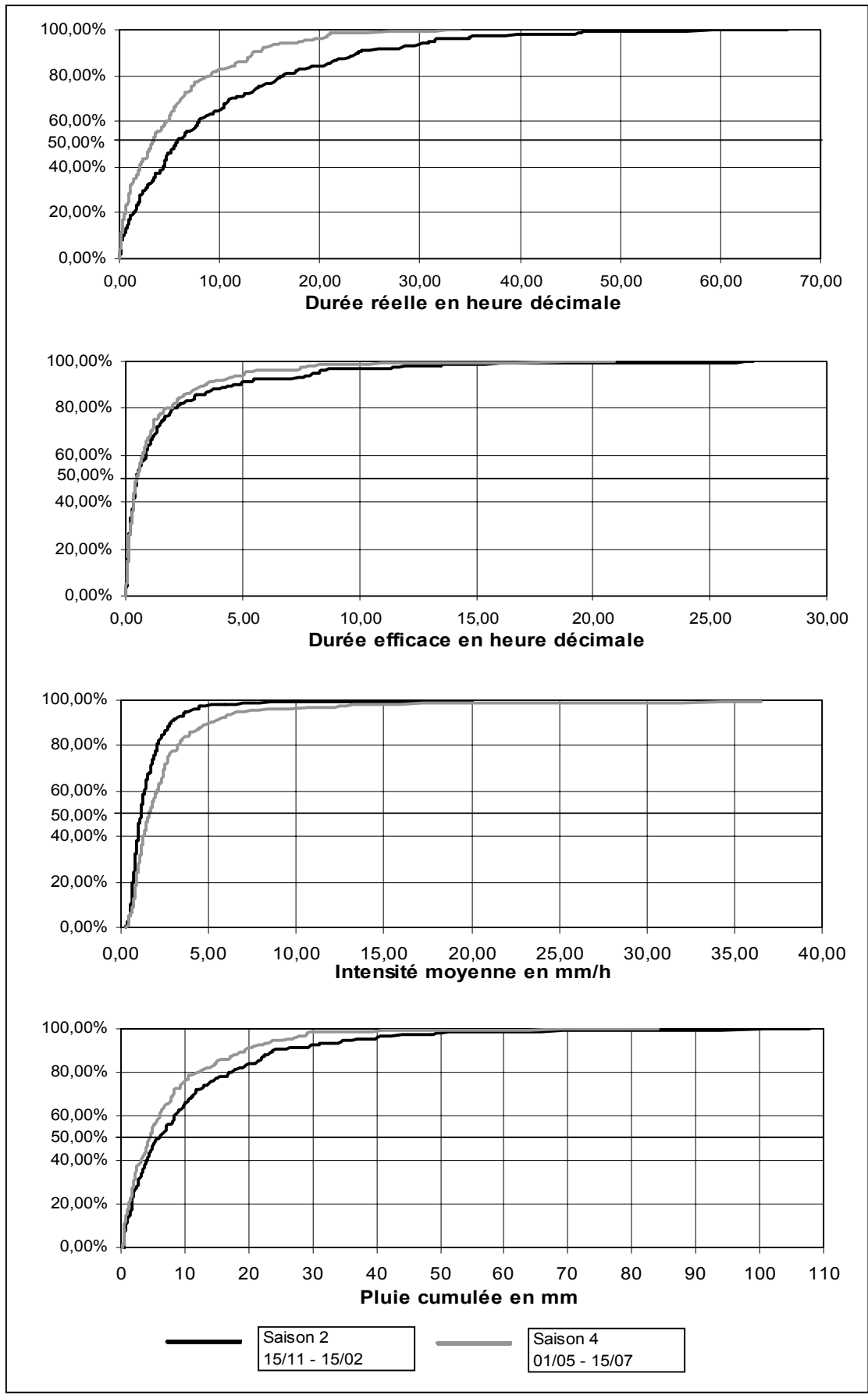


Figure 20 : Fréquence cumulée des caractéristiques des événements pluvieux

Nous observons, par ailleurs, que le cumul des pluies par événement pluvieux est plus important pour les événements hivernaux. Pour les événements médians, le total des précipitations est supérieur de 1,2 mm en hiver par rapport au printemps (+26%), et, pour les événements du quatrième quintile, la différence est de 4,8 mm (+39%). L'écart est cependant beaucoup moins important que pour les deux paramètres précédents. Enfin, concernant la durée efficace, la différence entre l'hiver et le printemps est quasi nulle : 1min12sec pour l'évènement médian (+4%) et 6min34sec pour le quatrième quintile (+6%).

En conclusion, l'analyse des événements pluvieux met en évidence une disparité entre les événements hivernaux et les printaniers sur la base de la durée réelle et de l'intensité moyenne. Cependant, le modèle STREAM n'utilise pas ces paramètres, mais la durée efficace et le cumul des pluies. Pour ces deux paramètres, le contraste entre l'hiver et le printemps n'est pas aussi marqué, voire inexistant pour la durée efficace. Il nous semble donc pertinent de ne plus différencier les deux types d'événements pluvieux pour la suite de l'analyse.

2.2 Effet des états de surface sur le ruissellement à l'échelle parcellaire

A l'échelle parcellaire, notre objectif est de tester l'effet des états de surface sur le ruissellement érosif en lien avec les types d'événements pluvieux, sur l'ensemble des 457 événements pluvieux identifiés précédemment. A partir des résultats obtenus, nous sélectionnerons quelques événements pluvieux caractéristiques pour poursuivre l'analyse à l'échelle du bassin versant.

Nous pouvons évaluer l'effet des états de surface sur le ruissellement érosif par le module de calcul de la lame d'eau potentiellement infiltrée du modèle STREAM. Ce module effectue un bilan de ruissellement / infiltration (RI, cf. paragraphe 1.1.3.2, p. 51), de la manière suivante :

$$RI = \text{Pluie cumulée} - \text{Pluie d'imbibition} - (\text{infiltration potentielle} * \text{durée efficace})$$

La pluie d'imbibition dépend de l'infiltration potentielle et des précipitations cumulées des 48 heures précédant l'événement pluvieux considéré.

Nous avons réalisé ce bilan pour les 457 événements pluvieux retenus précédemment. Pour chacun d'eux, nous avons calculé 5 bilans différents correspondant aux 5 niveaux d'infiltration potentielle du modèle STREAM, à savoir 2, 5, 10, 20 et 50 mm/h. Au total, cela représente 2 285 bilans de ruissellement.

Sur la Figure 21 ci-dessous, nous avons reporté, pour l'ensemble des événements pluvieux, les bilans de ruissellement établis avec une valeur d'infiltration potentielle de 2mm/h (RI_2 mm) et de 5 mm/h (RI_5 mm), en les ordonnant selon la valeur croissante du RI_2 mm. Sur cette figure, les événements pluvieux peuvent être classés en trois catégories. Tout d'abord, pour 154 événements (catégorie 1), les deux bilans de ruissellement sont nuls. La deuxième

catégorie regroupe les événements pluvieux dont le RI_2mm est non nul et inférieur à 5 mm, et ceux dont le RI_5mm est nul ou systématiquement inférieur à 1 mm. Cette catégorie comprend 158 événements pluvieux. Enfin, la dernière catégorie rassemble les 145 événements restants (catégorie 3) pour lesquels le RI_2mm est supérieur à 5 mm. Le RI_5mm de ces derniers événements est variable, pouvant être nul ou à l'inverse avoisinant la valeur du RI_2mm. La catégorie 3 montre clairement qu'une modification de l'infiltration potentielle a un effet variable en fonction de l'événement pluvieux. Deux explications peuvent être avancées. Premièrement, la pluie d'imbibition dépend de la pluie des dernières 48 heures, mais aussi de l'infiltration potentielle : pour un même événement, plus l'infiltration potentielle est élevée, plus la pluie d'imbibition est importante. Deuxièmement, l'augmentation de l'infiltration potentielle réduit d'autant plus le bilan de ruissellement que l'événement est long.

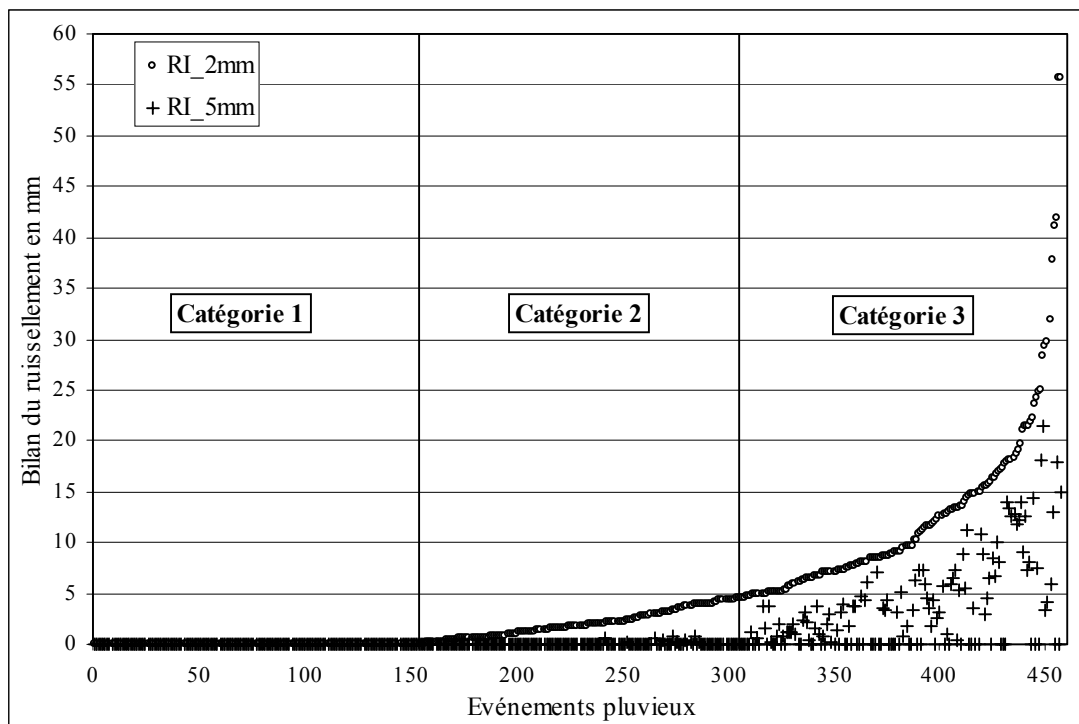


Figure 21 : Bilan de ruissellement / infiltration à 2 et 5 mm/h d'infiltration potentielle

L'effet d'une modification des états de surface dépend donc du type d'événement pluvieux. La réduction de ruissellement obtenue par augmentation de l'infiltration potentielle est d'autant plus faible que l'événement pluvieux est intense. Un événement est plus intense qu'un autre, soit parce qu'il est plus court pour le même cumul de pluies, soit parce que son cumul des pluies est plus élevé pour la même durée. L'intensité des événements pluvieux influant sur la réduction du ruissellement à l'échelle parcellaire, il nous semble judicieux de choisir deux événements pluvieux caractérisés par des niveaux d'intensité différents pour poursuivre l'analyse à l'échelle du bassin versant.

Le premier événement pluvieux sélectionné permet de mettre en évidence une modification des niveaux d'infiltration potentielle associés aux systèmes de culture, soit une variation de 2 à 20 mm/h. Pour cette analyse, nous avons procédé de la façon suivante :

- Nous avons rejeté les événements pluvieux non ruisselants lorsque l'infiltration potentielle était équivalente à 2 mm/h et 5 mm/h, ce qui limite le choix à 106 événements pluvieux. En effet, ces événements ne permettraient pas de mettre en évidence différents niveaux de changement de système de culture.
- Pour les 106 événements conservés, nous avons calculé, via le bilan RI, la réduction du ruissellement résultant d'une augmentation de l'infiltration potentielle de 2 à 5mm/h, de 2 à 10 mm/h et de 2 à 20mm/h. Les résultats obtenus ont été reportés sur la figure ci-dessous (Figure 22), à l'exception de ceux correspondant au passage de l'infiltration de 2 à 20 mm/h car le bilan RI avec une infiltration de 20 mm/h est toujours nul.
- Sur la base de ces résultats, nous avons choisi un événement pluvieux pour lequel une augmentation de l'infiltration potentielle de 2 à 5 mm/h permet de réduire le ruissellement de 50%, et une augmentation de 2 à 10 mm/h, de 100%. Ceci permettra de montrer l'effet des différentes modifications des systèmes de culture.
- Plusieurs événements pluvieux correspondent à ce choix (encadré sur la figure) mais il nous est paru intéressant de choisir celui dont le bilan 2 mm/h est le plus important. Cela permettra de tester l'effet des systèmes de culture avec un événement pluvieux très ruisselant. L'événement retenu est celui du 31 décembre 1993 : 22 mm en 2h19min (durée efficace) avec 37,2 mm de pluies antécédentes (intensité efficace moyenne : 9,50 mm/h).

Le deuxième événement pluvieux choisi est caractérisé par une intensité plus faible. Il s'agit de l'événement du 30 décembre 1993 : 29,6 mm en 4h58min (durée efficace) avec 9,2 mm de pluies antécédentes (intensité efficace moyenne : 5,95 mm/h). Il présente à peu près le même niveau de pluie cumulée que le premier événement pluvieux sélectionné, mais est environ deux fois moins intense.

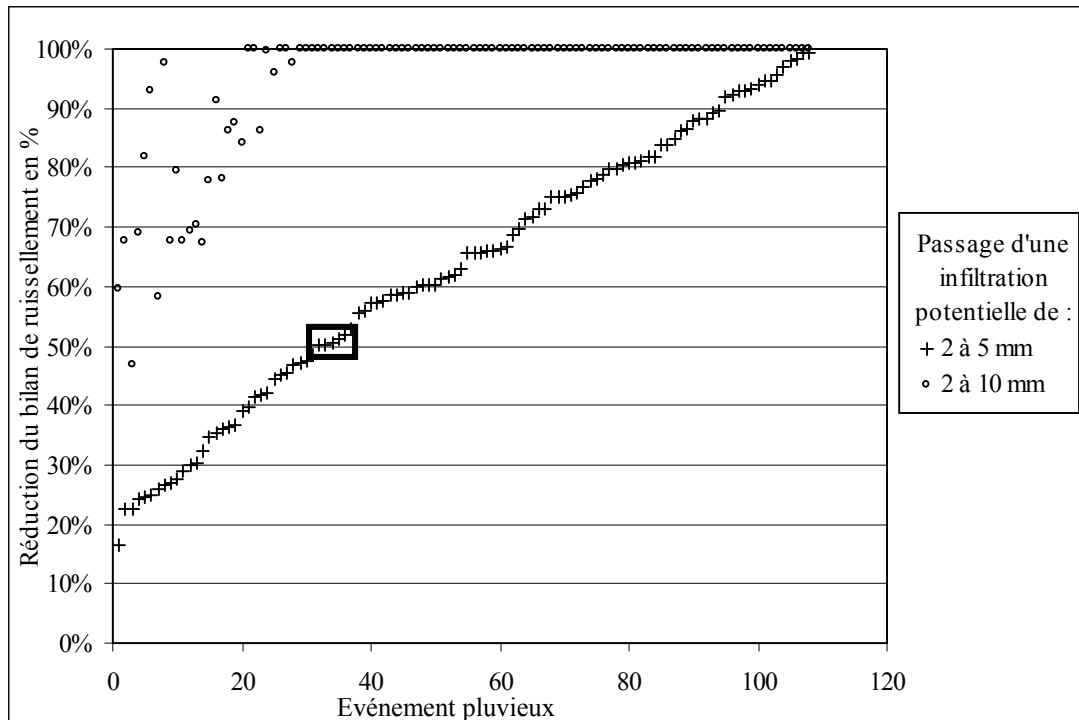


Figure 22 : Réduction du bilan de ruissellement par une augmentation de l'infiltration potentielle de 2 à 5 mm/h et de 2 à 10 mm/h

2.3 Effet des états de surface sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant

Nous allons, dans cette partie, tester l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif à l'échelle du bassin versant de Bourville. L'objectif est de mesurer les variations de ruissellement consécutives à des variations d'occupations du sol à l'échelle du bassin versant. Ces dernières correspondent soit à des différences dans les proportions de chaque occupation du sol, soit à des différences d'organisation spatiale dans le bassin versant. Pour cette analyse, nous utilisons les données recueillies en enquêtes qui nous permettent de disposer de l'assolement complet du bassin versant sur 6 années consécutives, de 1996 à 2001, et l'assolement 2002 limité aux cultures d'hiver. Nous avons donc l'assolement aux deux périodes d'une même année pour les années 1997 à 2001. Nous connaissons, de surcroît, les techniques culturales appliquées en interculture. Ces données nous permettent de réaliser des simulations pour six configurations d'assolement hivernal (1997 à 2002) et six configurations d'assolement printanier (1996 à 2001)¹⁴. Pour chacune de ces douze configurations, les deux événements pluvieux choisis précédemment sont simulés grâce au modèle STREAM.

¹⁴ Pour la codification des simulations, nous avons utilisé le principe suivant, illustré avec l'exemple de l'année 1996. L'année 1996 correspond à la campagne culturale 1995-1996, récolté en 1996. C'est pourquoi nous avons codé la configuration culturale de l'hiver 1995-96, « 96_Hi », et celle du printemps 1996, « 96_Ptps »

Les valeurs d'infiltration potentielle affectées sont celles définies dans la première partie de ce chapitre. Pour les parcelles appartenant à l'exploitation non enquêtée, nous avons affecté la valeur d'infiltration minimale afin de ne pas sous-estimer la quantité d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin versant. Nous avons fait de même pour les données incomplètes des assolements 1996, 1997 et 1998. Pour les zones boisées, nous avons affecté la valeur maximale d'infiltration, et, pour les zones bâties, la valeur minimale. Enfin, bien que nous n'ayons pas pris en compte la mare¹⁵ située à l'amont du bassin versant pour la calcul du réseau d'écoulement, nous lui avons affecté, en tant qu'occupation du sol, la valeur maximale d'infiltration.

Les résultats sont présentés en trois parties. Tout d'abord, nous étudions le rôle des variations de proportion des différents états de surface et de leur répartition spatiale dans le bassin versant en lien avec le type d'événement pluvieux. Nous exposons alors les résultats relatifs à l'évaluation du ruissellement érosif sur les deux périodes de la campagne culturale, l'hiver et le printemps. Enfin, nous montrons comment deux situations comparables en terme de ruissellement à l'exutoire du bassin versant, peuvent engendrer une accumulation du ruissellement différente dans les sous bassins versants. L'ensemble des valeurs de ruissellement simulées à l'exutoire du bassin versant est reporté sur la (Figure 23). Les volumes d'eau ruisselée sont en ordonnée, et l'infiltration potentielle moyenne, en abscisse. Pour déterminer ce dernier indicateur, nous avons calculé la moyenne des infiltrations potentielles de chaque parcelle et l'avons pondérée par la surface des parcelles. Il s'agit d'un indicateur global de la capacité d'infiltration qui ne reflète pas la proportion de chaque type de surface infiltrante ni leur répartition spatiale.

2.3.1 Répartition spatiale des états de surface et type d'événement pluvieux

Si nous observons les résultats des simulations hivernales avec l'événement pluvieux le plus intense (événement A), nous remarquons que le volume d'eau ruisselée à l'exutoire est inversement proportionnel à l'indice d'infiltration potentielle du bassin versant. Il semble donc que les types de surfaces infiltrantes et leur répartition dans le bassin ait peu d'influence sur la quantité d'eau ruisselée à l'exutoire. La comparaison des configurations culturales des hivers 2001 et 2002 illustre ce propos. Pour ces deux configurations, les volumes d'eau ruisselée à l'exutoire sont quasi égaux (0,6 m³/ha de différence). Les indices d'infiltration potentielle moyenne sont équivalents (0,01 mm/h de différence) comme l'indique la Figure 23, ainsi que la distribution des surfaces infiltrantes par classe d'infiltration selon les données issues des enquêtes.

¹⁵ Nous avons expliqué au chapitre précédent que nous ne considérons pas les propositions d'aménagements faites sur le bassin versant, notre étude étant centrée sur l'effet des systèmes de culture. Nous faisons ici de même pour la mare existante.

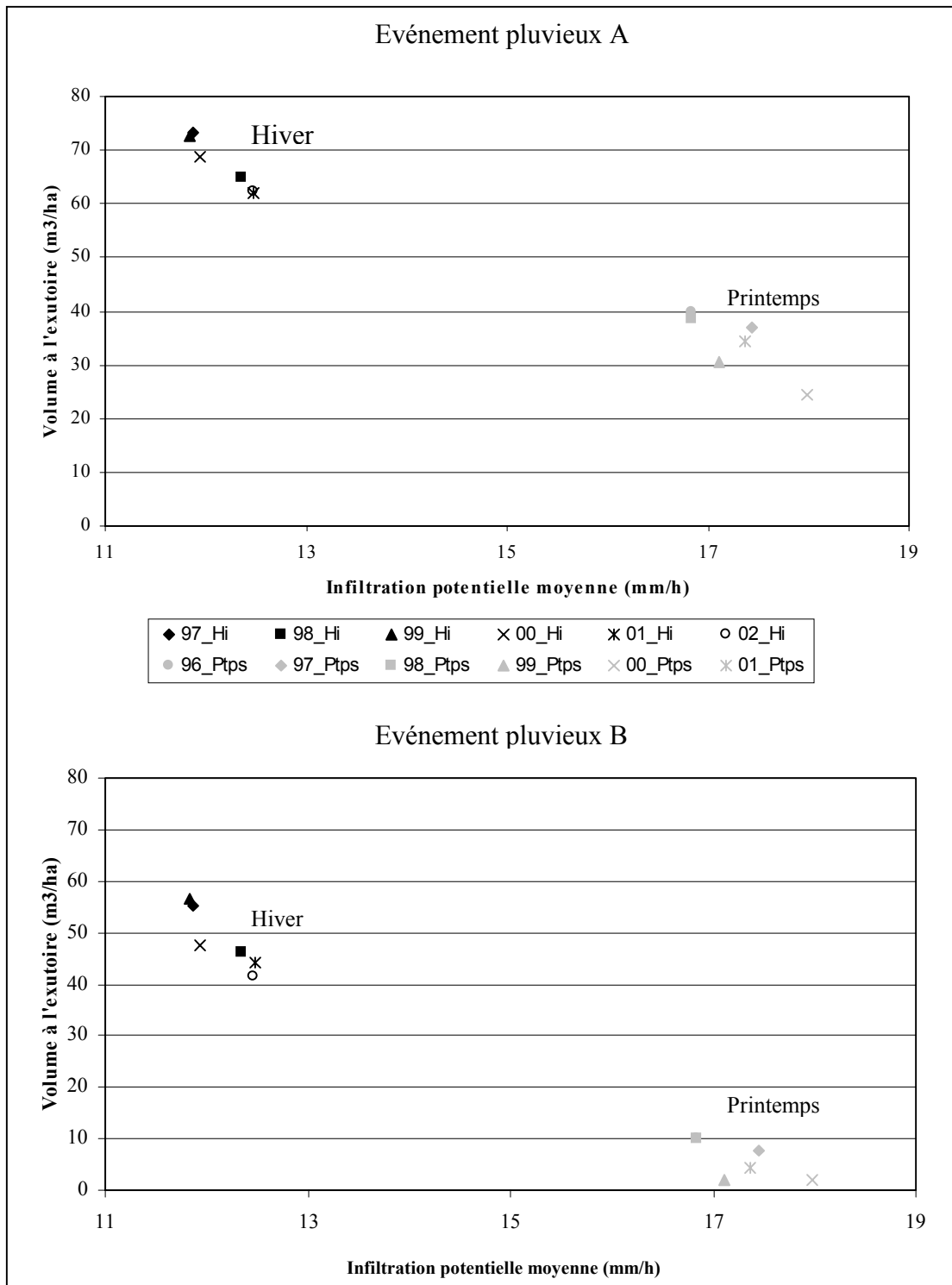


Figure 23 : Ruissellement à l'exutoire du bassin versant, diagnostic 1996-2002

Les résultats des simulations hivernales obtenus avec l'événement pluvieux peu intense (événement B) permettent de confirmer les observations précédentes. Dans l'ensemble, plus la capacité d'infiltration du bassin versant est importante, plus la quantité d'eau à l'exutoire est faible. Cependant, si comme pour l'événement A, les configurations culturales des hivers 1997 et 1999 sont les plus ruisselantes avec des volumes d'eau équivalents, la position

relative des autres configurations varie. Ainsi, la configuration de l'hiver 2000 est plus ruisselante que celle de l'hiver 1998 de 3%, contre 6 % avec l'événement A. La différence la plus prononcée concerne les configurations des hivers 2001 et 2002. Avec l'événement A, les volumes d'eau ruisselée à l'exutoire sont quasi équivalents, la configuration de l'hiver 2001 ruisselant légèrement plus (1%). Avec l'événement B, la différence est plus marquée et c'est la configuration de l'hiver 2002 qui est plus ruisselante de + 7%. Contrairement au résultat obtenu avec l'événement A, avec l'événement B, la répartition des surfaces infiltrantes dans le bassin versant a une influence. En effet, comme nous l'avons dit dans le paragraphe précédent, les configurations des hivers 2001 et 2002 ont des indices d'infiltration potentielle équivalents, et ces indices résultent d'une proportion équivalente de chaque catégorie de surface infiltrante. La différence de ruissellement ne peut donc être la conséquence que d'une répartition spatiale différente de ces surfaces au sein du bassin versant.

La différence de réponse aux deux événements pluvieux des configurations des hivers 2001 et 2002 s'explique par la distribution des surfaces ruisselantes et par l'intensité des événements pluvieux. Avec l'événement pluvieux le plus intense, les surfaces d'une capacité d'infiltration de 2 et 5 mm/h sont ruisselantes. Ces surfaces représentent 80% des terres labourables dont on peut modifier l'occupation du sol et par conséquent la capacité d'infiltration. Nous en déduisons que, entre les hivers 2001 et 2002, la répartition de seulement 20% des terres labourables caractérisées par un état de surface infiltrant, a une conséquence sur le volume d'eau ruisselée à l'exutoire : ces parcelles peuvent, en effet, infiltrer du ruissellement venant des parcelles amont. Dans les conditions créées par l'événement pluvieux peu intense, seules les parcelles ayant une capacité d'infiltration de 2 mm/h produisent du ruissellement, ce qui représente 56% des terres labourables. Les autres parcelles, soit 44%, peuvent infiltrer du ruissellement venant de parcelles amont, en plus des précipitations. En raison de ce pourcentage élevé, la répartition spatiale des surfaces infiltrantes dans le bassin a donc potentiellement un effet plus important.

Les résultats obtenus avec les simulations des configurations culturales du printemps confirment ceux obtenus avec celles d'hiver. Les volumes d'eau à l'exutoire du bassin versant sont globalement inversement proportionnels à la capacité d'infiltration moyenne du bassin versant. Cependant, les capacités d'infiltration étant plus élevées qu'en hiver, les volumes ruisselés à l'exutoire sont plus faibles, et l'effet de la distribution des surfaces infiltrantes et de leur répartition spatiale est constaté avec les deux événements pluvieux. Ainsi les configurations des printemps 1997 et 2001 sont plus ruisselantes que la configuration du printemps 1999 bien qu'ayant une capacité d'infiltration potentielle plus importante et ceci avec les deux événements pluvieux.

2.3.2 Evolution du ruissellement au cours de l'année culturale

Nous étudions ici si l'effet des états de surface sur le ruissellement est équivalent en hiver et au printemps d'une même année culturale. Pour cette analyse nous ne considérons que les résultats obtenus avec l'événement pluvieux le plus intense, ceux obtenus avec l'autre événement pluvieux n'apportant pas d'information supplémentaire.

Nous avons comparé le classement des cinq années culturales pour lesquelles nous disposions des assolements en hiver et au printemps (1997 à 2001), à partir des simulations réalisées avec les états de surface correspondants. Il apparaît que le classement des années est globalement modifié entre les deux saisons climatiques. De la configuration la plus ruisselante à la moins ruisselante, l'ordre est « 1997-1999-2000-1998-2001 » en hiver et « 1998-1997-2001-1999-2000 » au printemps. L'ordre relatif de certaines années entre elles est le même en hiver qu'au printemps : la configuration culturale de 1997 est plus ruisselante que celles de 2000 et 2001 aux deux saisons. A l'opposé, pour d'autres configurations, l'ordre est inversé : c'est le cas de 2000 et 2001 par exemple.

Les différences observées dans le classement relatif des configurations entre l'hiver et le printemps s'expliquent, en partie, par une disparité entre les trajectoires d'état des intercultures. Des parcelles en interculture de même capacité d'infiltration en hiver, vont, au printemps, avoir des capacités d'infiltration différentes en fonction de la culture implantée. Inversement, des parcelles ayant la même capacité d'infiltration au printemps car implantées avec la même culture, peuvent avoir des capacités d'infiltration différentes l'hiver précédent, en fonction des techniques culturales appliquées au cours de l'interculture. Une autre explication est le rôle plus important de la répartition spatiale des surfaces infiltrantes au printemps qu'en hiver, du fait de leur plus forte proportion.

Au cours de la saison culturale, de ruisselantes certaines surfaces deviennent infiltrantes, et, en fonction de leur localisation, elles peuvent absorber ou non du ruissellement venant de l'amont, en plus des précipitations. Ainsi, c'est à la fois le type de trajectoire d'état et leur localisation dans le bassin versant qui influencent le classement relatif des années au cours de l'année culturale. Une configuration de bassin versant en terme d'assolement et d'itinéraire technique, moins ruisselante en hiver, ne l'est pas toujours au printemps. En conséquence, il n'est donc pas toujours possible de limiter le ruissellement aussi efficacement durant toute l'année culturale.

2.3.3 Concentration du ruissellement à l'intérieur du bassin versant

Dans les deux paragraphes précédents, nous nous sommes intéressés uniquement au volume d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin versant. Comparant le comportement des configurations culturales des hivers 2001 et 2002 sous l'événement pluvieux le plus intense, nous illustrons

ici comment un même volume à l'exutoire peut s'accumuler différemment le long des axes de concentration du ruissellement.

La Figure 24 reporte les volumes d'eau simulés à l'exutoire des différents sous bassins versants en fonction de la distance euclidienne entre l'exutoire des sous bassins versants et l'exutoire du bassin versant de Bourville. Les points utilisés pour évaluer le ruissellement se répartissent sur trois axes de concentration du ruissellement : l'axe 1 part de l'exutoire et rejoint l'amont du sous bassin versant 1, l'axe 2 correspond au sous bassin versant 2 et l'axe 51 à un sous-bassin versant situé à l'amont du sous bassin versant 1 (découpage en sous bassin versant en annexe 8). Nous observons qu'un volume équivalent à l'exutoire du bassin versant de Bourville en 2001 et 2002 correspond à des contributions similaires des sous bassins versants 1 et 2 en 2002 (2 061 m³ de différence), alors qu'en 2001, la contribution du sous bassin versant 2 est supérieure de 6 250 m³. De même, pour un axe de concentration donné, les sous bassins versants peuvent contribuer au ruissellement de manière différente d'une année à l'autre. Suivant le point d'évaluation sur l'axe de concentration du ruissellement, une année peut être considérée comme plus ou moins ruisselante. C'est le cas pour l'axe 2 : à l'amont c'est l'année 2002 qui est plus ruisselante de 4 461 m³, alors qu'au point de raccordement des axes 1 et 2, le ruissellement de l'axe 2 est supérieur de 3 376 m³ en 2001. La zone intermédiaire du sous bassin versant 2 a fourni au total 7 837 m³ supplémentaires d'eau ruisselée en 2001. Suivant l'échelle d'analyse, des configurations de bassins versants peuvent conduire à des niveaux ruissellement équivalents ou différents : il apparaît donc nécessaire de fixer le point d'évaluation du ruissellement avant de comparer les configurations.

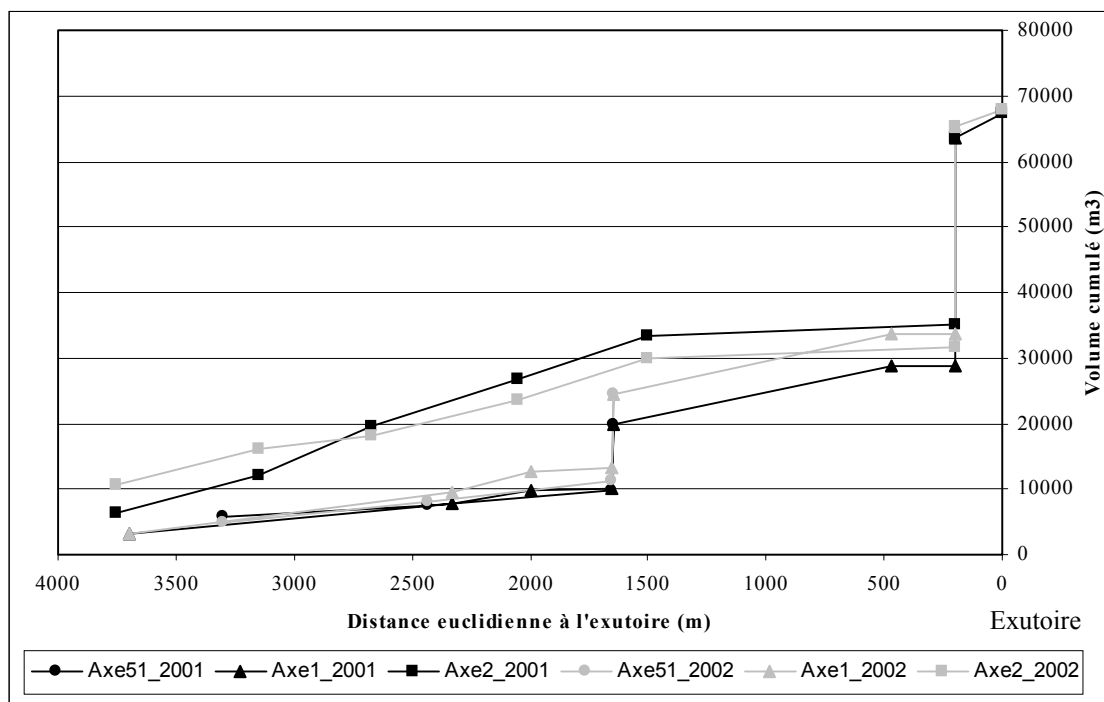


Figure 24 : Concentration du ruissellement – Hiver 2000 et 2001

Conclusion du chapitre

Les résultats du diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif permettent de tirer plusieurs conclusions qui ont des conséquences pour la suite de l'analyse.

1. L'effet sur le ruissellement érosif des configurations culturelles du bassin versant résultant de la distribution spatiale des systèmes de culture est réel. A l'échelle du bassin versant, si l'on compare l'effet des configurations extrêmes, le volume d'eau ruisselée à l'exutoire varie de 16% avec l'événement pluvieux intense et de 27% avec l'événement pluvieux peu intense. Etudier les possibilités de modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement érosif semble justifié. En effet, en cherchant à modifier les systèmes de culture du bassin versant pour favoriser l'infiltration du ruissellement, nous devrions obtenir des réductions du ruissellement supérieures à celles simulées lors de ces diagnostics.

2. Les effets sur le ruissellement érosif résultant de l'organisation spatiale des cultures et des itinéraires techniques sont liés. Les itinéraires techniques déterminent la capacité d'infiltration de la parcelle, et déterminent donc si elle est ruisselante ou infiltrante pour un événement pluvieux donné. Or, suivant qu'il s'agit d'un état infiltrant ou ruisselant, une modification de sa localisation dans le bassin versant a un effet différent. La modification de l'organisation spatiale des cultures a donc un effet variable suivant l'itinéraire technique appliqué. Nous ne pouvons donc pas dissocier l'étude des modifications de la localisation spatiale des cultures de celle des changements d'itinéraires techniques.

3. L'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif dépend du type d'événement pluvieux. En effet, une répartition spatiale différente des mêmes états de surface a une répercussion sur le ruissellement, seulement si une partie des états de surface n'est pas saturée par l'événement pluvieux. Avec un événement pluvieux saturant la capacité d'infiltration de la majorité des états de surface, une modification de leur localisation spatiale dans le bassin versant n'aura pas d'effet sur la réduction du ruissellement. En conséquence, quel que soit l'événement pluvieux, il sera toujours possible de limiter le ruissellement par un accroissement de la capacité d'infiltration des parcelles, ceci sans réfléchir à leur localisation dans le bassin versant. L'effet de la localisation intervient uniquement lorsque l'événement pluvieux ne sature pas tous les états de surface du bassin versant. Pour la recherche de solutions, il convient donc dans un premier temps d'augmenter la capacité d'infiltration, et dans un deuxième temps de modifier l'organisation spatiale des cultures. Ainsi les modifications proposées seront efficaces pour tous les événements pluvieux.

4. Nous avons vu également qu'une configuration de bassin versant pouvait être moins ruisselante qu'une autre à l'exutoire du bassin versant, mais plus ruisselante à l'exutoire de certains sous bassins versants. En conséquence, il importe de fixer l'objectif final à atteindre avant de chercher des solutions : inondation à l'aval du bassin versant avec comme indicateur

le volume d'eau à l'exutoire, ou bien ravinement en certains endroits du bassin avec comme indicateur les volumes à l'exutoire des sous bassins versants correspondants.

5. Réduire le ruissellement en hiver n'entraîne pas automatiquement une réduction du ruissellement au printemps. Cependant, avec les systèmes de culture actuels, le volume d'eau ruisselé à l'exutoire est bien moindre au printemps qu'en hiver. Nous pouvons donc centrer la recherche de solutions sur la période hivernale, en vérifiant qu'au printemps nous n'obtenons pas des volumes d'eau à l'exutoire plus importants qu'en hiver. Signalons cependant, qu'au printemps des problèmes observés sont la conséquence principalement d'orages violents et localisés, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent. Dans ce cas là, les pluies très intenses saturent toutes les surfaces et dégradent très rapidement les états : nous ne sommes plus dans le cadre d'analyse proposé, à savoir, un printemps sans orage maintenant une capacité d'infiltration élevée sur les semis de culture de printemps. Nous discuterons de ce type de conditions climatiques et des conséquences sur le ruissellement dans le chapitre 6.

CHAPITRE 4

**Analyse de
la constitution des systèmes de cultures
au sein de l'exploitation agricole**

Chapitre 4 : Analyse de la constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole

L'analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif, présentée dans le troisième chapitre, nous permet de concevoir des modifications des systèmes de culture, efficaces vis-à-vis de la réduction du ruissellement érosif. Dans ce chapitre, nous analysons si les exploitants agricoles disposent de marges de manœuvre pour modifier effectivement leurs systèmes de culture. Nous analysons la disponibilité des facteurs de production – terre, et temps de travail – et la manière dont l'agriculteur les répartit entre ses différentes productions pour atteindre les objectifs qu'il se donne. Cela signifie que nous ne nous intéressons pas précisément au choix des cultures : il est considéré comme une donnée fixe. Dans ce chapitre, nous nous attachons à comprendre :

- les décisions d'affectation des parcelles aux différentes cultures en les modélisant sous la forme d'un système de règles qui permet de reproduire la répartition spatiale des successions culturales sur le territoire de l'exploitation ;
- les décisions d'affectation du temps de travail aux différentes opérations culturales réalisées dans l'exploitation dont la modélisation permet de reproduire les dates et conditions de réalisation des opérations techniques constitutives des itinéraires techniques.

Nous pouvons en déduire ce qu'il est possible de modifier de la répartition spatiale des cultures et des itinéraires techniques, sans changer les règles considérées comme essentielles ; c'est ce que nous appelons marge de manœuvre.

Ce chapitre est structuré en trois parties. Les deux premières sont consacrées à l'analyse des règles, respectivement, de l'organisation spatiale des cultures au sein du territoire agricole et de l'organisation du travail. Dans la troisième et dernière partie, nous faisons la synthèse des marges de manœuvre qui découlent de l'analyse des règles et discutons des conditions d'existence de ces marges de manœuvre au sein de l'exploitation agricole.

1 Localisation des cultures au sein du territoire de l'exploitation agricole

Nous expliquons d'abord les principes d'analyse, puis exposons les résultats de la formalisation des règles et enfin validons les règles dégagées.

1.1 Principe d'analyse

Pour formaliser les règles de localisation des cultures, nous avons utilisé les informations issues des enquêtes menées auprès de l'ensemble des agriculteurs, soit 26 enquêtes au total.

Pour chaque exploitation agricole, nous avons identifié l'assolement moyen de l'exploitation, à partir de la liste des cultures et les surfaces moyennes fournies par l'agriculteur. Pour les agriculteurs du groupe A, nous avons également pris en compte les assolements de 1996 à 2001 réellement mis en place (exemple en annexe 9) : ils nous permettent d'attribuer à ces agriculteurs une surface minimale et maximale pour chaque culture, encadrant la valeur moyenne. Connaissant les cultures de l'assolement, nous avons pu analyser les règles de l'organisation spatiale de ces cultures sur le territoire de chaque exploitation. Les deux étapes du travail furent les suivantes :

- pour chaque culture de l'assolement : définition des règles que l'agriculteur se donne pour définir la zone cultivable, c'est-à-dire les parcelles du territoire d'exploitation où il est possible d'implanter la culture considérée ;
- pour chaque culture : définition des règles de succession culturale, à savoir le délai de retour et les précédents culturels. Ces derniers sont classés en trois catégories : pour une culture donnée, nous distinguons les précédents obligatoires, possibles et interdits.

A partir de l'ensemble de ces informations, nous définissons les successions culturales mises en place sur chaque parcelle de l'exploitation, ce qui permet de définir les blocs de culture (ensemble de parcelles sur lesquelles est appliqué la même succession de cultures). S'y ajoutent les règles de regroupement de cultures sur une même parcelle pour des raisons d'organisation du travail.

1.2 Formalisation des règles

Dans un premier temps, nous faisons l'inventaire des cultures présentes dans les assolements des agriculteurs enquêtés et dégageons les raisons expliquant le choix de ces cultures. Dans un second, nous exposons une synthèse des règles de la localisation spatiale des cultures sur le

territoire d'exploitation réalisée à partir de celles identifiées dans chaque exploitation enquêtée.

1.2.1 Cultures présentes dans les assolements

Les cultures rencontrées chez les 26 agriculteurs enquêtés sont les suivantes, toutes n'étant pas présentes dans chaque exploitation (excepté le blé) :

Betterave sucrière (BS) : la surface est fixée par un quota qui dépasse rarement 1/6^{ème} de la zone cultivable. Très peu d'agriculteurs dépassent le quota pour commercialiser de la betterave sur le marché libre. Seulement quatre exploitations ne cultivent pas de betteraves sucrières et dans quatre autres exploitations la surface est très faible (2-3 ha).

Blé (BLE) : cette culture se retrouve dans toutes les exploitations et représente entre 33% et 50% de l'assolement. Ces dernières années, certains agriculteurs en implantaient plus au détriment d'autres cultures dont la rentabilité avait baissé (escourgeon et pois).

Colza alimentaire (COL) : cette culture est présente dans seulement dix exploitations. Les agriculteurs cultivent généralement du colza diester sur les surfaces consacrées au gel de terre prévu par la PAC et complètent avec du colza alimentaire. Les agriculteurs implantent aussi cette culture sur les mauvaises terres qui ne reçoivent sinon que des céréales d'hiver. Le colza est globalement peu apprécié dans la région en raison des problèmes de désherbage qu'elle cause pour la culture de betterave.

Escourgeon (ESC) : quasiment tous les agriculteurs implantent cette culture mais en proportion variable. Deux raisons justifient ce choix : besoin de paille pour l'élevage ou étalement des récoltes (l'escourgeon comme le colza se récoltent en juillet alors que le blé et le pois en août). Cette culture est aussi utilisée pour diversifier la succession de cultures et éviter ainsi de retrouver trop fréquemment du blé.

Lin (LIN) : l'agriculteur limite en principe la sole de lin à 1/6^{ème} de la zone cultivable afin de respecter le délai de retour de six ans. Néanmoins en 2001, certains agriculteurs en ont cultivé sur une plus grande superficie, en raison de la forte demande. Le lin est présent dans la majorité des exploitations. Seules six exploitations dont l'orientation principale est l'élevage n'en cultivent pas.

Maïs ensilage (ME) et betteraves fourragères (BF) : ces cultures contribuent à l'alimentation du bétail et sont donc présentes uniquement chez les éleveurs. La surface est fixée en fonction des besoins fourragers de l'élevage.

Pois (POIS) : cette culture était présente dans quasiment toutes les exploitations au début des années 90, mais depuis, la surface implantée a tendance à régresser (baisse de rentabilité). Certains ont même arrêté pour cause d'épidémies d'antracnose.

Pomme de terre (PDT) : seuls trois agriculteurs en cultivent et trois autres sous-louent leurs parcelles à des producteurs de pommes de terre. Les types de productions sont assez différenciés : plants de pomme de terre, pommes de terre de consommation conditionnées sur l'exploitation et pommes de terre de consommation livrées en vrac. Les surfaces sont relativement fixes en raison du délai de retour de six ans.

Gel des terres : le gel est soit cultivé en colza diester ou en maïs grain (contrats pour l'industrie des cosmétiques), soit fourrager (ray grass, trèfle) tournant ou fixe. Un seul agriculteur plante en gel une surface plus importante que le taux minimum (gel fixe sur une parcelle éloignée et caillouteuse pour simplifier l'organisation du travail).

Cultures anecdotiques : l'orge de printemps, solution de repli pour les agriculteurs qui n'ont pas pu implanter de céréales d'hiver et qu'ils ne peuvent pas implanter les cultures de printemps habituelles pour des raisons de succession de cultures, et l'avoine, sur 3-4 ha répartis chez deux agriculteurs.

Au final, nous pouvons classer les principales cultures en 3 catégories :

- les cultures dont les surfaces dépendent principalement de quotas ou de contrats et qui sont fortement rémunératrices : betterave sucrière, pomme de terre et lin. Les surfaces sont relativement fixes d'une année sur l'autre ;
- les cultures moins rémunératrices et dont les surfaces peuvent varier en fonction du contexte économique : blé, pois, escourgeon et colza. Les surfaces en blé et escourgeon dépendent aussi des besoins en paille lorsque l'exploitation comprend un atelier d'élevage ;
- les cultures fourragères dont les surfaces dépendent des besoins du troupeau : maïs ensilage et betteraves fourragères.

Il faut noter que le choix des cultures n'est pas totalement indépendant des règles de successions culturales. En particulier, pour les cultures les plus rentables dont l'agriculteur cherche à maximiser la surface, les délais de retour déterminent les surfaces maximales possibles.

1.2.2 Analyse des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation

Une fois choisies les cultures et déterminées les surfaces de certaines d'entre elles (en raison de quotas, de besoins fourragers, des caractéristiques du territoire d'exploitation, etc.), la localisation des cultures sur le territoire de l'exploitation est fonction :

- des caractéristiques du territoire d'exploitation qui fixent la zone cultivable pour chacune des cultures présentes sur l'exploitation,
- des règles de succession culturale, délais de retour et précédents culturaux, qui déterminent, en fonction des cultures précédentes, les cultures possibles une année donnée sur chaque parcelle de la zone cultivable,
- des règles de regroupement de cultures sur des parcelles voisines qui visent à simplifier l'organisation du travail.

Nous étudions ces différents points dans les paragraphes suivants, en ne prenant en compte que les neuf principales cultures présentes dans les assolements.

1.2.2.1 Zone cultivable

Le Tableau 19 récapitule les contraintes à l'implantation des cultures sur certaines parcelles des exploitations enquêtées (en gras les contraintes fréquemment mentionnées, en italique les contraintes mentionnées par un seul agriculteur et pour une seule culture). Nous distinguons les contraintes du territoire d'exploitation regroupant celles du parcellaire et celles du milieu et les contraintes liées à l'histoire culturale de la parcelle.

Tableau 19 : Contraintes déterminant la zone cultivable de chaque culture										
		BLE	ESC	COL	POIS	ME	BF	BS	PDT	LIN
Parcellaire	Distance zone stockage									
	Accès difficile pour l'agriculteur									
	<i>Accès difficile pour les camions de la sucrerie</i>									
	<i>Géométrie de la parcelle</i>									
Milieu	Pente									
	Cailloux									
Agronomie	Repousse dans la culture de BS									
	<i>Désherbage difficile</i>									
	<i>Excès d'azote</i>									
	<i>Pression parasitaire</i>									

Les contraintes restreignant le plus la zone cultivable des différentes cultures sont liées aux caractéristiques du territoire d'exploitation. Par exemple, la distance à la zone de stockage est le facteur limitant pour l'implantation des cultures fourragères. Pour ces dernières ainsi que pour la betterave sucrière, une autre contrainte fréquemment citée résulte de la difficulté d'accès aux parcelles. Le problème rencontré concerne soit l'accès direct (chemin trop petit pour les engins de récolte), soit l'accès depuis l'exploitation (route à grande circulation séparant les parcelles du lieu de stockage des récoltes des cultures fourragères). Les deux autres contraintes découlant des caractéristiques du territoire d'exploitation sont peu fréquentes. Dans un cas, les parcelles sont non accessibles aux camions de la sucrerie chargés d'emporter les betteraves sucrières récoltées. Dans l'autre, la géométrie des parcelles oblige

l'agriculteur à faire de nombreuses fourrières dans la parcelle. Ceci entraîne un gaspillage des produits phytosanitaires pour la betterave sucrière et des pertes de rendement et de qualité pour le lin. En effet, durant la phase de rouissage du lin, l'agriculteur est obligé de rouler de nombreuses fois sur le lin arraché au niveau des fourrières.

Les contraintes du milieu, parcelle en pente et présence de cailloux, sont liées : les parcelles concernées sont situées sur les versants où l'argile à silex affleure ou du moins est proche de la surface du sol. Elles se caractérisent aussi par une plus faible réserve hydrique. Sur ces parcelles, les agriculteurs n'implantent que des céréales à paille et du colza. Sont exclus les cultures pour lesquelles les cailloux sont gênants lors de la récolte et le lin dont l'enracinement est perturbé par les cailloux. Enfin, les contraintes agronomiques sont plus rares, si ce n'est le problème du désherbage des repousses de colza dans la culture de betterave sucrière. Pour cette raison, la majorité des agriculteurs cultivant du colza excluent cette culture d'une partie ou de la totalité de la zone cultivable de la betterave sucrière.

Soulignons que toutes les contraintes possibles gênant l'implantation d'une culture ne sont pas mentionnées : l'analyse effectuée porte uniquement sur les contraintes observées dans les exploitations enquêtées. Citons l'exemple d'une contrainte qui n'apparaît pas : un accès difficile ou une géométrie de parcelle particulière peut limiter la zone cultivable de la pomme de terre, tout autant que celle de la betterave sucrière. Chez les producteurs de pomme de terre enquêtés, le cas ne se présentait pas.

Au final, mis à part la contrainte de la distance à la zone de stockage pour les cultures fourragères (ME et BF), qui peut réduire de façon conséquente la zone cultivable, les autres contraintes affectent généralement peu les zones cultivables. En effet, le bassin versant de Bourville bénéficie d'un milieu très favorable : les sols sont profonds avec une forte réserve hydrique, non hydromorphes, peu caillouteux et les pentes sont faibles. De plus, la zone d'étude a été remembrée en totalité entre 1969 et 1986 : la géométrie des parcelles est donc peu contraignante et les accès aux parcelles sont faciles.

Enfin, les contraintes limitant la zone cultivable d'une culture pour une exploitation donnée dépendent des caractéristiques globales du territoire de l'exploitation. Plus les contraintes sont fortes, moins l'agriculteur est exigeant. C'est ce que constatent Dobremez *et al.* (2002) dans un autre contexte : en montagne, les surfaces en herbe de forte pente ont une vocation variable d'une exploitation à l'autre selon leur proportion dans la surface en herbe totale de l'exploitation. Dans notre cas, un exemple parlant est la contrainte de distance à la zone de stockage pour la culture du maïs ensilage : certains agriculteurs ne cultivent pas de maïs à plus de 2 km alors que d'autres qui ont un parcellaire plus dispersé en cultivent jusqu'à 5 km, voire plus loin encore. Il est donc difficile de définir un seuil pour chaque critère permettant de dire si la parcelle fait partie ou non de la zone cultivable. Les zones cultivables doivent être définies sur chaque exploitation avec l'aide de l'agriculteur.

1.2.2.2 Règles de succession des cultures

Nous avons analysé les règles de succession de cultures pour chaque agriculteur enquêté et nous en présentons ici une synthèse. D'un agriculteur à l'autre, les règles présentent des similitudes et il nous a paru intéressant d'essayer de dégager un modèle général de succession culturale, caractéristique de la zone d'étude.

Le Tableau 20 regroupe l'ensemble des délais de retour et des précédents cultureux que les agriculteurs disent appliquer actuellement. Il ne s'agit donc pas de l'ensemble des possibilités agronomiques en matière de succession culturale. Nous n'avons pas pris en compte les règles que certains agriculteurs disent parfois suivre mais qui restent très anecdotiques (par exemple implantation de lin deux ans de suite, lorsque le premier lin n'a pas pu être récolté).

	Principaux délais de retour	Principaux précédents cultureux
BLE	2-3	Tous sauf ESC
ESC	3-6	BLE
COL	3-6	ESC, BLE, LIN ou POIS
POIS	5-6	ESC, BLE, LIN ou BS
ME	Variable ¹⁶	BLE, ESC, LIN, ME, POIS ou BS
BS – BF	3-6	LIN, BLE ou ESC
PDT	5-6	BS, BLE, LIN, ESC ou POIS
LIN	5-6	BLE ou ESC

Nous pouvons différencier les cultures en fonction de leur degré d'exigence vis-à-vis de la longueur du délai de retour et des précédents cultureux :

- cultures faiblement exigeantes pour lesquelles le délai de retour est court et plusieurs précédents cultureux sont possibles : blé, colza, maïs et betteraves sucrières ou fourragères ;
- cultures moyennement exigeantes dont le délai de retour est long ou qui acceptent seulement un ou deux précédents cultureux : escourgeon, pois et pomme de terre ;
- cultures fortement exigeantes caractérisées par un délai de retour long et un très faible nombre de précédents cultureux possibles : culture du lin uniquement.

Les agriculteurs combinent ces règles de base de différentes manières. Il en résulte plusieurs types de successions culturales. Ceux présentés ci-dessous sont issus de l'application des règles principales. Nous considérerons les successions de cultures incluant de la culture de la pomme de terre à part. En effet, cette culture n'est présente que dans quelques exploitations et engendre des modifications par rapport aux successions culturales appliquées par les autres agriculteurs.

¹⁶ Pour le maïs le délai de retour n'est pas une contrainte, il peut être cultivé en monoculture.

Successions sans la culture de pomme de terre

La majorité des successions sont établies sur une durée de 5 ou 6 ans, durée imposée par le délai de retour des cultures de lin et de pois. Elles sont construites à partir de la répétition de deux motifs de base qui sont :

- un motif de blé de trois ans, débutant par une culture « tête de rotation » ayant la particularité de laisser beaucoup d'azote dans le sol ou de recevoir des amendements organiques, suivie du blé, puis d'une troisième culture aux besoins en azote faibles (lin) ou globalement moins exigeante (escourgeon) :

COL	/		/	LIN
POIS	/		/	
ME	/	BLE	/	
BS	/		/	ESC
BF	/		/	

- un motif de blé de deux ans qui accepte en première position toute culture excepté le blé, celui étant cantonné à la deuxième position. Remarquons que l'escourgeon est exclu de ce motif, puisque cette culture n'est pas un précédent possible pour la culture de blé :

COL	/	
POIS	/	
ME	/	BLE,
BS/F	/	
LIN	/	

A partir de ces deux motifs de base et en respectant les délais de retour des différentes cultures il est alors possible de construire plusieurs successions culturales sur une durée de 5 ou 6 ans :

- succession culturale sur 6 ans combinant trois motifs de blé de 2 ans, soit par exemple : BS-BLE-COL-BLE-LIN-BLE
- succession culturale sur 6 ans combinant deux motifs de blé de 3 ans, soit par exemple : BS-BLE-ESC-POIS-BLE-LIN
- succession culturale sur 5 ans combinant un motif de blé de 2 ans et un motif de blé de 3 ans, soit par exemple :

BS-BLE-COL-BLE-LIN

Sur les parcelles où ne sont implantés ni lin ni pois ni betterave, en raison soit de l'assolement de l'exploitation soit de contraintes parcellaires (pente, cailloux), les agriculteurs appliquent des successions culturales de 3 ans, correspondant à la répétition du même motif de blé de 3 ans :

COL-BLE-ESC OU ME-BLE-ESC

Successions incluant la culture de pomme de terre

Les agriculteurs cultivant de la pomme de terre modifient le motif de base de blé de 3 ans. Ces agriculteurs positionnent la pomme de terre en tête de rotation, et la betterave en troisième culture. Le pois peut également apparaître en troisième position, en fonction de la proportion de chaque culture dans l'assolement. Le motif de blé de deux ans n'est pas modifié, la culture de pomme de terre étant ajoutée aux autres cultures.

Le motif de base de blé de 3 ans est donc le suivant :

COL	/	LIN
(POIS) ¹⁷	/	ESC
ME	BLE	BS/F
PDT		(POIS)

La succession culturale sur 6 ans est par exemple :

PDT-BLE-BS-POIS-BLE-LIN ou PDT-BLE-LIN-POIS-BLE-BS

Trois raisons à cette modification ont été mentionnées, chacune par un agriculteur différent :

- positionner la pomme de terre en tête de rotation et la betterave sucrière derrière le blé permet de semer du blé dans de meilleures conditions, les pommes de terre se récoltant plus tôt que les betteraves ;
- un agriculteur a cherché à repousser la culture de lin le plus loin possible de celle de la pomme de terre dans la succession culturale car il avait des difficultés à obtenir une bonne structure de sol lorsque le lin était trop proche de la pomme de terre (cet agriculteur effectue un tamisage de la terre avant l'implantation des pommes de terre) ;
- la culture de lin serait un bon précédent à la culture de pomme de terre car le lin est une culture bien fertilisée (phosphore et potassium) et, au moment du rouissage, il laisse beaucoup d'éléments minéraux dans le sol.

Application des successions culturales

La mise en place par les agriculteurs des successions culturales peut se faire de deux manières différentes :

- certains agriculteurs construisent à l'avance une ou plusieurs successions culturales en fonction de leur parcellaire, et ils les appliquent chaque année. Ces agriculteurs ont généralement quelques parcelles d'ajustement pour lesquelles la succession n'est pas fixe : elles leur permettent de faire varier l'assolement d'une année sur l'autre sans remettre en cause les successions culturales sur les autres parcelles. Ces parcelles d'ajustement représentent moins de 10% des terres labourables des exploitations

¹⁷ Le pois est figuré entre parenthèses car il peut être soit avant le blé, soit après.

concernées. Bien entendu, ces agriculteurs n'excluent pas de modifier leurs successions si les conditions économiques changent ;

- d'autres agriculteurs ne définissent pas à l'avance de succession fixe, mais chaque année ils déterminent les cultures à planter sur chacune des parcelles de leur exploitation en appliquant les règles de base de délai de retour et de précédents culturels. Cela leur permet de modifier leur assolement plus facilement d'une année sur l'autre.

1.2.2.3 Regroupement de cultures sur des parcelles voisines

Les agriculteurs peuvent, pour des raisons d'organisation du travail, regrouper des cultures sur des parcelles voisines. Cette pratique concerne essentiellement la culture du blé et les cultures de betterave et de maïs. Pour le blé, la raison est l'organisation des chantiers de traitements phytosanitaires et de récolte. Pour le maïs et la betterave, l'explication tient à l'organisation de la récolte des betteraves sucrières : le maïs étant récolté avant la betterave, il est alors possible de stocker les betteraves arrachées sur la parcelle de maïs libérée. L'association des deux cultures se fait parfois de la manière suivante : une ou plusieurs fourrières de la parcelle de betterave sont implantées en maïs. Ce regroupement est possible car ces deux cultures ont la même place dans les rotations.

Pour organiser les regroupements de cultures, les agriculteurs procèdent de deux façons différentes :

- les regroupements sont planifiés à l'avance par une coordination des successions de cultures : lorsque l'agriculteur veut planter, une année donnée, des cultures particulières sur des parcelles voisines, il coordonne les successions culturelles sur les deux parcelles. Il fait en sorte que le blé ou bien le maïs et la betterave se trouvent sur les deux parcelles la même année, les autres années les cultures pouvant être totalement différentes.
- il n'y a aucune planification des regroupements, ceux-ci étant mis en place de manière irrégulière, en fonction des opportunités offertes par les cultures. Ces regroupements vont parfois à l'encontre des règles agronomiques énoncées.

1.2.2.4 Conclusion : de faibles contraintes et des exigences agronomiques contrastées

L'analyse des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation montre que les contraintes (territoire d'exploitation, milieu et conduite des cultures) sont assez faibles et, par conséquent, limitent très peu les zones cultivables de chaque culture. Les agriculteurs ont donc une grande latitude pour localiser leurs cultures. Ce sont les règles de délai de retour et de précédents culturels qui sont les plus contraignantes, avec des degrés variables d'une culture à l'autre.

A partir de l'analyse des règles de chaque exploitation, nous sommes en mesure de proposer un modèle de successions culturales commun à l'ensemble des exploitations, basé sur la combinaison de deux motifs de base (blé de deux ans et blé de trois ans). Ces motifs de base sont légèrement différents, suivant que l'agriculteur cultive ou non des pommes de terre.

1.3 Validation des règles de la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation

Afin de modéliser la façon dont l'agriculteur organise spatialement les cultures sur son territoire d'exploitation, nous devons valider les règles identifiées et leur combinaison. Pour ce travail de validation, l'accent est mis sur les règles de succession de cultures, plus contraignantes que celles déterminant les zones cultivables des cultures. Aussi, la première étape de la validation portera uniquement sur les règles de succession culturelle et les motifs de base des successions, par comparaison des délais de retour et des précédents culturels réellement pratiqués entre 1996 et 2001 aux règles formalisées. La seconde étape concernera l'ensemble des règles, par comparaison de l'assolement 2001 réellement mis en place par les agriculteurs et de celui simulé à partir des règles formalisées.

Les règles de regroupement de culture sur des parcelles voisines ne sont pas prises en compte lors de cette validation. En effet, comme nous l'avons expliqué au paragraphe précédent, soit les regroupements de culture sont intégrés dans la mise en œuvre des successions culturales, par une coordination de ces dernières sur les parcelles concernées, soit ils sont totalement imprévisibles et il est donc difficile d'en tenir compte pour l'élaboration d'un modèle. Pour cette même raison, nous n'en tiendrons pas compte lors de la recherche des marges de manœuvre

1.3.1 Première étape : comparaison aux assolements de 1996 à 2001

Pour la première étape de la validation, nous disposons des assolements de 1996 à 2001 pour les 14 exploitations enquêtées du groupe A¹⁸ (agriculteurs exploitant 91% des terres labourables du bassin versant de Bourville). Nous les avons analysés de la manière suivante :

- *vérification des délais de retour* : analyse à la parcelle des délais de retour sur la durée de la succession culturelle enregistrée afin d'identifier les écarts au modèle de succession culturelle, c'est-à-dire les délais de retour inférieurs à ceux du modèle ;
- *vérification des précédents culturels* : nous avons comparé les précédents culturels des successions enregistrées à ceux annoncés par les agriculteurs ; pour cela, nous

¹⁸ Pour trois exploitations, nous ne disposons pas de l'ensemble des six années.

avons considéré les couples de cultures successives, soit cinq couples lorsque nous disposons d'une succession culturale sur six ans ;

- *vérification des motifs de base* : sur le même principe que celui utilisé pour la vérification des précédents cultureux, nous avons analysé les triplets de cultures successives, soit quatre triplets pour une succession culturale sur six ans. Cela nous permet de retrouver les motifs de blé de trois ans et aussi les motifs de blé de deux ans.

Vérification des délais de retour

L'analyse effectuée porte sur les 1 382 ha de terres labourables des exploitations enquêtées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 21, une parcelle pouvant être comptabilisée plusieurs fois si elle cumule plusieurs écarts à la règle principale. Nous constatons que les règles relatives au délai de retour sont assez rigoureusement appliquées : pour chaque culture, la règle identifiée n'est pas respectée sur moins de 20 ha. Au total, les règles de délai de retour n'ont pas été appliquées sur 86 ha entre 1996 et 2001, ce qui représente au plus 6% de la surface totale.

Tableau 21 : Respect des règles de délai de retour		
Culture	Règle principale de délai de retour	Non-respect de la règle
Blé	2 ou 3 ans	10 ha
Escourgeon	3 à 6 ans	5 ha
Colza	3 à 6 ans	7 ha
Pois	5 à 6 ans	18 ha
Maïs ensilage	Variable	0 ha
Betteraves sucrières ¹⁹	5 ou 6 ans	13 ha
Pomme de terre	5 ou 6 ans	16 ha
Lin	5 ou 6 ans	17 ha

Vérification des précédents cultureux (Tableau 22)

Dans la mesure où nous considérons ici les couples de cultures successives, la surface totale analysée est de 5 530 ha²⁰. Les règles relatives aux précédents cultureux ne sont pas respectées sur une surface de 338 ha, soit comme précédemment 6% de la surface totale. Les erreurs concernent principalement la betterave sucrière, le lin et l'escourgeon. Les règles des précédents cultureux identifiées pour ces trois cultures sont particulièrement strictes : si l'agriculteur veut, une année donnée, implanter davantage d'une de ces cultures, il est quasiment obligé de déroger à ces règles, ce qui ne serait pas le cas pour une culture moins exigeante.

¹⁹ Nous incluons également les betteraves fourragères.

²⁰ Cette surface correspond à la somme des surfaces associées à chaque couple de cultures successives identifié. Une parcelle est donc comptabilisée cinq fois lorsque nous disposons des relevés d'occupation du sol de 1996 à 2001. Les parcelles dont l'occupation du sol est connue seulement pour trois ou quatre années sont comptabilisées deux ou trois fois (deux ou trois couples de cultures successives potentiels).

Tableau 22 : Respect des règles de précédents cultureux		
Culture	Règle principale de précédent cultural	Non-respect de la règle
Blé	Tout sauf ESC	17 ha
Escourgeon	BLE	71 ha
Colza	ESC BLE LIN POIS	0 ha
Pois	ESC BLE LIN BS	33 ha
Maïs ensilage	BLE ESC LIN ME POIS BS	13 ha
Betteraves sucrières ¹	LIN BLE ESC	105 ha
Pomme de terre	BS BLE LIN ESC POIS	16 ha
Lin	BLE ESC	83 ha

Vérification des motifs de base

L'analyse des motifs de base étant réalisée en considérant les triplets de cultures successives, la surface totale analysée est de 4 484 ha²¹. Pour 58% de la surface, nous retrouvons un motif de blé de trois ans tel que nous l'avons défini, et pour 22% de la surface un motif de blé de deux ans. Pour 20% de la surface, le motif de succession culturale sur 3 ans ne correspond à aucun de ces deux motifs. Ces différences sont dues au non-respect des règles de délai de retour et de précédents cultureux, comme nous l'avons vu précédemment.

1.3.2 Deuxième étape : simulation de l'assolement 2001

Pour cette deuxième étape de la validation, nous avons simulé l'assolement 2001 des 14 mêmes exploitations agricoles, à partir de la connaissance de leurs assolements 1996 à 2000 et des règles portant sur la délimitation des zones cultivables, les délais de retour et les précédents cultureux. Nous avons ensuite comparé les assolements ainsi obtenus à ceux mis en place par les agriculteurs cette année là, parcelle par parcelle. Ce travail de validation dont les résultats sont récapitulés sur la Figure 25, porte donc sur l'ensemble des règles de localisation spatiale des cultures sur le territoire d'exploitation.

Le but de cette validation n'est pas de savoir si les règles formalisées permettent de prédire exactement l'assolement des agriculteurs, mais de savoir si ces règles permettent d'expliquer les choix faits par les agriculteurs. Ainsi, pour une parcelle où plusieurs cultures sont possibles, nous ne considérons pas qu'il y a une erreur si la culture simulée est différente de celle implantée par l'agriculteur mais que les deux cultures correspondent aux possibilités identifiées. Nous avons donc classé les en trois catégories :

- les parcelles pour lesquelles la même culture a été affectée dans les deux assolements, celle-ci étant la seule possible si les règles sont respectées (en gris sur le graphique) ;

²¹ Les parcelles sont comptabilisées une fois de moins que précédemment, les cultures étant considérées par triplets de cultures successives et non par couples.

- les parcelles pour lesquelles les règles permettent l'affectation de plusieurs cultures et pour lesquelles les cultures implantées par l'agriculteur correspondent à une de ces possibilités (en blanc sur le graphique);
- les parcelles pour lesquelles l'assolement simulé diffère de l'assolement réel, cette disparité ne pouvant être expliquée par les règles formalisées (en noir sur le graphique).

D'après la Figure 25, le non-respect des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation ne concerne guère plus de 20% des terres labourables des exploitations (exactement 21% et 23% pour deux exploitations). Pour neuf exploitations, les règles permettent d'expliquer plus de 90% de l'assolement et dans cinq cas la totalité ou quasi-totalité.

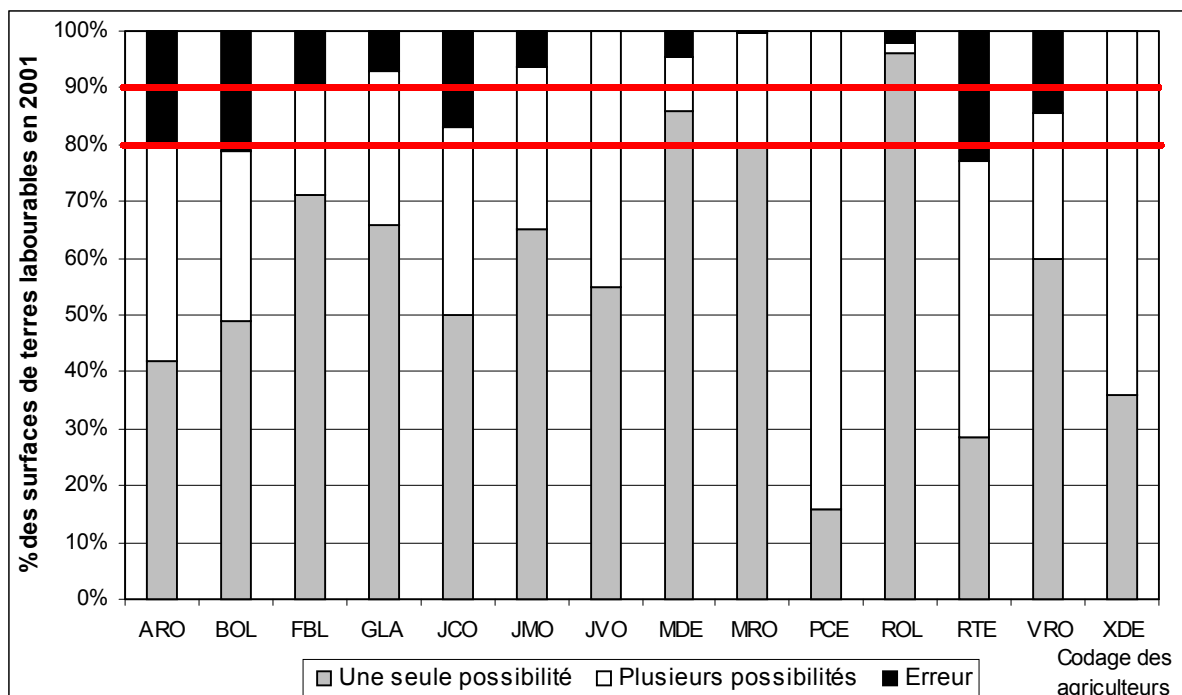


Figure 25 : Comparaison de l'assolement 2001 simulé avec celui réellement mis en œuvre par les agriculteurs cette même année

Les différentes validations effectuées nous permettent de conclure à l'existence d'un modèle général de succession culturale commun à l'ensemble des agriculteurs de la zone d'étude, basé sur des règles de délai de retour et de précédents culturaux. Le travail réalisé indique aussi que les règles formalisées à partir des enquêtes expliquent en grande partie la localisation des cultures sur le territoire de chaque exploitation. En effet, les règles de délai de retour et de précédents culturaux sont suivies dans 94% des cas et ces règles ainsi que celles portant sur la délimitation des zones cultivables expliquent au minimum 80% de la localisation des cultures sur les territoires d'exploitation.

2 Organisation du travail

Pour l'analyse relative à l'organisation du travail, nous nous sommes focalisés sur la période allant de juillet à novembre. Plusieurs raisons justifient ce choix :

- Nous nous situons au début de la période d'interculture, là où il est possible de réaliser différentes opérations culturales pour limiter le ruissellement érosif : travail du sol avec un outil à socs, dents ou disques, et semis de cultures intermédiaires. En comparaison, la période de culture permet assez peu d'opérations (Martin, 1997).
- Pendant cette période, de nombreux travaux se succèdent : dans notre région d'étude, les récoltes sont échelonnées du 15 juillet au 30 novembre et les semis des cultures d'hiver du 25 août au 30 novembre. Il existe déjà de réelles concurrences entre ces travaux, concurrences qui seront amplifiées si s'ajoutent des interventions spécifiques pour maîtriser le ruissellement. Il est donc nécessaire d'étudier l'organisation du travail et les possibilités qu'elle laisse pour introduire de nouvelles opérations culturales à cette période déjà chargée.
- Dans le contexte local du Pays de Caux, nous disposons de connaissances suffisamment précises concernant l'effet des techniques culturales d'interculture sur le ruissellement, et les données correspondantes sont disponibles dans un format directement utilisable par le modèle STREAM.

Néanmoins, la démarche développée pourra être appliquée de manière similaire pour les périodes de semis des cultures de printemps. Les modifications des techniques de semis devraient cependant générer moins de problèmes d'organisation du travail, dans la mesure où les principaux changements correspondraient à une réduction voire à une suppression du travail du sol, contrairement à ceux proposés à l'automne.

Nous présentons successivement dans cette partie les principes d'analyse, les résultats de la formalisation des règles puis leur validation.

2.1 Principe d'analyse

Après avoir listé la main d'œuvre et le matériel disponibles sur l'exploitation, nous avons reconstitué le calendrier d'organisation du travail de la manière suivante :

- inventaire de l'ensemble des opérations culturales réalisées par la main d'œuvre de l'exploitation, qui comprend les opérations culturales liées aux cultures de l'exploitation et celles réalisées sur d'autres exploitations en entraide ;

- pour chaque opération culturale, définition de la période optimale de réalisation dans des conditions climatiques favorables ;
- détail des chantiers mobilisés pour chaque opération culturale, c'est-à-dire la main d'œuvre et le matériel,
- établissement des règles de priorité entre les chantiers devant être réalisés simultanément ou à des périodes rapprochées.

L'ensemble de ces informations permet de reconstituer le calendrier d'organisation du travail de l'exploitation agricole (exemple en annexe 9). Une autre information essentielle pour pouvoir simuler l'organisation du travail est la vitesse de réalisation de chaque chantier.

Toutes ces informations nous permettent alors de simuler le calendrier d'organisation du travail pour une année climatique donnée, à condition de connaître les règles de calcul des jours disponibles. Pour cela, nous avons utilisé les règles établies par His (1996) lors de son travail dans le Pays de Caux. Ces règles sont issues d'un travail réalisé en Picardie (Mousset, 1996) et d'une consultation d'experts locaux de Haute-Normandie. Les simulations sont réalisées avec la feuille de calcul Excel dont nous avons exposé le principe dans le chapitre 2.

2.2 Formalisation des règles

L'analyse de l'organisation du travail repose uniquement sur les 14 exploitations agricoles enquêtées du groupe A. Dans un premier temps, nous présentons une synthèse de l'analyse des paramètres nécessaires à la modélisation de l'organisation du travail de juillet à novembre. Dans un second, nous expliquons comment nous avons modélisé l'organisation du travail en intégrant ces paramètres dans une feuille de calcul Excel.

2.2.1 Paramètres de l'organisation du travail

2.2.1.1 Main d'œuvre et matériel

L'analyse de la main d'œuvre et du matériel disponibles dans les exploitations agricoles nous permet de déduire les possibilités de réaliser plusieurs chantiers simultanément lorsque le cas se présente.

Sur les 14 exploitations enquêtées, la main d'œuvre disponible varie d'une personne (ARO, FBL, JCO) à neuf (JMO). Dans le premier cas, il s'agit d'exploitations de polyculture-élevage ou bien de grande culture de petite taille ; dans le second cas, l'exploitation de grande culture concernée emploie sept salariés et produit des plants de pomme de terre commercialisés sur l'exploitation au détail. Les autres disposent de 1,5 à 3 UTA (Unité de travail agricole) sur

l'exploitation même : couples travaillant sur l'exploitation ensemble, associations entre parents et enfants ou bien chefs d'exploitation employant un salarié.

Ce niveau de main d'œuvre ne permet pas de réaliser l'ensemble des chantiers sans faire appel à de la main d'œuvre extérieure (non permanente), ni de mener deux chantiers de récolte ou de semis simultanément, excepté dans le cas de l'exploitation JMO. En effet, pour cette exploitation, l'ensemble de la main d'œuvre n'est mobilisé que pour l'enroulage du lin et surtout l'arrachage des pommes de terre ; dans tous les autres cas, deux chantiers peuvent être menés simultanément, en particulier l'arrachage des betteraves sucrières et les semis de blé. Dans les autres exploitations, le recours à l'entraide est généralisé pour l'ensilage du maïs et l'arrachage des betteraves (excepté dans les exploitations de 3 UTA qui peuvent assurer l'arrachage de betteraves sans main d'œuvre supplémentaire, voire semer du blé en même temps en cas de retard important). Pour les autres chantiers, l'entraide n'est pratiquée que dans trois exploitations. Dans les autres cas, les exploitations font appel à une entreprise agricole ou bien embauchent des salariés agricoles saisonniers. Cependant, le recours à une main d'œuvre extérieure, quel que soit le type, ne permet pas de réaliser un chantier de récolte et un chantier de semis simultanément, mais seulement d'aider le chef d'exploitation à réaliser séparément les chantiers demandeurs de beaucoup de main d'œuvre.

Concernant le matériel, les exploitations sont dans l'ensemble très bien équipées, même pour le gros matériel de récolte. En effet, neuf agriculteurs sur quatorze possèdent une moissonneuse batteuse en individuel alors que la surface en culture est parfois largement inférieure à 100 ha, et deux des trois producteurs de pomme de terre possèdent en individuel tout le matériel de récolte nécessaire. Lorsque les agriculteurs ne possèdent pas le matériel en propre, ils ont généralement recours à une entreprise agricole ; l'achat de matériel en commun par le biais d'une CUMA est peu développé.

Les chefs d'exploitation du bassin versant de Bourville ont donc une main d'œuvre importante et un niveau d'équipement élevé, ce qui leur permet de réaliser un grand nombre de chantiers seuls. Néanmoins, excepté dans une exploitation, les agriculteurs ne peuvent pas réaliser plusieurs chantiers de récolte et de semis en même temps. De plus, pour certains chantiers demandant beaucoup de main d'œuvre ou bien nécessitant un matériel spécifique non disponible sur l'exploitation, ils ont recours à de la main d'œuvre et du matériel extérieurs. Pour pallier à ce manque temporaire, ils préfèrent la formule entreprise agricole à la formule entraide et matériel en copropriété.

2.2.1.2 Calendrier des travaux et concurrences

L'ensemble des travaux à réaliser pour les neuf cultures principales sur la période d'analyse retenue, est représenté sur la Figure 26. Les flèches indiquent la période de réalisation des différentes opérations culturales correspondant à une année climatique favorable. Les bornes

des périodes (extrémités des flèches) correspondent aux bornes extrêmes données par au moins un des agriculteurs enquêtés. Sous l'appellation « récolte », nous regroupons, outre la récolte en elle-même, l'enroulage des pailles ou le broyage des résidus si ces opérations sont réalisées (blé, escourgeon pois et colza). Sous l'appellation « semis », nous comprenons l'opération de semis proprement dite ainsi que les différentes interventions de préparation du lit de semence (labour et travail du sol superficiel).

Dans ce calendrier des opérations culturales, nous distinguons quatre périodes, dont deux présentant de fortes concurrences entre travaux. Nous ne considérons pas les déchaumages et les épandages de fumier ou d'écumes de sucreries, car ces travaux ne sont pas prioritaires pour les agriculteurs : en cas de concurrence ils sont reportés ou ne sont pas réalisés.

Première période : mois de juillet

A cette période, les travaux les plus demandeurs en main d'œuvre et en temps sont les récoltes de colza et d'escourgeon, ainsi que l'arrachage et l'écapsulage du lin, la dernière opération pouvant débiter fin juillet. Lorsqu'ils sont présents dans l'assolement, le colza et l'escourgeon couvrent souvent sur une faible surface. Quant aux chantiers d'arrachage et d'écapsulage du lin, ils sont réalisés, dans la plupart des cas, par la coopérative linière. Les autres chantiers ne requérant peu de temps, le mois de juillet se caractérise par une faible concurrence entre travaux dans les 14 exploitations.

Seconde période : de début août à début septembre

Les principaux chantiers à réaliser durant cette période sont la récolte du blé et du pois, et l'enroulage du lin, précédé éventuellement d'un retournage. Ces chantiers représentent une charge de travail importante : la surface en blé est comprise entre 33% et 50% de l'assolement, et celle en lin équivaut généralement au sixième de l'assolement. Pour le pois, la surface est plus variable. Au total, se sont donc plus de 50% des surfaces en culture qui doivent être récoltées plus ou moins simultanément. En effet, la période de récolte du blé varie beaucoup en fonction de la date de semis et de la variété : certains blés sont récoltés la première quinzaine d'août, et leur récolte entre alors en concurrence avec celle du pois ; d'autres blés sont récoltés la deuxième quinzaine d'août, leur récolte chevauche par conséquent celle du lin.

Pour gérer ces concurrences entre chantiers, les agriculteurs ont fixé des règles de priorité lorsqu'ils n'ont pas la possibilité d'en réaliser plusieurs simultanément. La récolte du lin est toujours prioritaire, pour deux raisons : ce chantier est plus exigeant vis-à-vis des conditions climatiques, et la marge brute dégagée de la récolte est supérieure à celle du blé ou du pois. Après le lin, le pois est également prioritaire sur le blé. Les gousses de pois étant plus fragiles que les épis de blé, il faut donc les récolter aussi vite que possible lorsqu'elles sont à maturité. Lorsque l'humidité le permet, le blé est battu en soirée après le pois. En fin de période s'ajoutent les semis de colza mais, en cas de concurrence, les semis de colza ne sont pas

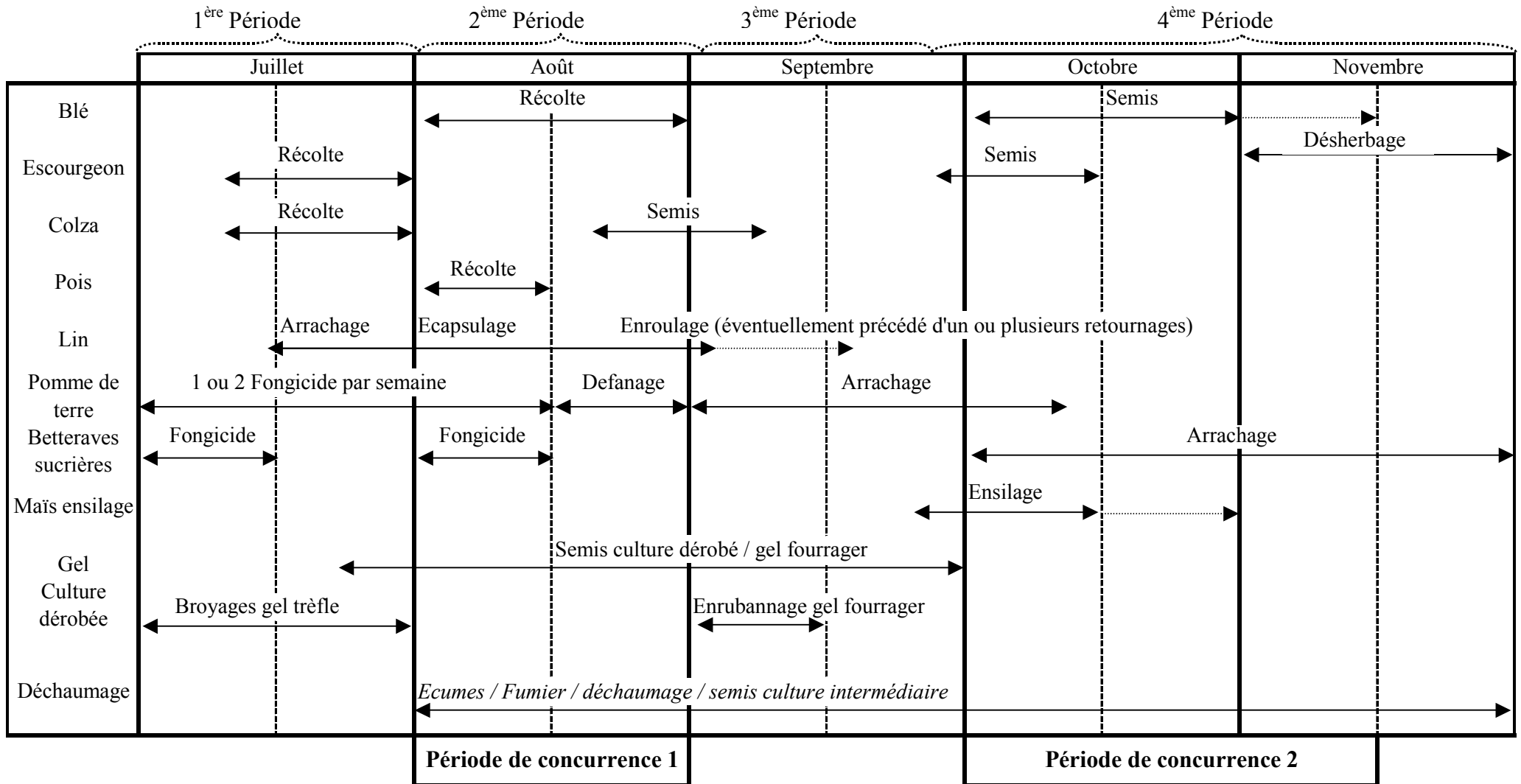


Figure 26 : Calendrier simplifié de l'organisation du travail dans les exploitations agricoles du bassin versant de Bourville

prioritaires sur les récoltes. Les autres chantiers correspondant à cette période (traitement, semis de cultures dérobées ou de gel fourrager) représentent peu de jours de travail et sont effectués assez facilement, en ne posant pas de problèmes de concurrence. Cette seconde période se caractérise donc par une forte concurrence entre travaux.

Troisième période : du 5 au 25 septembre environ

En l'absence de pomme de terre dans l'assolement, cette période est très peu chargée, seuls des chantiers liés aux cultures fourragères devant être réalisés. A l'inverse, pour les producteurs de pommes de terre, cette période est très chargée car elle correspond à l'arrachage des pommes de terre, chantier qui mobilise toutes les ressources en main d'œuvre de l'exploitation pendant deux à quatre semaines. Cependant, la récolte de pomme de terre n'entre pas en concurrence avec d'autres chantiers.

La quatrième et dernière période : de fin septembre à fin novembre

De fin septembre jusqu'au 15 octobre, cinq chantiers peuvent se trouver en concurrence : les premiers semis de blé, les semis d'escourgeon, l'ensilage du maïs, les derniers arrachages de pommes de terre et les premiers arrachages de betteraves sucrières. Par la suite, la concurrence entre chantiers est moins importante : seuls les semis de blé et les arrachages de betteraves sucrières, ainsi que quelques ensilages de maïs plus tardifs peuvent être concurrents.

L'ordre de priorité établi par les agriculteurs est le suivant. Les récoltes sont prioritaires sur les semis, et, pour ces derniers, la priorité entre les semis d'escourgeon et les semis de blé est fonction des variétés semées. Pour les récoltes, la priorité est donnée aux betteraves sucrières : les dates de ramassage sont fixées par la sucrerie et les agriculteurs arrachent, quelques jours avant, la surface correspondant à la quantité demandée par la sucrerie. Toutefois, si un ramassage est fixé fin novembre, les agriculteurs arrachent dès que le climat le permet durant la première quinzaine de novembre : les conditions climatiques permettent rarement d'arracher des betteraves sucrières à la fin du mois de novembre. Ensuite, ce sont les pommes de terre qui sont prioritaires sur le maïs. Concernant le désherbage des semis de céréales d'hiver en novembre, lorsqu'il est pratiqué, il ne pose pas de problème de concurrence, se positionnant après l'ensemble des récoltes.

En résumé, en année climatique favorable, le calendrier d'organisation du travail entre juillet et novembre peut donc être découpé en quatre périodes. La première et la troisième sont des périodes relativement peu chargées, excepté pour les producteurs de pomme de terre durant la troisième période. A l'inverse, les deuxième et quatrième périodes représentent chacune une forte charge de travail avec des concurrences entre chantiers qui devraient être réalisés simultanément si la main d'œuvre le permettait. Comme ce n'est souvent pas le cas, les agriculteurs établissent des règles de priorité entre les différents chantiers, les récoltes des cultures à maturité étant toujours prioritaires sur les semis. Le temps disponible fin juillet et surtout au mois de septembre est utilisé par les agriculteurs pour réaliser les divers travaux de

déchaumage, d'épandage de fumier et d'écumes de sucrerie ainsi que de semis de cultures intermédiaires, lorsque c'est le cas. En année climatique moins favorable, ces jours disponibles sont moins nombreux, les chantiers de récolte étant plus étalés : il n'est pas rare que des moissons de blé et des enroulages de lin se terminent en septembre. Dans ces conditions, les déchaumages et les semis de cultures intermédiaires ne sont pas réalisés, car considérés comme non prioritaires. Les épandages de fumier et d'écumes sont, quant à eux, reportés aux mois de décembre ou janvier lorsque les sols sont gelés et redeviennent portants.

2.2.1.3 Vitesse de réalisation des chantiers

La vitesse de réalisation des chantiers est tout d'abord fonction du type de matériel utilisé (puissance des tracteurs, largeur de travail des outils, capacité de stockage du pulvérisateur, etc.). Au sein du groupe A, il existe une grande diversité d'équipement, d'où des variations de la vitesse d'avancement des chantiers allant du simple au double. Pour cette raison, nous avons évalué la vitesse d'avancement des chantiers pour chaque exploitation en questionnant les agriculteurs eux-mêmes. Ces derniers nous ont précisé pour chaque chantier, la surface pouvant être traitée en une journée ou le nombre de jours nécessaires pour achever le chantier. Nous avons ainsi pu prendre en compte les temps de transport et la variabilité de la durée de la journée de travail. Une vitesse d'avancement donnée en hectare par heure de travail correspond uniquement à la vitesse de travail dans la parcelle.

2.2.2 Modélisation et simulation de l'organisation du travail

La modélisation de l'organisation du travail se fait en plusieurs temps. La connaissance des assolements et des itinéraires techniques permet d'établir la liste des différentes opérations culturales à réaliser. Pour chacune d'elles, nous avons déterminé le détail du chantier mobilisé, c'est-à-dire la main d'œuvre, le matériel et la vitesse d'avancement du chantier. Avoir identifié les règles de priorité entre les différents chantiers nous permet de définir l'ordre de réalisation des chantiers entre les différentes cultures. Enfin, pour chaque chantier, nous connaissons également la date à partir de laquelle il peut être réalisé et s'il dépend de l'achèvement d'un autre chantier (semis de blé après arrachage des betteraves sucrières par exemple). Cette modélisation a été informatisée dans une feuille Excel et fonctionne à un pas de temps journalier. Cette feuille permet de déterminer quel chantier va être réalisé un jour donné, en fonction de la disponibilité de la main d'œuvre²² et des jours disponibles. Les résultats sont fournis dans un tableau regroupant les données par demi-décades²³.

²² Nous avons considéré que les agriculteurs travaillaient le samedi mais pas le dimanche, ce qui correspond dans l'ensemble à la réalité (pour certains chantiers les agriculteurs travaillent même le dimanche).

²³ Lors des enquêtes, les agriculteurs nous ont donné les périodes de réalisation des chantiers par décade ou par quinzaine. Nous avons donc choisi la demi-décade comme base de temps, ce qui est compatible avec un découpage en quinzaine ou en décade.

La Figure 27 présente un exemple de tableau de synthèse, élaboré avec la feuille Excel. Il s'agit d'un extrait de la simulation de l'organisation du travail de l'exploitation MDE avec le climat de l'année 1992 (année défavorable). La première ligne donne la liste des chantiers à réaliser entre juillet et novembre ; dans le cas présenté, seulement sept chantiers sont dénombrés. L'ordre de priorité entre les chantiers correspond à l'ordre des colonnes du tableau. Par exemple, l'enroulage du lin est prioritaire par rapport aux chantiers de battage du pois et du blé ; il est donc positionné avant eux, même si sa période optimale de réalisation est plus tardive. La seconde ligne indique le nombre de jours nécessaires à la réalisation de chaque chantier et, en fin de ligne, le total que cela représente pour l'ensemble de la période analysée. Puis, verticalement, sont listées les 30 demi-décades, du mois de juillet au mois de novembre. Pour chaque chantier, les demi-décades entourées en gras correspondent à la période de réalisation souhaitée par l'agriculteur, et qu'il dit respecter en année climatique favorable. Par exemple, étant donné les variétés qu'il sème, l'agriculteur récolte le blé généralement entre le 1^{er} et le 15 août. Pour chaque demi-décade, le chiffre indiqué correspond au nombre de jours travaillés sur le chantier par l'agriculteur. La dernière ligne du tableau totalise les jours effectivement travaillés par chantier ; le total pour la période analysée est donné au bout de cette ligne.

Le tableau de synthèse établi pour chaque exploitation permet de voir rapidement si, dans les conditions climatiques simulées, l'agriculteur tient son calendrier en réalisant l'ensemble des travaux dans les périodes fixées. Les cellules grisées, en face de demi-décades, indiquent que des journées ont été consacrées à un chantier donné, en dehors de la période de réalisation optimale. Si une case de la dernière ligne est grisée, cela indique que l'ensemble du chantier n'a pas pu être terminé. Pour l'exemple considéré, deux jour ont été consacrés à l'arrachage de pommes de terre entre le 11 et le 15 octobre, soit en dehors de la période optimale, et au total seulement trois jours ont été travaillés pour ce chantier, soit trois jours de moins que le nombre de jours nécessaires.

Lorsque la main d'œuvre est composée de plusieurs personnes, nous avons créé un deuxième tableau similaire. Nous nous sommes limités à deux tableaux dans la mesure où les exploitations enquêtées ne réalisent jamais plus de deux chantiers simultanément. Par conséquent, pour un tableau de synthèse, la main d'œuvre ne correspond pas systématiquement à une personne, mais parfois à un groupe de personnes mobilisées ensemble sur un même chantier.

	<i>Enroulage Lin</i>	<i>Battage Pois</i>	<i>Battage Blé</i>	<i>Semis Colza</i>	<i>Arrachage Pomme de terre</i>	<i>Semis Escourgeon</i>	<i>Semis Blé</i>	<i>Total</i>
Jours nécessaires	4	2	4	1	6	1	6	24
01-05/07	0	0	0	0	0	0	0	0
06-10/07	0	0	0	0	0	0	0	0
11-15/07	0	0	0	0	0	0	0	0
16-20/07	0	0	0	0	0	0	0	0
21-25/07	0	0	0	0	0	0	0	0
26-31/07	0	0	0	0	0	0	0	0
01-05/08	0	2	1	0	0	0	0	3
06-10/08	0	0	1	0	0	0	0	1
11-15/08	0	0	0	0	0	0	0	0
16-20/08	0	0	0	0	0	0	0	0
21-25/08	0	0	0	0	0	0	0	0
26-31/08	0	0	0	1	0	0	0	1
01-05/09	0	0	0	0	0	0	0	0
06-10/09	1	0	2	0	0	0	0	3
11-15/09	2	0	0	0	0	0	0	2
16-20/09	1	0	0	0	1	0	0	2
21-25/09	0	0	0	0	0	0	0	0
26-30/09	0	0	0	0	0	0	0	0
01-05/10	0	0	0	0	0	1	0	1
06-10/10	0	0	0	0	0	0	2	2
11-15/10	0	0	0	0	2	0	0	2
16-20/10	0	0	0	0	0	0	2	2
21-25/10	0	0	0	0	0	0	0	0
26-31/10	0	0	0	0	0	0	2	2
01-05/11	0	0	0	0	0	0	0	0
06-10/11	0	0	0	0	0	0	0	0
11-15/11	0	0	0	0	0	0	0	0
16-20/11	0	0	0	0	0	0	0	0
21-25/11	0	0	0	0	0	0	0	0
26-31/11	0	0	0	0	0	0	0	0
Jours réalisés	4	2	4	1	3	1	6	21

Figure 27 : Tableau récapitulatif d'une simulation de l'organisation du travail (extrait exploitation MDE, climat de l'année 1992)

2.3 Validation des règles d'organisation du travail

2.3.1 Choix de la méthode de validation

Pour valider les règles d'organisation du travail, nous ne disposons pas de relevés des dates de réalisation des chantiers pour les agriculteurs enquêtés. En effet, il aurait fallu disposer de relevés sur plusieurs années climatiques différentes et tous les agriculteurs n'étaient pas en mesure de nous fournir ce type d'information. Une validation des règles par comparaison au réel, comme celle effectuée pour l'organisation spatiale des cultures, n'est pas envisageable et opter pour un autre type d'évaluation s'impose.

D'après ce que nous avons vu précédemment, l'équipement matériel et la main d'œuvre disponible sont globalement corrects dans l'ensemble des exploitations ; dans ces conditions, les agriculteurs ont la possibilité de réaliser tous les chantiers et d'atteindre les objectifs relatifs à la période optimale de réalisation, ceci pour une année climatique favorable. C'est d'ailleurs ce que nous ont rapporté les agriculteurs au cours des enquêtes. En revanche, pour une année climatique défavorable, les agriculteurs ne peuvent pas tous réaliser les différents chantiers comme ils le souhaitent. Pour valider les règles d'organisation du travail, nous avons simulé les calendriers d'organisation du travail pour une année favorable et une défavorable. Des retards dans la réalisation des chantiers devraient donc apparaître dans les simulations de l'année défavorable mais pas dans celle de l'année favorable.

Afin de choisir ces deux années, nous avons effectué une analyse fréquentielle des jours disponibles pour les chantiers de déchaumage et de semis de cultures intermédiaires, entre le 01/08 et le 30/09, car :

- en période d'interculture, ces chantiers correspondent aux interventions culturales qui permettent de limiter le ruissellement ;
- avant le 01/08, on constate peu de concurrence entre chantiers dans le contexte du Pays de Caux ;
- Après le 30/09, l'efficacité des opérations culturales pour diminuer le ruissellement est trop limitée pour présenter un intérêt.

Les données pluviométriques permettant de calculer les jours disponibles sont issues du poste de Saint Laurent-en-Caux qui fait partie du réseau pluviométrique complémentaire de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. Nous l'avons choisi car il est proche du bassin versant de Bourville (5 km) et localisé à l'intérieur du plateau cauchois, ce qui le situe dans la même gamme de pluviométrie annuelle. Pour ce poste, nous disposons de 14 années de relevés quotidiens entre 1987 et 2000.

L'analyse fait ressortir que les deux années les plus favorables sont 1990 et 1991. Nous avons choisi l'année 1990 qui présente 1% de jours disponibles en plus pour les deux chantiers étudiés. Les années les plus défavorables sont 1999 et 1992. Nous avons retenu 1992 bien qu'elle ne soit pas la plus défavorable des deux. Différentes études réalisées dans le Pays de Caux et relatives à l'année 1992 montrent d'importants dégâts liés au ruissellement et à l'érosion, ainsi que des retards dans la réalisation des chantiers, ce qui n'était pas le cas en 1999.

2.3.2 Résultats de la validation

Les résultats des simulations sont rassemblés dans le Tableau 23. Y sont détaillés les jours nécessaires à la réalisation de l'ensemble des chantiers pour la période juillet-novembre ; ils correspondent aux jours durant lesquels de la main d'œuvre de l'exploitation est mobilisée, que ce soit pour des chantiers sur l'exploitation ou des chantiers d'entraide en dehors. Pour les deux années simulées, nous avons reporté : le nombre total de jours manquant pour la réalisation de l'ensemble des chantiers (« non réalisé »), et le nombre total de jours effectivement travaillés, mais en dehors des périodes optimales définies par l'agriculteur (« en dehors des délais »).

Tableau 23 : Résultats des simulations des calendriers d'organisation du travail des 14 exploitations agricoles du groupe A, pour les années climatiques 1990 et 1992					
Exploitation	Jours nécessaires	Année favorable - 1990		Année défavorable - 1992	
		Non réalisé	En dehors des délais	Non réalisé	En dehors des délais
ARO	30	0	0	0	0
FBL	50	0	0	2	4
MDE	42	0	2	3	10
ROL	49	0	2	3	9
RTE	45	0	2	0	8
XDE	44	0	0	0	0
BOL	60	0	0	0	22
JCO	49	0	0	0	19
PCE	51	0	1	2	21
VRO	57	0	3	2	23
GLA	73	0	0	8	28
JMO	94	0	7	16	24
JVO	70	0	0	15	25
MRO	69	0	4	22	24

Les résultats obtenus pour l'année favorable (1990) montrent que tous les agriculteurs réalisent l'ensemble des jours nécessaires pour l'ensemble des travaux, et la moitié peut tenir les délais qu'ils se sont fixés. Sept agriculteurs n'ont pas pu respecter les délais fixés : pour six d'entre eux, le nombre de jour n'ayant pas été réalisés dans les périodes optimales définies

est faible, compris entre un et quatre ; pour un seul agriculteur, sept jours apparaissent hors délais. Pour ce dernier, les arrachages de pomme de terre sont en cause : ils se sont terminés le 15 octobre au lieu du 5 octobre. Pour l'année 1990, nous pouvons donc conclure à un taux correct de réalisation de l'ensemble des chantiers.

Pour la simulation du calendrier dans les conditions climatiques défavorables de l'année 1992, il est possible de différencier trois groupes d'agriculteurs en fonction de la réalisation des chantiers et du respect des délais :

- Un premier groupe composé de six exploitations (ARO, FBL, MDE, ROL, RTE, XDE). Celles-ci réussissent à mener à bien la totalité ou quasi-totalité des chantiers. Pour deux d'entre elles, l'ensemble des chantiers est réalisé dans les délais. Pour les quatre autres exploitations, seuls quelques jours ne sont pas réalisés (trois au maximum), et moins de dix jours sont en dehors des délais. Il est raisonnable de penser que les quelques jours simulés comme non réalisés, l'ont été dans la réalité, les agriculteurs étant moins stricts sur les conditions climatiques nécessaires à la mise en œuvre des chantiers, lorsque du retard apparaît (Papy, 2001). Il s'agit d'exploitations de taille variable (19 à 165 ha de terres labourables) dont la main d'œuvre est largement suffisante pour réaliser les chantiers en conditions climatiques favorables, ce qui leur permet d'être opérationnels pour une année défavorable.
- Un second groupe de quatre exploitations (BOL, JCO, PCE, VRO). Comme les exploitations du premier groupe, ces dernières réalisent la quasi-totalité des chantiers à la différence que les délais ne sont pas toujours respectés ; cela concerne une vingtaine de jours. Ce groupe d'exploitation est plus homogène : il s'agit d'exploitations de taille moyenne (30 à 85 ha) disposant d'une main d'œuvre composée d'une ou deux personnes, et trois d'entre elles ont un atelier d'élevage laitier. La main d'œuvre disponible sur l'exploitation n'étant pas sous-dimensionnée par rapport à la surface en cultures, c'est donc la présence de cet élevage qui explique en partie le retard dans la réalisation des chantiers.
- Le troisième groupe est composé de quatre exploitations (GLA, JMO, JVO, MRO). Celles-ci ont beaucoup de difficultés à réaliser les chantiers et, *a fortiori*, à respecter les délais des périodes optimales : 8 à 22 jours ne sont pas réalisés et 24 à 28 jours sont réalisés en dehors des délais fixés. Ce groupe d'exploitation est également homogène : il s'agit de grandes exploitations (140 à 310 ha) disposant d'une main d'œuvre importante pour la réalisation des travaux de culture durant cette période, 8 personnes pour JMO et trois personnes pour les trois autres exploitations. Mais, bien que la main d'œuvre soit en nombre, des surcharges apparaissent pour certains chantiers importants, surcharges qui se répercutent sur les chantiers suivants en raison des mauvaises conditions climatiques.

Pour l'année 1992, nous observons différents niveaux de réalisation des opérations culturales qui correspondent en grande partie à la main d'œuvre disponible : une main d'œuvre insuffisante signifie un avancement moindre des chantiers. Si l'exploitation a en plus recours à l'entraide, les journées à rendre pour venir en renfort dans d'autres exploitations augmentent d'autant la charge de travail. L'équipement est dans l'ensemble peu limitant par sa disponibilité, mais peut parfois être à l'origine d'une moindre vitesse de travail. Enfin, les itinéraires techniques ont une importance. En particulier, certains agriculteurs déchaument systématiquement alors que d'autres laissent le sol en l'état après la récolte, ce qui diminue la charge de travail.

2.3.3 Conclusion : une modélisation de l'organisation du travail « pessimiste »

Les résultats des simulations des calendriers d'organisation du travail pour les années 1990 et 1992 permettent de conclure à une modélisation correcte de l'organisation du travail. En effet, nous observons bien, pour l'année climatique favorable, une réalisation complète et dans les délais pour la quasi-totalité des chantiers, ceci pour les 14 exploitations. A l'inverse, nous observons, pour l'année climatique défavorable, une diversité des calendriers simulés, allant d'une réalisation complète des chantiers à de nombreux jours non réalisés et en dehors des délais.

Rappelons toutefois que notre modélisation de l'organisation du travail est « pessimiste », ceci en raison des simplifications faites pour l'élaboration de la feuille de calcul Excel :

- un chantier ne peut commencer que lorsqu'un autre chantier est entièrement terminé. Or, les agriculteurs, s'ils en ont la possibilité, débutent le second chantier dès lors qu'une surface suffisante a déjà été libérée par le premier chantier ;
- nous n'avons pas modélisé les règles d'organisation du travail correspondant à des situations de retard, en raison desquelles l'agriculteur peut changer l'ordre de priorité entre les chantiers, et assouplir ses exigences envers les conditions climatiques nécessaires pour réaliser certains chantiers.

C'est pourquoi, les contraintes d'organisation du travail sont probablement surestimées par rapport à la réalité.

3 Synthèse et discussion : quelles marges de manœuvre ?

La discussion qui suit porte sur la vérification de la première hypothèse formulée, à savoir : « *d'une exploitation à l'autre, les marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture varient, et il est possible d'identifier différents types d'exploitations sur la base de ces marges* »

de manœuvre ». Nous examinons les conditions qui permettent de dégager des marges de manœuvre et les types d'exploitations qui peuvent être définis en fonction de ces marges de manœuvre. A partir de là, nous proposons une méthode d'identification des marges de manœuvre. Nous considérerons ces différents points en abordant successivement le cas de la localisation spatiale des cultures et celui des itinéraires techniques et de l'organisation du travail.

3.1 Modification de la localisation spatiale des cultures

3.1.1 Conditions d'existence de marges de manœuvre pour modifier la localisation spatiale des cultures

Les marges de manœuvre permettant de modifier l'organisation spatiale des cultures résultent de la combinaison entre un niveau de contrainte lié aux règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation, et des choix de l'agriculteur quant aux cultures de l'assolement et quant à sa manière de concevoir les successions culturales. A partir de ces critères, nous proposons un principe de classification des exploitations, principe que nous appliquons à celles du bassin versant de Bourville.

3.1.1.1 Niveau de contraintes des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation

Les contraintes à la localisation des cultures au sein de l'exploitation agricole sont liées à la zone cultivable des cultures et aux règles de succession culturale, à savoir délai de retour et précédents culturaux :

- plus le milieu et la structure du territoire d'exploitation réduisent la zone cultivable de chacune des cultures de l'assolement, plus les possibilités de modifier la localisation spatiale des cultures sont réduites ;
- les règles de succession culturale déterminent, une année donnée, les cultures qu'il est possible d'implanter sur une parcelle donnée. Ces règles sont parfois strictes, imposant un délai de retour fixe et un précédent culturel unique pour une culture donnée ; elles s'avèrent alors très contraignantes pour proposer des modifications de l'organisation spatiale des cultures. Par exemple, pour le lin, la règle de délai de retour fixe de six ans, et l'unique précédent culturel autorisé, le blé, obligent l'agriculteur à positionner le lin sur certaines parcelles précises chaque année. A l'inverse, des règles plus souples offrent davantage de possibilités d'implantation d'une culture sur des parcelles différentes. C'est le cas pour la betterave sucrière avec un délai de retour de 5 ou 6 ans et trois précédents culturaux possibles : escourgeon, lin, blé.

En combinant ces deux critères, nous définissons trois niveaux de contraintes à une modification de la localisation spatiale des cultures (Tableau 24). Les contraintes sont d'autant plus fortes que les zones cultivables sont restreintes et les règles de succession de cultures rigides.

Tableau 24 : Niveaux de contraintes à une modification de l'organisation spatiale des cultures résultant des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation			
		Délais de retours et précédents cultureux	
		Rigides	Souples
Zones cultivables	Restreintes	Contraintes fortes	Contraintes intermédiaires
	Etendues	Contraintes intermédiaires	Contraintes faibles

3.1.1.2 Contraintes découlant de choix de l'agriculteur

Deux facteurs peuvent limiter les possibilités de varier les motifs de succession culturale et donc de modifier l'agencement spatial des cultures :

- la diversité des cultures dans l'assolement. Plus la diversité des cultures est importante, plus il y a de possibilités de construire des successions culturales différentes, à condition que les règles le permettent. A l'inverse, une faible diversité de cultures, même si les règles de succession culturale sont souples, limite le nombre de successions culturales différentes.
- la manière dont l'agriculteur met en œuvre ses successions culturales. Si elles sont planifiées à l'avance, nous ne pouvons pas dégager de possibilité de modifications des successions de cultures. Il faut que ces dernières ne soient pas appliquées automatiquement d'une année sur l'autre, mais que l'implantation des cultures sur chaque parcelle soit décidée annuellement.

3.1.1.3 Proposition d'une classification

En croisant les contraintes de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation, le type de mise en œuvre des successions culturales ainsi que la diversité des cultures de l'assolement, nous identifions différents niveaux de marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures (Tableau 25). Si les successions culturales sont planifiées, il n'y a alors aucune marge de manœuvre quelles que soient les contraintes à la localisation des cultures et la diversité des cultures dans l'assolement. Dans le cas contraire, nous distinguons quatre niveaux de marges de manœuvre :

- aucune marge de manœuvre si les contraintes de localisation des cultures sur le territoire d'exploitations sont fortes ;
- marges de manœuvre faible lorsque les contraintes de localisation sont intermédiaires mais la diversité des cultures faible ;
- marges de manœuvre intermédiaires si les contraintes de localisation sont intermédiaires et la diversité des cultures importante, ou si les contraintes de localisation sont fortes et la diversité des cultures faible ;
- marges de manœuvre importantes lorsque nous sommes face, à la fois, à de faibles contraintes de localisation et à une large diversité des cultures.

				Contraintes découlant des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation		
				Faibles	Intermédiaires	Fortes
Mise en œuvre des successions culturelles	Annuelle	Diversité des cultures	Importante	Importantes	Intermédiaires	Aucune
			Faible	Intermédiaires	Faibles	
	Planifiée		Importante	Aucune		
			Faible			

Bien que notre analyse ne nous permette pas de fixer des bornes aux différentes catégories de marge de manœuvre identifiées, nous avons néanmoins pu classer les 14 exploitations agricoles principales du bassin versant de Bourville, celles-ci présentant des caractéristiques très contrastées. Elles se répartissent dans trois des quatre catégories de marges de manœuvre (Tableau 26) :

- quatre exploitations ne disposent d'aucune marge de manœuvre car elles planifient leurs successions culturelles sur plusieurs années ;
- quatre exploitations disposent de marges de manœuvre faibles : pour deux d'entre elles, la diversité des cultures est faible (plus de 90% de cultures céréalières : blé, escourgeon et maïs), et pour deux autres, les agriculteurs font face à des contraintes pour changer la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation (parcellaire très dispersé dans un cas, 50% des terres labourables situées entre 3 et 18 km du corps de ferme, et règles de succession rigides dans l'autre cas, notamment du fait du respect d'un délai de retour de trois ans strict pour le blé).

- six exploitations ont des marges de manœuvre importantes ; celles-ci s'expliquent, en particulier, par les règles de successions culturales appliquées qui permettent de combiner des motifs de blé de deux ans et de trois ans.

Tableau 26 : Marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures : classement des 14 exploitations principales du bassin versant de Bourville						
				Contraintes découlant des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation		
				Faibles	Intermédiaires	Fortes
Mise en œuvre des successions culturales	Annuelle	Diversité des cultures	Importante	Importantes ARO – JMO – JVO RTE – VRO – XDE	Intermédiaires JCO – MDE	Aucune
			Faible	Intermédiaires FBL – PCE	Faibles	
	Planifiée		Importante	Aucune BOL – ROL – GLA – MRO		
			Faible			

3.1.2 Différentes possibilités d'augmenter les marges de manœuvre

Pour définir les marges de manœuvre pour modifier la localisation spatiale des cultures, nous avons considéré, dans le cadre de cette étude, l'ensemble des contraintes que se fixent les agriculteurs, sans les remettre en cause. L'avantage de cette approche est que les modifications que nous proposerons devraient être facilement acceptées par les agriculteurs. Cependant, ce choix nous a conduits à considérer que des agriculteurs ayant planifié à l'avance leurs successions de cultures, ne disposait d'aucune marge de manœuvre. De fait, pour ces agriculteurs, chaque culture a un délai de retour strict et un seul précédent possible. Mais ces règles ne résultent pas seulement de contraintes agronomiques : de ce point de vue d'autres possibilités seraient envisageables (en particulier les possibilités observées chez les agriculteurs ne planifiant pas leurs successions de cultures sur plusieurs années). Par simplification, ces agriculteurs en ont sélectionné certaines qu'ils appliquent systématiquement. Un travail pourrait être mené dans les exploitations concernées : nous pourrions proposer aux agriculteurs de ne plus appliquer systématiquement la même succession culturale, mais de diversifier les successions en appliquant les règles de succession identifiées chez les autres agriculteurs. Nous diminuerions ainsi le niveau de contrainte et augmenterions les marges de manœuvre.

Par ailleurs, il serait possible de générer davantage de marge de manœuvre chez l'ensemble des agriculteurs en ne se basant plus uniquement sur les règles de successions culturales (délai de retour et précédents culturaux) identifiées lors des enquêtes, mais en utilisant toutes les possibilités offertes par les cultures présentes dans les assolements. Prenons l'exemple de

l'escourgeon que tous les agriculteurs positionnent uniquement après le blé et que nous avons donc considéré comme une culture exigeante vis-à-vis du précédent cultural. D'un point de vue agronomique, l'escourgeon n'est pas une culture exigeante : elle peut être implantée après beaucoup d'autres cultures. Dans le bassin versant étudié, les agriculteurs ne le font pas tenant compte, en premier lieu, des autres cultures présentes dans les assolements, cultures plus exigeantes que l'escourgeon. En cherchant à valoriser au mieux les effets des cultures successives, ils positionnent l'escourgeon dans leurs successions en dernier. Mais ce choix pourrait être reconsidéré pour des raisons d'effet de voisinage d'une culture sur une autre dans une optique environnementale.

3.2 Modification des itinéraires techniques

3.2.1 Evaluation des marges de manœuvre sur la base de paramètres simples

Comme nous l'avons fait pour les marges de manœuvre relatives à la modification de la localisation spatiale des cultures, nous avons cherché à caractériser les marges de manœuvre pour modifier les itinéraires techniques sur la base de paramètres simples. Les deux paramètres qui nous semblent les plus importants sont : la surface en terres labourables et la main d'œuvre disponible sur l'exploitation durant la période de juillet à novembre²⁴. Nous les avons combinés au sein du ratio « nombre d'hectare de terres labourables par unité de main d'œuvre (ha/UTA) ». Nous avons testé la pertinence de ce ratio en le confrontant au classement des exploitations obtenu lors de la simulation du calendrier d'organisation du travail pour l'année climatique défavorable (1992). Cette simulation nous avait permis d'identifier trois types d'exploitations en fonction de la réalisation de l'ensemble des chantiers prévus et du respect des périodes optimales de réalisation (paragraphe 2.3.2 p. 140). Dans le Tableau 27, nous avons reporté les deux paramètres et le ratio correspondant à chaque exploitation, en classant celles-ci selon les trois types mentionnés.

L'examen du tableau montre que le ratio « TL/MO » ne reflète pas le classement précédent. En effet, les deux exploitations ayant le moins de terres labourables à travailler (PCE et FBL, avec respectivement 16 et 21,5 ha par UTA), se classent différemment sur la base de la simulation 1992 : FBL fait partie effectivement du groupe réalisant sans problème l'ensemble des chantiers (« sans retard ») mais PCE fait partie des agriculteurs ayant des retards importants. A l'opposé, les agriculteurs ayant le plus d'hectares à travailler par UTA (MDE et JCO, avec respectivement 82 et 65,5 ha par UTA), ne se classent pas dans le groupe d'agriculteurs qui n'arrivent pas à réaliser l'ensemble des chantiers (« chantiers non réalisés »). Au contraire, MDE fait partie du groupe « sans retard ». En fait, si nous regardons

²⁴ A cette période chargée, certains agriculteurs s'organisent pour avoir un stagiaire ou un apprenti.

les quatre agriculteurs du groupe « chantier non réalisés » (GLA, JMO, JVO, MRO), il s'agit d'agriculteurs ayant une surface de terre labourable par UTA intermédiaire.

Tableau 27 : Indicateurs de marges de manœuvre, laissées par l'organisation du travail, pour modifier les itinéraires techniques				
Exploitations		Terres labourables (TL en ha)	Main d'œuvre (MO en UTA)	Ratio TL/MO
Faible retard	ARO	58	1	58
	FBL	21,5	1	21,5
	MDE	164,5	2	82
	ROL	104	2	52
	RTE	44	1,5	29,5
	XDE	89,5	2,5	36
Retard important	BOL	71	2	36
	JCO	65,5	1	65,5
	PCE	24	1,5	16
	VRO	86,5	1,5	57,5
Chantiers non réalisés	GLA	140,5	3	47
	JMO	300*	8	37,5
	JVO	161,5	3	54
	MRO	154,5	3	51,5

* Surface en terres labourables comprenant les sous-locations en pomme de terre

Cette analyse montre qu'il convient de considérer d'autres paramètres pouvant moduler de manière importante les indicateurs de surface et de main d'œuvre. Deux de ces paramètres sont liés à la main d'œuvre et au matériel :

- la disponibilité de la main d'œuvre peut être fortement réduite par les activités d'élevage. Ainsi, pour l'agriculteur PCE, 75% de la main d'œuvre est affectée à l'élevage (traite, soin des animaux). A l'opposé, la main d'œuvre de l'exploitation MDE est composée du chef d'exploitation et d'un salarié. Durant les pointes de travail, ce dernier fait des heures supplémentaires et travaille les samedis et dimanches si nécessaire. La main d'œuvre est ainsi disponible 100% du temps.
- le type de matériel, en particulier la largeur de travail. Si nous reprenons les deux mêmes exploitations, PCE est équipé en matériel travaillant le sol sur une largeur de 3 m et pour les épandages d'engrais et les traitements phytosanitaires, le pulvérisateur est équipé d'une rampe de 12 mètres. MDE, lui bénéficie d'un matériel de travail du sol de 4 mètres et un pulvérisateur d'une largeur de 28 mètres.

Pour les exploitations PCE et MDE, la disponibilité en main d'œuvre et le type de matériel expliquent pourquoi MDE a plus de facilités à réaliser l'ensemble des chantiers que PCE, bien qu'il ait quatre fois plus de surface de terres labourables par UTA.

Deux autres paramètres sont liés aux itinéraires techniques et à l'assolement de l'exploitation :

- les itinéraires techniques mis en place pour chaque culture peuvent inclure plus ou moins d'opérations culturales et donc représenter une charge en travail plus ou moins élevée. Pour le blé, le choix de la variété a aussi une influence. S'il s'agit de blé tardif se récoltant à partir du 15 août, le moindre aléa climatique repousse la récolte en septembre. Dans le cas de blés précoces se récoltant début août, la souplesse est plus importante puisqu'un report de la récolte est possible, sans que cela désorganise l'ensemble de l'organisation du travail.
- l'assolement de l'exploitation peut engendrer des pointes de travail ou au contraire répartir la charge en travail. En particulier, si une part de l'assolement correspond à de l'escourgeon et du colza, une partie des récoltes a lieu en juillet, mois en général peu chargé, ce qui réduit d'autant la charge en travail du mois d'août. Si l'agriculteur ne cultive ni escourgeon ni colza, il y a alors plus de blé et le pois sont récoltés en août. De même, la présence de pomme de terre implique une forte charge de travail pour la récolte. Pour l'exploitation JMO, sur les 300 ha de terres labourables, 100 ha sont emblavés en pommes de terre, cause principale de la perturbation de l'organisation du travail et des retards pour l'année 1992.

Evaluer les marges de manœuvre laissées par l'organisation du travail pour modifier les itinéraires techniques à partir de simples indicateurs caractérisant l'exploitation est difficile. Il est nécessaire de combiner différents paramètres en tenant compte de la position dans le temps des chantiers. Nous devons donc recourir à la simulation du calendrier d'organisation du travail, et évaluer ainsi les jours encore disponibles après réalisation des chantiers prévus par l'agriculteur, en combinant les différents paramètres. C'est ce que nous présentons dans le paragraphe suivant.

3.2.2 Evaluation des marges de manœuvre à partir d'une simulation

Pour l'évaluation des règles d'organisation du travail, nous avons classé les 14 années climatiques disponibles (1987-2000) sur la base des jours disponibles pour les interventions d'interculture (déchaumage et semis) et nous avons choisi les deux années extrêmes. Ce même classement nous permet ici de sélectionner l'année qui servira à l'analyse des marges de manœuvre laissées par l'organisation du travail et que nous souhaitons représentative d'une année climatique médiane. En effet, l'évaluation des règles d'organisation du travail montre qu'en année climatique très humide, la majorité des agriculteurs n'a pas le temps de

réaliser l'ensemble des chantiers dans les délais, et par conséquent ne dispose pas de jours disponibles pour traiter les intercultures dans de bonnes conditions. A l'opposé, une année climatique très favorable permet de terminer l'ensemble des chantiers dans de bonnes conditions et laisse ainsi du temps, après les récoltes, pour intervenir sur les intercultures, là aussi dans de bonnes conditions. Nous privilégions pour notre analyse une situation intermédiaire, où, a priori, les disponibilités pour les travaux d'interculture peuvent être plus variables d'une exploitation à l'autre. Sur l'ensemble de nos données, nous avons retenu l'année climatique 1998, médiane pour les de semis et de déchaumage, contrairement aux années 1988 et 1995 (Tableau 28).

Tableau 28 : Classement des années climatiques sur la base des jours disponibles pour les chantiers de semis et déchaumage (% du nombre total de jour entre le 01/08 et le 30/09)			
Chantier de déchaumage		Chantier de semis	
Année	Jours disponibles	Année	Jours disponibles
1999	62	1999	51
1992	64	1992	61
1994	75	1994	69
1993	77	1993	70
1987	77	1987	72
1988	77	1995	72
Années médianes	1995	1988	75
	1998	1998	75
	2000	2000	79
	1997	1997	82
	1989	1989	85
	1996	1996	87
	1991	1991	89
	1990	1990	90

Nous avons simulé les calendriers d'organisation du travail des 14 exploitations pour l'année climatique 1998, et évalué le nombre de jours disponibles pour des travaux visant à limiter le ruissellement. Nous avons considéré le chantier de semis d'une culture intermédiaire qui est plus exigeant que le chantier de déchaumage. Les jours disponibles correspondent donc aux jours durant lesquels il est possible d'intervenir et qui ne sont occupés par un chantier prévu par l'agriculteur. Ceci nous donne ainsi une indication des marges de manœuvre pour modifier les itinéraires techniques. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 29.

Pour analyser les possibilités d'insertion de travaux visant à limiter le ruissellement, nous avons distingué les jours disponibles au mois d'août et au mois de septembre. En effet, ceux du mois d'août sont moins utiles dans la mesure où une grande partie des terres n'est pas encore libérée pour réaliser des interventions de gestion de l'interculture. Sur cette base, nous pouvons classer les agriculteurs en trois groupes :

- les agriculteurs qui disposent de peu de jours disponibles, entre un et six au total, et jamais plus de trois en septembre : BOL, GLA, JMO, JVO. Pour eux, les marges de manœuvre sont faibles. Nous pouvons aussi classer dans ce groupe les agriculteurs VRO et MRO qui ont de nombreux disponibles au mois d'août, alors qu'aucune récolte n'est achevée mais qui en dispose peu voire pas du tout en septembre alors qu'ils sont réellement utiles à cette période.
- les agriculteurs dont le nombre de jours disponibles est globalement élevé, mais majoritairement au mois d'août : ARO, MDE, XDE. Dans ces exploitations, les marges de manœuvre sont intermédiaires, car mal réparties.
- les agriculteurs qui disposant d'un nombre important de jours disponibles, ceux-ci étant répartis de façon égale sur les deux mois (FBL et ROL) ou majoritairement au mois de septembre (JCO, PCE, et RTE). Les marges de manœuvre sont alors importantes.

Tableau 29 : Jours disponibles pour des chantiers de semis de culture intermédiaire entre le 1^{er} août et le 30 septembre après réalisation des opérations prévues par l'agriculteur (récoltes, semis, déchaumages éventuels, etc.)

Exploitation	Du 01/08 au 31/08	Du 01/09 au 30/09	Total
ARO	13	10	23
BOL	4	2	6
FBL	6	6	12
GLA	4	0	4
JCO	3	11	14
JMO	1	0	1
JVO	2	3	5
MDE	9	7	16
MRO	17	2	19
PCE	8	11	19
ROL	8	8	16
RTE	6	10	16
VRO	16	0	16
XDE	10	7	17

Il faut noter toutefois que l'existence ou non de marges de manœuvre est à mettre en relation avec la nécessité de modifier les itinéraires techniques. Certains agriculteurs peuvent ne pas avoir de marge de manœuvre, mais déjà appliquer des itinéraires techniques incluant des opérations limitant le ruissellement.

3.3 Conclusion : des marges de manœuvre contrastées

En conclusion de cette partie, nous pouvons affirmer que la première hypothèse que nous avons formulée est vérifiée : des marges de manœuvre existent pour modifier les systèmes de

culture, que ce soit pour la localisation spatiale des cultures ou les itinéraires techniques. Nous avons pu différencier différents niveaux de marge de manœuvre, et distinguer différents types d'exploitation sur la base de ces marges de manœuvre, pour chacune des composantes des systèmes de culture considérées. Il nous est possible alors de proposer une classification des exploitations en fonction des deux catégories des marges de manœuvre (Tableau 30).

Tableau 30 : Classification des exploitations sur la base des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture				
		Marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures		
		Aucune	Intermédiaires	Importantes
Marges de manœuvre pour modifier les itinéraires techniques	Faibles	BOL – MRO GLA		JMO – JVO
	Intermédiaires		MDE	ARO – VRO XDE
	Importantes	ROL	JCO – FBL PCE	RTE

Trois agriculteurs ne disposent pas de marge de manœuvre pour modifier les systèmes de culture (BOL, MRO, GLA) et à l'opposé un agriculteur peut s'appuyer sur d'importantes marges de manœuvre pour modifier l'ensemble des systèmes de culture (RTE). Les dix autres agriculteurs sont dans des situations intermédiaires disposant de davantage de marges de manœuvre pour modifier une composante que l'autre : la localisation spatiale des cultures (JMO, JVO, ARO, VRO, XDE), les itinéraires techniques (ROL, JCO, FBL, PCE). Quant à l'agriculteur MDE, il est limité à des marges de manœuvre intermédiaires pour modifier l'un ou l'autre composante des systèmes de culture.

Conclusion du chapitre

Nous sommes partis du constat qu'il existe des moyens de réduire le ruissellement à l'échelle du bassin versant par les pratiques agricoles, mais que les contraintes à la mise en œuvre de telles pratiques au sein de l'exploitation agricole sont peu étudiées. Suite à l'enquête de l'ensemble des agriculteurs travaillant les terres du bassin versant de Bourville, nous avons analysé les contraintes liées à une modification de la localisation spatiale des cultures, et celles liées à une modification des itinéraires techniques. Nous avons cherché à comprendre les règles d'allocation des facteurs de production au sein de l'exploitation, puis, à partir de ces règles, nous en avons déduit des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture.

L'analyse des règles d'allocation des facteurs de production nous a permis d'en déduire des modèles communs à l'ensemble des exploitations :

- modèle de succession culturale, basée sur la répétition de deux motifs de base et respectant des délais de retour spécifiques à chaque culture. L'existence d'un modèle commun est liée à une grande homogénéité du milieu, très favorable pour toutes les exploitations, et à des territoires d'exploitation présentant dans l'ensemble de faibles contraintes. Les successions mises en œuvre sur chaque exploitation sont ensuite différentes du fait de l'assolement défini et des différentes combinaisons des deux motifs de bases possibles.
- modèle de calendrier d'organisation du travail pour la période allant du mois de juillet au mois de novembre inclus. Ce calendrier est caractérisé par l'alternance de périodes faiblement et fortement chargées. Durant ces dernières, nous avons pu définir des règles communes de priorité entre les chantiers qui doivent être réalisés simultanément. Ce calendrier commun se décline différemment dans chaque exploitation du fait des cultures de l'assolement et des itinéraires techniques appliqués.

Une comparaison des assolements et des règles réellement appliquées par les agriculteurs aux règles formalisées à partir des enquêtes, ainsi qu'une simulation de l'organisation travail pour des conditions climatiques extrêmes, nous ont permis de valider l'ensemble de ces règles.

Nous avons alors proposé une méthode d'identification des marges de manœuvre et défini différents niveaux de marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture. Concernant la localisation spatiale des cultures, les marges de manœuvre dépendent de la souplesse des règles de succession culturale, mais aussi de la planification à l'avance ou non des successions. Une planification sur plusieurs années ne laisse aucune possibilité de modifier la localisation spatiale des cultures une année donnée. Enfin, la diversité des cultures de l'assolement module les marges de manœuvre, offrant plus de possibilités de construire des

successions culturales différentes lorsqu'elle est importante. Concernant l'organisation du travail et la modification des itinéraires techniques, c'est bien entendu la main d'œuvre disponible et le type de matériel en comparaison de la charge de travail qui sont déterminantes. La diversité des cultures de l'assolement a aussi un rôle : elle permet d'augmenter les marges de manœuvre en étalant la charge de travail sur une plus grande période. La diversité des cultures de l'assolement permet donc d'augmenter à la fois les marges de manœuvre pour modifier la localisation spatiale des cultures et celles pour modifier les itinéraires techniques.

Au final, nous avons pu classer les 14 exploitations principales du bassin versant de Bourville selon l'existence et l'importance des marges de manœuvre. Ce classement montre que la majorité des exploitations dispose de marges de manœuvre pour modifier ses systèmes de culture dans l'objectif de réduire le ruissellement mais elles ne sont souvent pas équivalentes selon que nous considérons la localisation spatiale des cultures ou les itinéraires techniques. Seules trois exploitations n'ont aucune marge de manœuvre pour modifier leurs systèmes de culture. Pour ces exploitations en particulier et aussi pour l'ensemble des exploitations, il serait néanmoins envisageable d'augmenter les marges de manœuvre permettant de modifier l'organisation spatiale des cultures, en ne considérant plus seulement les règles de succession de cultures des agriculteurs, mais en se basant sur des règles strictement agronomiques.

CHAPITRE 5

**Réduire le ruissellement érosif
en modifiant les systèmes de culture
à l'échelle du bassin versant**

Chapitre 5 : Réduire le ruissellement érosif en modifiant les systèmes de culture à l'échelle du bassin versant

L'analyse de la constitution des systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole, réalisée sur les 14 exploitations principales du bassin versant de Bourville, nous a permis de mettre en évidence qu'il existe des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture. Dans ce chapitre, l'objectif est d'explorer l'ensemble des marges de manœuvre des exploitations du bassin versant de Bourville pour proposer différentes configurations du bassin, celles-ci résultant de la modification des systèmes de culture à l'échelle des exploitations agricoles. L'effet sur le ruissellement érosif de ces différentes configurations est évalué à l'aide du modèle STREAM comme pour le diagnostic (chapitre 3).

1 Principes de modifications des systèmes de culture

Nous cherchons à élaborer différentes configurations du bassin versant de Bourville, à partir de modifications des systèmes de culture, pour l'année 2002 (campagne culturale 2001-2002), connaissant les cultures implantées dans chaque exploitation entre 1996 et 2001. Si l'évaluation principale porte sur la réduction du ruissellement en 2002, nous souhaitons nous assurer qu'elle n'engendre pas de répercussions négatives l'année suivante. Sur la base du diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif (chapitre 3), nous choisissons de centrer notre recherche de solutions sur la réduction du ruissellement hivernal : en dehors des conditions orageuses du printemps, les volumes d'eau ruisselant à cette période de l'année sont bien inférieurs à ceux produits en hiver. Ce diagnostic nous a aussi permis de souligner l'importance du point retenu pour l'évaluation de la réduction du ruissellement. Dans le bassin versant de Bourville, les dégâts majeurs se produisant à l'aval, l'exutoire apparaît donc comme le point pertinent.

Avant d'envisager des changements d'itinéraires techniques en interculture, il est impératif de connaître l'assolement du bassin versant pour savoir les surfaces par type d'interculture que chaque agriculteur doit gérer, l'année étudiée. Cependant, une des conclusions du chapitre 3 est que l'effet de la répartition spatiale des états de surface sur le ruissellement érosif dépend du niveau d'infiltration associé à ces états. Si nous n'analysons pas au préalable les possibilités de modifications des techniques culturales d'interculture, nous ne pouvons pas connaître les infiltrations associées. Néanmoins, les infiltrations potentielles des intercultures sont toujours supérieures ou égales à celles des cultures d'hiver : il est donc possible de les positionner les unes par rapport aux autres. C'est pourquoi, dans cette partie, nous détaillons la méthode suivie pour modifier les deux composantes des systèmes de culture : la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation, puis les itinéraires techniques en interculture.

1.1 Modification de la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation

Les parcelles du bassin versant peuvent être classées en deux catégories, selon qu'à l'échelle de leur exploitation d'appartenance, elles sont groupées dans le bassin ou isolées, l'ensemble des autres parcelles de l'exploitation se situant dans d'autres bassins versants. L'ensemble des parcelles groupées appartient aux 15 agriculteurs exploitant la majeure partie du bassin versant (groupe A) et occupent 90% des terres arables ; les parcelles isolées qui en occupent 11%, appartiennent aux 11 autres agriculteurs, dont la majeure partie de l'exploitation est en dehors du bassin versant (groupe B). En outre, aucun de ces 11 agriculteurs n'exploite plus de 15 ha de terres labourables dans le bassin versant.

Pour les parcelles isolées, nous ne cherchons pas à modifier la succession de cultures ni l'itinéraire technique appliqué car, pour ces agriculteurs du groupe B, elles ne sont pas prioritaires. Leur objectif serait plutôt de modifier l'organisation spatiale des cultures sur leurs parcelles principales, situées dans d'autres bassins versants. Pour les parcelles isolées du bassin versant de Bourville, nous avons donc décidé d'adopter une configuration qui majore le risque de ruissellement, en leur affectant une infiltration minimale de 2 mm/h. L'infiltration réelle résultant du choix de l'agriculteur sur la parcelle, ne peut qu'être supérieure ou égale à cette infiltration. Dans le cas particulier où les règles de l'agriculteur permettent de prédire avec quasi-certitude la culture à implanter sur une parcelle donnée, alors nous lui affectons l'infiltration associée à cette culture.

Nous pouvons appliquer cette même hypothèse majorant le risque de ruissellement aux parcelles appartenant aux agriculteurs du groupe A isolées sur d'autres bassins. L'affectation des cultures aux parcelles du bassin versant de Bourville peut ainsi être conduite sans tenir compte des conséquences sur les parcelles situées dans d'autres bassins versants dans la mesure où elles sont bien isolées. Pour vérifier cela, nous appliquons les règles qui découlent de l'analyse du parcellaire du bassin versant de Bourville. Pour un bassin versant donné, la somme des surfaces des parcelles isolées ne doit pas excéder 10% des terres labourables du bassin et la surface totale des parcelles isolées d'une même exploitation ne doit pas dépasser 15 ha.

Pour les parcelles principales du bassin versant²⁵, nous procédons par tris successifs, en 4 étapes :

1. Dans le chapitre 4, nous avons formalisé, pour chaque exploitation agricole, les règles d'affectation des cultures aux parcelles (zone cultivable, délai de retour et précédent cultural). Connaissant l'historique des cultures entre 1996 et 2001, ces règles nous permettent de déterminer, pour 2002, les différentes cultures possibles sur chaque parcelle du bassin versant. Il est alors possible de distinguer les parcelles pour lesquelles le choix se limite à une culture, des parcelles pour lesquelles plusieurs cultures sont envisageables.
2. Lorsque, pour une parcelle, plusieurs cultures sont permises, deux cas de figure sont possibles selon que le choix effectué a ou non des conséquences sur le ruissellement en hiver. Pour cela, nous nous basons sur le niveau d'infiltration potentielle des différentes occupations du sol. Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant (1.2.1 p. 159), l'infiltration potentielle de l'interculture est fonction du précédent cultural. Par conséquent, si le choix des cultures est réduit à des cultures de printemps, alors la parcelle sera en interculture durant l'hiver et, quel que soit le choix de la culture à implanter,

²⁵ Concernant les parcelles appartenant à l'agriculteur non enquêté, nous procédons comme pour le diagnostic (chapitre 3) : nous leur affectons l'infiltration potentielle minimale de 2 mm/h afin de ne pas minimiser le volume d'eau ruisselée.

l'infiltration sera la même, le précédent étant fixe. De même, le choix entre différentes cultures d'hiver conduira à une infiltration équivalente.

3. A l'étape précédente, nous avons identifié les parcelles pour lesquelles la culture envisagée avait une répercussion sur le ruissellement. Parmi celles-ci, nous recherchons celles pour lesquelles la culture est automatiquement fixée du fait du respect de l'assolement des exploitations. Même si plusieurs cultures sont possibles sur une parcelle, nous devons parfois nous limiter à une seule culture afin qu'il en soit implantée une surface suffisante pour l'ensemble de l'exploitation. La règle adoptée est : la sole de chaque culture n'est ni supérieure ni inférieure aux soles observées entre 1996 et 2001. Cette étape permet d'effectuer un troisième tri et d'identifier les parcelles dont l'affectation des cultures peut être réfléchiée uniquement en fonction des répercussions sur le ruissellement, celle-ci respectant à la fois les règles de succession culturale et les soles de chaque culture dans les exploitations étudiées.
4. Enfin, parmi les parcelles repérées à l'étape 3, nous distinguons encore deux types de parcelles selon que le choix de la culture a des conséquences ou non sur celui d'autres parcelles de l'exploitation, situées sur le bassin versant. Lorsque ce n'est pas le cas, nous cherchons à proposer, pour la parcelle considérée, une culture maximisant l'infiltration potentielle. Pour certaines parcelles du bassin, le choix d'une culture interfère avec celui d'autres parcelles du même bassin : cela tient au respect de l'assolement moyen de l'exploitation. Dans ce cas-là, il n'est pas possible de maximiser l'infiltration potentielle sur toutes les parcelles simultanément. Afin de réduire le plus efficacement possible le ruissellement, nous positionnons les cultures conduisant à une infiltration importante, sur des parcelles situées à l'aval de parcelles ruisselantes caractérisées par un ruissellement diffus, afin que celui-ci soit absorbé sur une plus grande surface. Le schéma simplifié (Figure 28) illustre cette situation dans sa partie gauche : la parcelle B reçoit de manière diffuse le ruissellement de la parcelle A. Sur la droite, le ruissellement de la parcelle A est concentré dans l'axe d'un talweg et, même si la parcelle B a une capacité d'infiltration est importante, elle n'absorbe qu'une faible quantité d'eau provenant de la parcelle A.

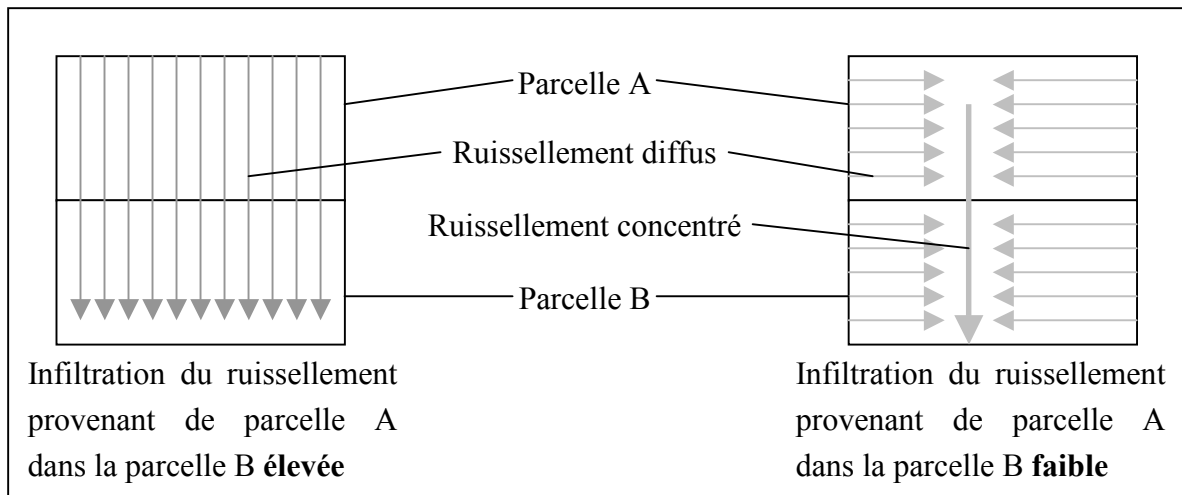


Figure 28 : Ruissellement diffus et ruissellement concentré

A partir de là, il est donc possible d’imaginer différents assolements du bassin versant minimisant le ruissellement. Nous pouvons aussi maximiser le ruissellement, en appliquant les principes d’affectation des cultures aux parcelles, de manière opposée : maximiser les surfaces ruisselantes et positionner les surfaces infiltrantes à l’amont de celles-ci. Comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre, construire un assolement de bassin versant maximisant le ruissellement nous est utile pour disposer d’un point de comparaison. Dans ce chapitre le terme « assolement de bassin versant » comprend donc à la fois la surface de chaque culture dans le bassin et la localisation des cultures sur chacune des parcelles.

1.2 Modification des itinéraires techniques en interculture

Nous devons tout d’abord définir les techniques culturales d’interculture à tester et le temps nécessaire à leur réalisation. Sur cette base, il nous est alors possible d’analyser si l’organisation du travail de chaque exploitation permet ou non de mettre en œuvre ces techniques culturales.

1.2.1 Techniques culturales testées

1.2.1.1 Choix des techniques culturales

Dans le chapitre 3, nous avons analysé l’effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif, en particulier l’effet des techniques culturales d’interculture : l’infiltration potentielle durant la période hivernale est comprise entre 2 et 20 mm/h (cf. Tableau 16 p. 94). Les données établies au chapitre 3 nous permettent de repérer les techniques culturales qui maximisent l’infiltration potentielle en fonction du précédent :

- *Céréales à paille* : déchaumage à socs, infiltration potentielle de 20 mm/h ;

- *Pois et pomme de terre* : déchaumage à socs ou semis de RGA début septembre, infiltration potentielle de 10 mm/h ;
- *Lin et colza* : déchaumage à socs, semis de moutarde ou semis de RGA début septembre, infiltration potentielle de 10 mm/h.
- *Betterave sucrière et maïs ensilage* : chantier en l'état après la récolte, soit une infiltration de 2 mm/h. En effet, la récolte de ces cultures a lieu en octobre et novembre. A ces dates, aucune intervention n'est efficace pour réduire le ruissellement. Un travail du sol conduit à un ruissellement équivalent à un chantier de récolte non travaillé (Martin, 1999). De même, un semis de culture intermédiaire n'est pas efficace en raison du faible développement du couvert végétal (Ouvry, 1987 ;DEFRA, 1999). Il est donc préférable ne pas intervenir.

Nous remarquons que, hormis pour les précédents céréales à paille, plusieurs techniques sont équivalentes. Nous privilégions le semis de culture intermédiaire au déchaumage à socs car la vitesse de réalisation de ce chantier est plus grande. Parmi les cultures intermédiaires, nous retenons le semis de moutarde en raison de la plus grande vitesse de développement du couvert (Ouvry, 1987)²⁶. Au final, cela revient à retenir deux techniques culturales : le déchaumage à socs (précédent céréales à paille, pois et pomme de terre) et le semis de moutarde (précédent lin et colza)²⁷. Toutefois, comme nous l'avons mentionné pour le maïs et la betterave sucrière, si l'intervention ne peut être réalisée que tardivement après le 1^{er} octobre, la réduction du ruissellement en hiver est quasi-inexistante. Il est alors préférable, quel que soit le précédent, de ne pas travailler le chantier de récolte.

Remarque : Dans les zones de concentration du ruissellement, il est conseillé de ne pas travailler le sol ou de le tasser en cas de semis, afin de limiter l'érosion concentrée (Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie, 1998a). Nous considérons donc que le déchaumage à socs s'accompagne d'un non-déchaumage dans les zones de concentration du ruissellement, et que le semis de moutarde est retassé dans ces mêmes zones.

1.2.1.2 Vitesse de réalisation des chantiers

Pour évaluer la vitesse de réalisation des deux chantiers préconisés, nous avons utilisé les données d'enquêtes en exploitation agricole.

Parmi les 14 agriculteurs enquêtés, cinq utilisent régulièrement une déchaumeuse à socs. La vitesse de progression de ce chantier est de 6-7 ha/j avec des déchaumeuses équipées de 4 à 6

²⁶ Nous discutons du choix des techniques par rapport à d'autres processus environnementaux dans le chapitre 6.

²⁷ Nous ne tenons pas compte ici de la disponibilité d'une déchaumeuse à soc dans les exploitations. Pour les agriculteurs n'en possédant pas, il serait nécessaire d'étudier les possibilités d'échange de matériel avec des agriculteurs propriétaires de ce matériel, d'achat en commun ou d'achat individuel, ce qui renvoie à une question d'ordre économique.

socs ; un seul agriculteur travaille à une vitesse supérieure. Nous gardons donc la vitesse de 6 ha/j afin de ne pas surévaluer les possibilités de réalisation de ce chantier.

La moutarde n'est implantée que par quatre agriculteurs. En général, préalablement à l'implantation, un déchaumage avec un outil à dents ou à socs est réalisé (parfois précédé d'un épandage de fumier). La moutarde est semée à la volée avec un épandeur de produit anti-limace sur une largeur de 12 ou 16 mètres. Pour tester cet itinéraire, nous prenons la vitesse de déchaumage propre à chaque exploitation, et une vitesse de 20 ha/j pour le semis de moutarde, ce qui correspond à un épandeur de 12 mètres. Comme pour le déchaumage, nous préférons ne pas surévaluer la vitesse d'avancement de ce chantier.

1.2.2 Possibilités d'insertion des techniques dans le calendrier d'organisation du travail

Pour évaluer les règles d'organisation du travail, nous avons choisi de simuler l'organisation du travail avec l'année climatique 1998, année médiane en terme de jours disponibles pour réaliser des interventions culturales limitant le ruissellement durant l'interculture (paragraphe 3.2.2 p. 149). Pour analyser les possibilités d'insertion de techniques culturales supplémentaires, nous procédons en 3 étapes :

1. En fonction de l'assolement du bassin versant, nous déterminons la surface d'interculture à déchaumer et la surface d'interculture à semer en moutarde pour chacune des 14 exploitations analysées. Nous en déduisons le nombre de jours que cela représente, en utilisant les vitesses de réalisation des chantiers fixées au paragraphe précédent.
2. L'analyse de l'organisation du travail pour l'année 1998 permet d'évaluer pour chaque interculture le nombre de jours disponibles entre la récolte du précédent et le 30 septembre, date après laquelle l'intervention n'est plus efficace pour réduire le ruissellement. La comparaison avec les jours nécessaires permet de dire si l'ensemble des intercultures peut être travaillé, et sinon la surface qui peut l'être.
3. S'il n'est pas possible de traiter l'ensemble des intercultures du bassin versant, nous positionnons les intercultures les plus infiltrantes en utilisant le même principe que pour la localisation spatiale des cultures (favoriser l'infiltration de ruissellement avant qu'il ne se concentre).

1.3 Elaboration du dispositif de simulations

L'analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif à l'échelle parcellaire (chapitre 3) montre que cet effet dépend du type d'événement pluvieux. Cela nous a conduit à sélectionner deux événements pluvieux pour le diagnostic à l'échelle du bassin versant, afin d'observer la variabilité de la réponse. Le diagnostic à l'échelle du bassin versant montre de même que le type d'événement pluvieux a des conséquences sur l'effet des systèmes de

culture. Nous conservons donc les deux mêmes événements pour effectuer les simulations des modifications des systèmes de culture : un événement intense (22 mm en 2h19') appelé « événement pluvieux A » et un événement peu intense (29 mm en 4h58'), « événement pluvieux B ».

L'objectif des simulations est d'étudier les possibilités de réduire le ruissellement érosif un hiver donné (configurations 2002²⁸), sans pour autant aggraver la situation au printemps et à l'hiver suivants. C'est pourquoi nous avons conçu un dispositif comprenant plusieurs simulations.

1.3.1 Réduction du ruissellement pour les configurations 2002 en hiver

Pour tester de manière complète l'effet d'une modification des systèmes de culture (effet d'une modification des assolements, puis d'un changement des itinéraires techniques et enfin des deux ensemble) sur la réduction du ruissellement, cinq simulations ont été réalisées.

Pour la première simulation qui sert de témoin, nous avons gardé les techniques d'intervention en interculture actuelles et nous avons cherché un assolement du bassin versant favorisant le ruissellement (assolement « ruisselant »). Cette simulation permet, par comparaison aux 3 suivantes, d'évaluer les gains permis par les modifications des systèmes de culture.

Trois simulations correspondant aux différentes modifications des systèmes de culture :

- Une simulation qui permet de tester l'effet de la modification de la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation sans modifier les techniques. Pour cela, nous avons recherché un assolement de bassin versant favorisant l'infiltration (assolement « infiltrant »).
- Une simulation qui permet de tester l'effet d'une modification des techniques culturales d'interculture avec l'assolement ruisselant. En fonction des résultats de l'analyse de l'organisation du travail, une simulation complémentaire peut être réalisée. Si les résultats montrent que certains agriculteurs n'ont pas le temps nécessaire pour intervenir sur toutes les surfaces d'interculture de leur exploitation, nous testerons le cas où ils interviennent en priorité sur les parcelles situées en dehors du bassin versant.
- Une simulation pour tester l'effet global d'une modification des systèmes de culture : assolement infiltrant et techniques culturales modifiées.

Enfin, nous avons réalisé une simulation complémentaire pour pouvoir comparer les conséquences sur le ruissellement au printemps et à l'hiver suivant, de deux assolements 2002

²⁸ L'année 2002 correspond à la campagne 2001-2002

ayant le même niveau de ruissellement en hiver. La différence entre ses deux assolements réside donc dans l'organisation spatiale des cultures de printemps, qui n'a pas de conséquence sur le ruissellement l'hiver précédent. Pour cela, nous avons considéré l'assolement infiltrant utilisé précédemment, pour lequel nous avons modifié la localisation de cultures de printemps sur 50 ha au sein du sous bassin versant SBV 13 (annexe 8). Il s'agit de l'assolement infiltrant_2. Cette simulation est réalisée avec les techniques culturales modifiées.

1.3.2 Ruissellement des configurations 2002 au printemps et des configurations 2003 en hiver

Pour le printemps, nous testons simplement si les deux configurations 2002 les plus favorables en hiver ne conduisent pas à des volumes d'eau ruisselés plus importants au printemps que ceux simulés lors du diagnostic (chapitre 3). Il s'agit donc de simuler au printemps les deux assolements infiltrants avec les techniques culturales modifiées. Ces simulations permettront également d'évaluer les conséquences de la modification de l'assolement dans le SBV 13.

Pour l'année 2003, l'évaluation en hiver est basée sur 3 simulations :

- Une simulation servant de témoin, pour laquelle nous avons cherché, à partir de l'assolement 2002 ruisselant, un assolement ruisselant et avons conservé les techniques culturales actuelles.
- Deux simulations avec des assolements infiltrants et les techniques culturales modifiées, recherchées à partir des deux assolements infiltrants de 2002.

1.3.3 Bilan des différentes configurations du bassin versant simulées

Au final, huit configurations ont été simulées, une configuration étant une combinaison d'un assolement de bassin versant et d'un ensemble de techniques culturales mises en œuvre sur chaque parcelle du bassin versant. Les configurations correspondent à une combinaison partielle de deux types de techniques culturales et de six assolements du bassin versant, trois pour l'année 2002 et trois pour l'année 2003 (Figure 29). Le Tableau 31 récapitule les différentes simulations réalisées à partir de ces configurations. Si l'année 2002 en hiver est complètement explorée, les simulations de l'année 2002 au printemps, et de l'année 2003 en hiver ne portent que sur les configurations extrêmes.

Tableau 31 : Dispositif de simulations				
Assolement Technique	2002 Ruisselant	2002 Infiltrant 2002 Infiltrant_2	2003 Ruisselant	2003 Infiltrant 2003 Infiltrant_2
Actuelles	Hiver	Hiver	Hiver	-
Modifiées	Hiver	Hiver / Printemps	-	Hiver

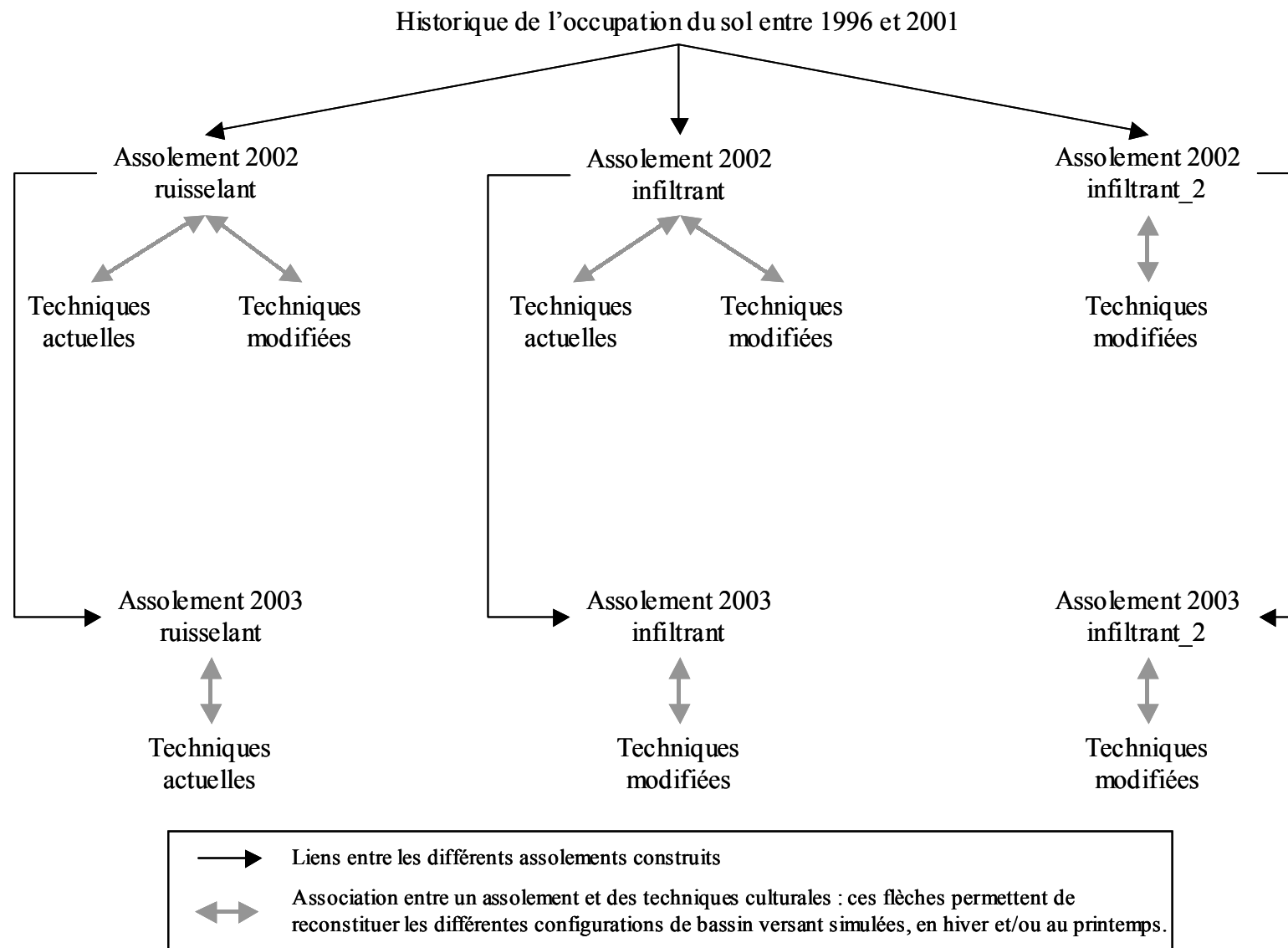


Figure 29: Schéma de construction des différentes configurations de bassin versant

2 Recherche des différentes configurations du bassin versant

2.1 Les assolements du bassin versant

Avant de déterminer les assolements ruisselants et infiltrants des années 2002 et 2003, nous identifions les parcelles sur lesquelles plusieurs cultures peuvent être implantées. En dernier lieu, nous analysons les conséquences des modifications sur les parcelles extérieures au bassin versant de Bourville.

2.1.1 Possibilités de modifier l'occupation du sol

L'application des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation de chaque agriculteur pour 2002 et 2003 et la prise en compte de l'assolement de chaque exploitation nous permettent de classer les parcelles du bassin versant de Bourville. (Tableau 32). En 2002, pour 38,5% des terres labourables, les règles de succession culturale autorisent plusieurs occupations du sol. Au final, pour plus d'un quart (26,2%) des parcelles, le choix d'une culture par rapport à une autre entraîne une modification de l'infiltration. En 2003, le pourcentage correspondant à cette situation est seulement de 17,3%, soit environ 70 ha de moins qu'en 2002. Ainsi, d'une année à l'autre, l'application des mêmes règles peut fixer une partie plus ou moins importante de l'assolement du bassin versant. Dans notre cas, les possibilités de modifier l'assolement du bassin versant en vue d'une réduction du ruissellement sont, a priori, plus importantes en 2002 qu'en 2003.

Tableau 32 : Répartition des terres labourables du bassin versant de Bourville après application des règles d'assolement				
	Année 2002		Année 2003	
Terres labourables (TL)	812,5 ha	100 %	812,5 ha	100 %
TL avec des possibilités d'occupation du sol variées après application des règles de succession (TLV)	313 ha	38,5 %	268,8 ha	33,1 %
TLV ayant un effet sur le ruissellement en hiver (TLVR)	278,5 ha	34,3 %	200,6 ha	24,7 %
TLVR dont l'occupation du sol n'est pas fixée du fait de l'assolement des exploitations	213 ha	26,2 %	140,6 ha	17,3 %

2.1.2 Les différents assolements du bassin versant

Une fois déterminées les parcelles pour lesquelles nous pouvons modifier l'occupation du sol dans le but de réduire le ruissellement à l'exutoire du bassin versant, nous avons mis en œuvre les principes exposés en première partie de ce chapitre. Il s'agit, soit de maximiser l'infiltration et de positionner les surfaces ruisselantes à l'amont de parcelles infiltrantes dans

la mesure du possible, soit l'inverse suivant que l'on construit un assolement infiltrant ou ruisselant. Nous illustrons le travail effectué pour l'année 2002 en hiver à partir d'un exemple pris à l'amont du bassin versant (Figure 30- a-b-c-d).

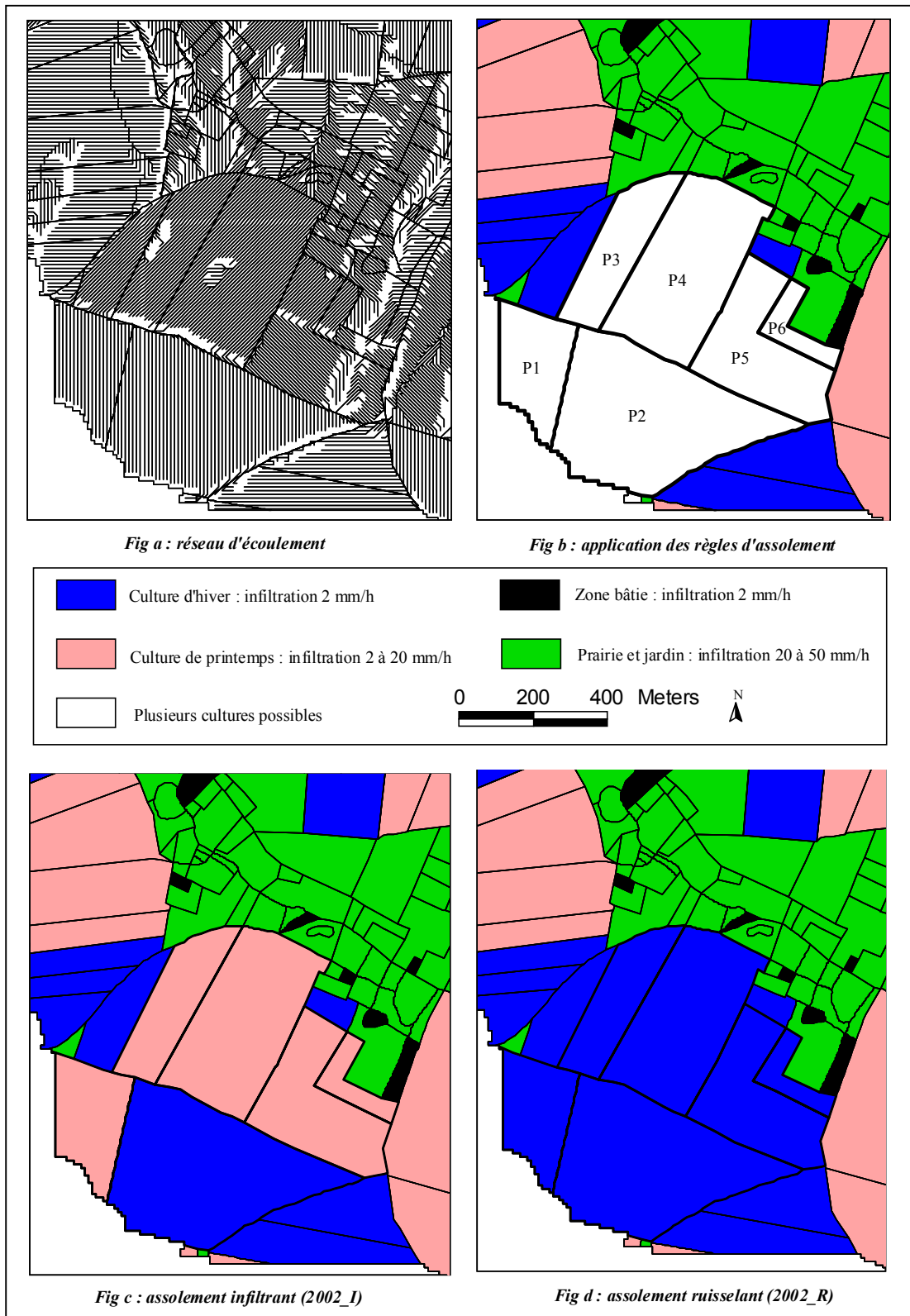


Figure 30 : Construction des assolements ruisselant et infiltrant pour l'année 2002

La figure b présente le résultat de l'application des règles d'assolement. Dans cette zone amont du bassin versant, l'affectation des cultures est indéterminée pour 6 parcelles, représentant une surface de 51,7 ha. D'après le réseau d'écoulement représenté sur la figure a, le ruissellement issu des parcelles P1 et P2 traverse les parcelles P3 à P6. Pour la construction de l'assolement infiltrant (figure c), nous avons donc privilégié l'implantation de cultures de printemps à l'aval, sur les parcelles P3 à P6 : il peut en résulter une zone infiltrante suivant les techniques culturales d'interculture mises en oeuvre. Pour la parcelle d'amont P2, nous avons affecté une culture d'hiver car le ruissellement issu de cette parcelle pouvait potentiellement être infiltré dans les parcelles P4, P5 et P6. Cela permet de réserver la culture de printemps potentielle de la parcelle P2 à une autre parcelle et donc de contribuer à l'infiltration du ruissellement dans une autre zone du bassin. Quant à la parcelle P1, le ruissellement qu'elle produit traverse la parcelle jouxtant la parcelle P3, implantée avec une culture d'hiver, donc ruisselante. C'est pourquoi nous avons préféré affecter une culture de printemps à la parcelle P1. Pour l'assolement ruisselant (figure d), nous avons inversé la situation, excepté pour la parcelle P2 que nous avons laissée ruisselante, afin de maximiser la surface ruisselante du bassin versant.

Trois assolements ont été établis pour chacune des années : un assolement ruisselant et deux assolements infiltrants. Le tableau ci-dessous (Tableau 33) donne la répartition des terres labourables pour les assolements (nous n'avons pas reporté les données pour l'assolement infiltrant_2 qui est très peu différent de l'assolement infiltrant). La catégorie « terres labourables non analysées » correspond aux parcelles isolées dont l'occupation du sol est incertaine et aux terres de l'agriculteur non enquêté.

Tableau 33 : Répartition des terres labourables par type de culture pour les quatre assolements principaux du bassin versant de Bourville				
	2002		2003	
	Ruisselant	Infiltrant	Ruisselant	Infiltrant
Culture d'hiver	369,6 ha	310,9 ha	390,5 ha	384,4 ha
Interculture / Culture de printemps	330,6 ha	389,3 ha	318,8 ha	324,9 ha
Gel fixe RGA	21,8 ha	21,8 ha	23,8 ha	23,8 ha
Terres labourables non analysées	90,5 ha	90,5 ha	79,4 ha	79,4 ha

Une première analyse de l'assolement global montre qu'en 2002, les assolements ruisselants et infiltrants sont plus contrastés qu'en 2003. Si l'on compare les surfaces totales de cultures d'hiver et de cultures de printemps entre les deux assolements de 2002, nous constatons une différence de 58,7 ha ; en 2003, elle n'est que 6,1 ha. Cependant, une analyse plus détaillée de la répartition spatiale des cultures dans le bassin versant des deux assolements montre qu'en 2002, 80,1 ha sont concernés par un changement de type de culture (de culture d'hiver à

culture de printemps ou inversement). Sur ces 80,1 ha, 58,7 ha correspondent à une modification de l'assolement du bassin versant, et les 21,4 ha restant correspondent à une réorganisation interne au bassin versant. En 2003, en comparant les assolements ruisselant et infiltrant, ce sont 96,7 ha qui connaissent un changement de type de culture. La différence entre les deux assolements étant de seulement 6,1 ha, nous en déduisons que 90,6 ha correspondent à une réorganisation des cultures interne au bassin versant. L'année 2003, bien qu'a priori moins favorable à une modification de l'organisation spatiale des cultures dans le bassin versant, est une année où la proportion des cultures est peu modifiée entre les assolements infiltrant et ruisselant définis mais, les différences entre les deux assolements correspondent à une réorganisation interne des cultures. Pour l'année 2002, les différences résultent d'une réorganisation spatiale des cultures principalement avec des parcelles extérieures au bassin.

2.1.3 Conséquences sur les parcelles extérieures au bassin versant de Bourville

Nous sommes conscients que les modifications effectuées sur le bassin versant de Bourville peuvent avoir des conséquences sur les parcelles des exploitations situées dans d'autres bassins versants. Si notre objectif principal est de proposer des modifications des systèmes de culture dans le but réduire le ruissellement érosif dans le bassin versant étudié, nous souhaitons aussi faire en sorte que les changements préconisés ne génèrent pas plus de ruissellement ailleurs, afin de ne pas reporter le problème. Aussi, avant d'aller plus loin, il est nécessaire d'évaluer les répercussions des modifications proposées.

La première étape de ce travail a consisté à identifier, parmi les parcelles de terres labourables situées à l'extérieur du bassin versant, celles que nous pouvions considérer comme « isolées ». Les cartes des territoires d'exploitation réalisées sur fond IGN au 1/25000^{ème} (Scan25) lors des enquêtes, nous ont permis de rattacher les parcelles extérieures à leurs bassins versants d'appartenance. Quant à la délimitation de ces bassins, nous avons utilisé les cartes produites dans le cadre de l'étude de l'aléa érosion des sols en Haute-Normandie (Souadi *et al.*, 2000) : celles-ci nous ont aidé à déterminer les limites des bassins versants à partir de la topographie du Scan25 et d'en déduire la surface totale de chacun. L'analyse requiert également de connaître la surface en terres labourables de chaque bassin versant. Ne disposant pas de cette information, nous avons calculé des valeurs en appliquant un taux de 50% à la surface totale. Nous nous sommes basés sur les résultats d'une étude conduite sur 40 bassins versants de Haute-Normandie (Dubreuil, 2001) ; ceux-ci montrent qu'en dessous de 50 % de terres labourables, les bassins versants ont une sensibilité à l'érosion faible à moyenne. Aussi, même si des parcelles représentent plus de 10% des terres labourables d'un bassin versant ayant lui-même moins de 50 % de terres labourables, nous pouvons ne pas tenir compte des pratiques des agriculteurs sur ces parcelles, ce bassin versant étant peu sensible à l'érosion.

Le tableau ci-dessous (Tableau 34) récapitule l'ensemble des données. Sur les 14 agriculteurs enquêtés, 13 ont des parcelles de terres en cultures à l'extérieur du bassin versant, réparties dans 8 bassins versants différents. On dénombre douze situations (en gras dans le tableau) où un agriculteur a plus de 15 ha dans un autre bassin versant que celui de Bourville : neuf agriculteurs sont concernés. Toutes les parcelles correspondantes ne peuvent donc pas être considérées comme isolées. Si l'on s'intéresse maintenant aux parcelles dont le cumul des surfaces par bassin versant et par exploitation est inférieur à 15 ha, nous constatons qu'elles représentent moins de 10% des terres labourables de chaque bassin. Nous pouvons donc les considérer comme isolées.

Bassin versant Agriculteur	BV_a	BV_b	BV_c	BV_d	BV_e	BV_f	BV_g	BV_h
FBL	0	0	0	0	0	0	0	0
PCE	0	0	0	0	0	4.6	0	0
JCO	0	0	0	3.8	0	3.6	9.4	15.8
MDE	0	0	0	0	31.8	22.7	0	0
XDE	0	0	0	6.5	7.5	52.5	0	0
GLA	0	0	0	0	0	7.5	47.1	0
JMO	0	0	0	0	74.2	13.6	50.9	0
BOL	0	45	4.3	0	1.8	0	0	0
ROL	0	53	0	0	9	0	0	0
ARO	0	0	0	0	0	5.5	0	13
MRO	0	7.8	0	0	8	0	37.9	0
VOR	0	0	0	0	0	12	5	0
RTE	0	0	0	0	0		10.4	0
JVO	11.6	0	0	0	0	44.8	33	0
Surface totale BV	932	3 303	3 366	4 745	1 402	1 428	5 254	2 538
Surface terres labourables	466	1652	1 683	2 373	701	714	2 627	1 269
% des terres labourables*	2.5%	0.5%	0.3%	0.4%	3.8%	6.6%	0.9%	2.3%

* : il s'agit du pourcentage des terres labourables du bassin versant occupé par des parcelles isolées (surface totale des parcelles d'un même agriculteur inférieure à 15 ha).

Dans un deuxième temps, nous avons examiné les conséquences des modifications de l'assolement du bassin versant de Bourville sur les parcelles représentant plus de 15 ha par exploitation dans les autres bassins versants. Les modifications observées concernent 2 agriculteurs sur les 8 : JMO en 2002 et 2003, JVO en 2003 uniquement. Dans tous les autres cas, soit il n'y a eu aucune modification, soit les modifications survenues ont pu être jugées sans conséquence sur le ruissellement, les parcelles ayant la même capacité d'infiltration avant et après le changement de culture. Pour JMO et JVO, les modifications ne représentent jamais plus de 2% des terres labourables des bassins versants. Nous pouvons donc conclure

que les modifications des systèmes de culture proposées pour 2002 et 2003 dans le bassin versant de Bourville n'ont que de faibles répercussions à l'extérieur du bassin.

2.2 Les itinéraires techniques en interculture

Afin de connaître les modifications possibles des itinéraires techniques pour chaque parcelle du bassin versant de Bourville, nous devons déterminer pour chaque agriculteur la surface de chaque type d'interculture et établir s'il peut insérer l'ensemble des modifications dans son calendrier d'organisation du travail.

2.2.1 Bilan des surfaces d'interculture

Le Tableau 35 indique les surfaces en interculture de chaque agriculteur, en distinguant les surfaces correspondant aux deux interventions culturales que nous voulons tester, à savoir le déchaumage à socs et le semis de moutarde.

Tableau 35 : Jours nécessaires pour la réalisation d'opérations culturales réduisant le ruissellement						
Agriculteurs	2002		2003		Maximum	
	Socs*	Moutarde*	Socs	Moutarde	Socs	Moutarde
FBL	2,7	0	9	0	9	0
PCE	8,8	0	7,2	0	8,8	0
JCO	1,8	9,2	19,8	0	19,8	9,2
MDE	14,7	14,6	24,4	0	24,4	14,6
XDE	19,9	0	0	0	19,9	0
GLA	28,1	0	24,8	0	28,1	0
JMO	55,4	1	27,2	0	55,4	1
BOL	5,8	4,2	10,3	0	10,3	4,2
ROL	16,3	13,3	8,2	6,2	16,3	13,3
ARO	16	0	10	5,8	16	5,8
MRO	14,6	23	38,2	14,6	38,2	23
VRO	24,5	8,4	13,9	7,3	24,5	8,4
RTE	19,7	3,5	7	4	19,7	3,5
JVO	40,6	0,2	1	29,4	40,6	29,4
Total	268,9	77,4	201	67,3		

* Socs = déchaumage à socs / Moutarde = semis de moutarde comme culture intermédiaire

A l'échelle du bassin versant, la superficie des intercultures à déchaumer est toujours nettement supérieure à celle à semer en moutarde. Ceci est dû au fait que le semis de moutarde correspond uniquement aux intercultures dont le précédent est un lin ou un colza. Or, dans les systèmes de culture identifiés dans le bassin versant, le colza est quasi systématiquement suivi d'un blé. Les intercultures en moutarde correspondent donc très majoritairement aux intercultures lin. C'est pour cette raison que certains agriculteurs n'ont

jamais l'occasion d'implanter de moutarde en interculture : FBL, XLE et PCE ne cultivent pas de lin ; GLA implante toujours un blé derrière un lin, pour les parcelles incluses dans le bassin versant de Bourville (succession culturale basée sur un blé de 2 ans). Dans le Tableau 35, nous remarquons aussi que, d'une année à l'autre, la surface de chaque interculture peut varier de manière importante. Cela s'interprète en partie par le découpage du parcellaire : certaines parcelles situées à l'extérieur du bassin versant peuvent, une année donnée, concentrer une large partie de certaines intercultures, alors absentes des parcelles du bassin versant de Bourville. Pour quelques agriculteurs, l'irrégularité des successions de cultures peut constituer un autre facteur d'explication.

Pour la suite de l'analyse, nous conservons comme surface d'interculture le maximum des deux années : nous n'aurons ainsi à réaliser qu'un seul bilan entre les jours nécessaires et ceux disponibles pour les deux années. S'il s'avère que l'agriculteur n'est pas en mesure de traiter la surface maximum, nous testerons alors s'il peut néanmoins effectuer les opérations culturales sur la plus petite des surfaces.

2.2.2 Insertion dans le calendrier d'organisation du travail

Afin d'évaluer les possibilités d'insertion des modifications d'itinéraires techniques dans le calendrier d'organisation du travail, nous avons fait le bilan entre les jours nécessaires et les jours disponibles comme expliqué au paragraphe précédent. Pour estimer les jours nécessaires, nous avons divisé la surface d'interculture à traiter par la vitesse d'avancement du chantier. Nous avons arrondi le résultat obtenu à la demi-journée (inférieure ou supérieure). Le tableau ci-dessous (Tableau 36) récapitule les résultats avec les sigles suivants : « + » signifie qu'il y a plus de jours disponibles que nécessaires, « = » qu'il y en a autant et « 0 » qu'il n'y a aucun jour disponible.

D'après le bilan des jours disponibles, 9 agriculteurs peuvent traiter l'ensemble des intercultures de leur exploitation présentes dans le bassin versant, le nombre de jours disponibles étant supérieurs à celui des jours nécessaires. Pour 5 de ces agriculteurs, les itinéraires techniques proposés ne représentent en réalité que peu ou pas de modifications par rapport aux itinéraires techniques qu'ils appliquent habituellement.

A l'opposé, 4 agriculteurs ne disposent pas de suffisamment de jours disponibles pour traiter la totalité des intercultures ou même une partie. Dans le cas du déchaumage à socs, il s'agit d'une réelle indisponibilité de jours pour réaliser le travail. Dans celui des semis de moutarde, l'épandage trop tardif du fumier est en cause. En effet, la plupart des agriculteurs épandent le fumier après le lin, puis déchaument, et ne sèment la moutarde qu'une fois ces deux chantiers achevés. La récolte du lin se terminant début septembre, les chantiers suivants peuvent être décalés et ne pas être terminés avant fin septembre. C'est le cas des agriculteurs MRO, VRO

et JVO, pour lesquels l'analyse de l'organisation du travail montre que le semis est réalisé tardivement à l'automne, après le 30 septembre.

Agriculteur	Jours nécessaires		Jours disponibles	
	Socs	Moutarde ²⁹	Socs	Moutarde
FBL	1,5	0	+	NC ³⁰
PCE	1,5	0	+	NC
JCO	3,5	0,5	+	+
MDE	4	2	+	+
XDE	3,5	0	+	NC
GLA	4,5	0	0	NC
JMO	9	0,5	=	+
BOL	1,5	0,5	+	+
ROL	2,5	1	+	+
ARO	2,5	0,5	+	+
MRO	6,5	1	0	0
VRO	4	0,5	=	0
RTE	3,5	0,5	+	+
JVO	7	1,5	+	0

Enfin, pour deux agriculteurs (JMO et VRO), le nombre de jours disponibles correspond exactement aux nombre de jours nécessaires pour réaliser le déchaumage à socs dans les parcelles du bassin versant. Par voie de conséquence, ces agriculteurs ne pourront pas intervenir dans de bonnes conditions pour les parcelles en interculture localisées à l'extérieur du bassin versant. Ceci peut être problématique si les parcelles concernées sont susceptibles de provoquer des dégâts importants en cas de ruissellement. Aussi avons-nous prévu une simulation supplémentaire afin de tester quelle serait la répercussion d'un déchaumage des parcelles situées à l'extérieur du bassin versant, et par conséquent, d'un non-déchaumage des parcelles à l'intérieur du bassin versant. Nous réaliserons cette simulation avec l'assolement infiltrant du bassin versant.

Soulignons que l'analyse de l'organisation du travail réalisée nous a conduit à modifier les techniques mises en œuvre actuellement par les agriculteurs. C'est le cas des agriculteurs ne disposant pas de jours disponibles pour réaliser un déchaumage à socs et/ou un semis de moutarde dans les conditions définies. Ce défaut de jours disponibles reste valable quelles que soient les techniques culturales appliquées. Pour cette raison nous avons considéré que les agriculteurs concernés ne pouvaient pas réaliser les déchaumages classiques avec des outils à dents qu'ils nous avaient dit faire. A la différence du diagnostic (chapitre 3) pour lequel nous avons pris en compte les techniques culturales enquêtées sans analyse préalable, dans ce chapitre nous analysons les possibilités de mise en œuvre des techniques (actuelles ou modifiées) par rapport à l'organisation du travail.

3 Effet des modifications des systèmes de culture sur le ruissellement

Dans cette partie, nous exposons les effets des différentes modifications des systèmes de culture conçues, sur le ruissellement érosif. Ces effets ont été estimés par simulation en utilisant le modèle STREAM. Les résultats sont présentés en trois parties. Tout d'abord, nous analysons de façon détaillée les effets d'une modification des systèmes de culture en 2002 (assolements et itinéraires techniques) pour l'hiver. Puis, nous étudions les répercussions de ces modifications au printemps et à l'hiver suivant. Enfin dans une dernière partie, nous mettons en parallèle ces résultats avec ceux du diagnostic réalisé pour la période hivernale avec les systèmes de culture réellement mis en œuvre entre 1996 à 2001. Ces résultats sont discutés dans la partie 4 de ce chapitre.

3.1 Effet de la modification des systèmes de culture pour l'année 2002 en hiver

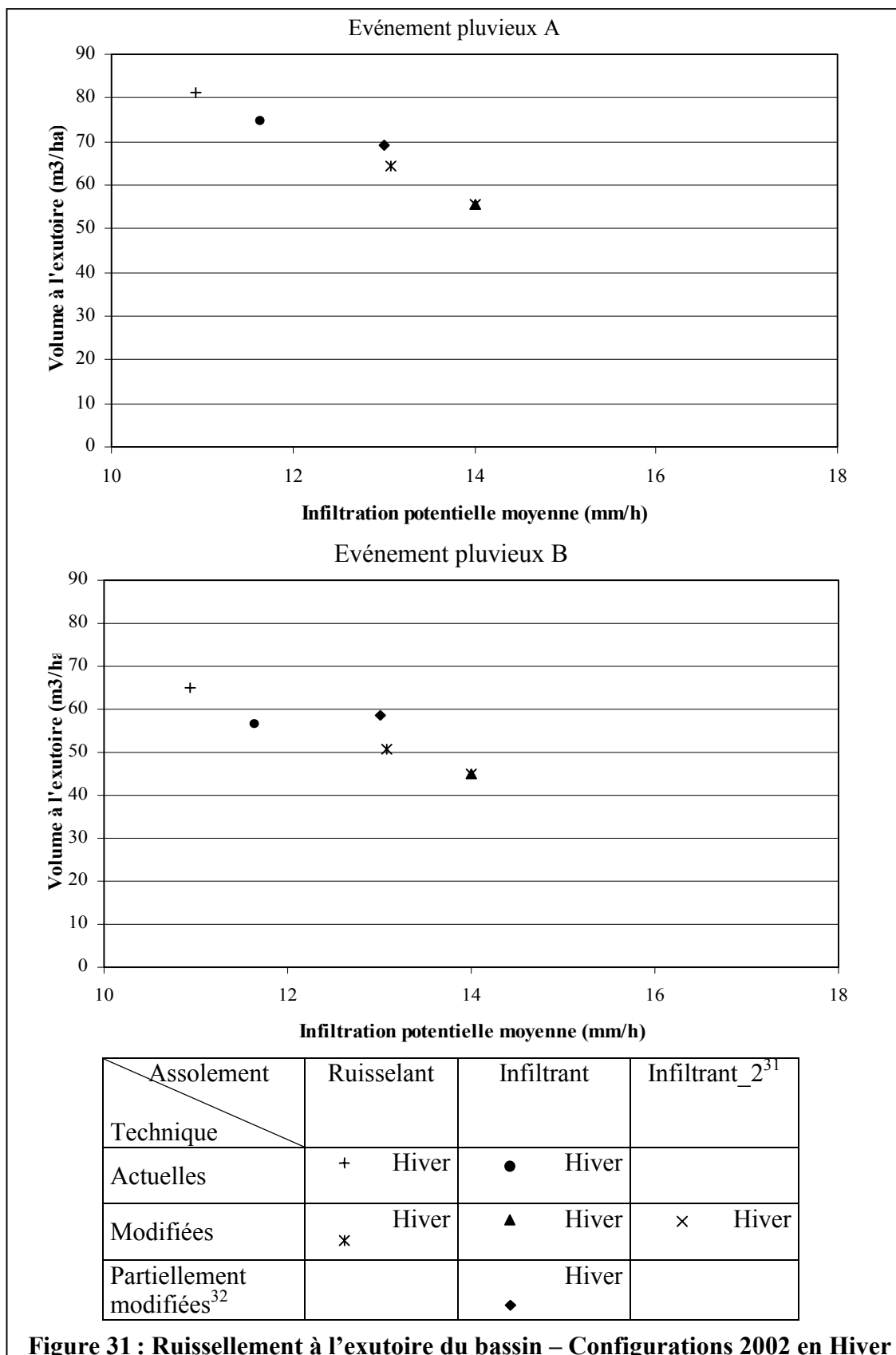
Les résultats des simulations sont présentés comme ceux du diagnostic (chapitre 3) : nous avons reporté le volume à l'exutoire du bassin versant (m^3/ha) en fonction de l'infiltration potentielle moyenne du bassin (mm/h). Nous rappelons ici que l'infiltration moyenne n'est qu'un indicateur global du potentiel d'infiltration puisqu'il ne tient compte ni du type de surface infiltrante, ni de leur répartition spatiale. L'ensemble des résultats de l'année 2002 en hiver est reporté sur la Figure 31, et les principales comparaisons entre niveaux de ruissellement dans le Tableau 37 et dans le Tableau 38.

3.1.1 Simulations avec l'événement pluvieux intense A

La configuration la plus ruisselante, assolement ruisselant et techniques actuelles, produit un ruissellement à l'exutoire du bassin versant de $81,1 \text{ m}^3/\text{ha}$. Dans la suite de ce paragraphe, toutes les comparaisons sont faites par rapport à cette configuration qui sert de témoin. A l'opposé, la configuration la moins ruisselante, assolement infiltrant et techniques modifiées, produit $55,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ d'eau à l'exutoire. Une modification simultanée des deux composantes des systèmes de culture permet donc de réduire de 31% le volume d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin versant. Si nous examinons maintenant l'effet d'une modification des composantes des systèmes de culture séparément, nous observons que la modification des itinéraires

²⁹ Inclus le temps nécessaire au déchaumage si l'agriculteur ne le réalisait pas habituellement

³⁰ NC : Non concerné car pas de surface à semer en moutarde



³¹ Cet assolement diffère de l'assolement infiltrant du fait d'une modification de la répartition des cultures de printemps sur 50 ha en 2002.

³² Il s'agit du cas pour lequel 2 agriculteurs ne pouvant traiter toutes les intercultures de leur exploitation, le font sur les parcelles situées à l'extérieur du bassin versant et donc pas dans le bassin versant de Bourville.

Tableau 37 : Récapitulatif des comparaisons entre les différentes configuration en 2002 pour les simulations de l'hiver, événement pluvieux A		
Configuration ruisselante	Configuration moins ruisselante	Gain
Assolement ruisselant Techniques actuelles 81,1 m ³ /ha	Assolement infiltrant Techniques modifiées	
	55,7 m ³ /ha	31%
	Assolement infiltrant Techniques actuelles	
	74,5 m ³ /ha	8%
	Assolement ruisselant Techniques modifiées	
	64,4 m ³ /ha	21%
	Assolement infiltrant / Techniques partiellement modifiées	
69 m ³ /ha	15%	

Tableau 38 : Récapitulatif des comparaisons entre les différentes configuration en 2002 pour les simulations de l'hiver, événement pluvieux B		
Configuration ruisselante	Configuration moins ruisselante	Gain
Assolement ruisselant Techniques actuelles 64,9 m ³ /ha	Assolement infiltrant Techniques modifiées	
	45,1 m ³ /ha	31%
	Assolement infiltrant Techniques actuelles	
	56,3 m ³ /ha	13%
	Assolement ruisselant Techniques modifiées	
	50,9 m ³ /ha	22%
	Assolement infiltrant / Techniques partiellement modifiées	
58,5 m ³ /ha	10%	

techniques permet de réduire beaucoup plus efficacement le ruissellement à l'exutoire du bassin versant que la modification de la localisation des cultures. Dans le premier cas, le ruissellement produit est de 64,4 m³/ha, soit une diminution de 21% ; dans le second, il est de 74,5 m³/ha, soit une réduction de 8% par rapport à la situation la plus ruisselante. Si nous sommons ces deux effets, nous obtenons une réduction totale de 29%, soit 2% de moins que les 31% de réduction obtenus par simulation des deux modifications simultanées. Nous en déduisons qu'il existe une interaction entre les deux modifications : celle-ci permet d'augmenter légèrement l'infiltration du ruissellement au sein du bassin versant (2,1 m³/ha). L'augmentation d'infiltration de certaines parcelles est optimisée par un meilleur positionnement de celles-ci au sein du bassin versant.

La dernière simulation correspond à la situation la moins ruisselante, mais pour laquelle nous avons considéré que deux agriculteurs (JMO et VRO, cf. paragraphe 2.2.2 p. 171) ne pouvaient modifier les techniques culturales que sur les parcelles situées à l'extérieur du bassin versant. Ces deux agriculteurs exploitent 122 ha de terres labourables, soit 20% du bassin. Dans cette configuration, aucune opération culturale n'est réalisée en interculture. Dans ces conditions, le volume d'eau à l'exutoire est de 69 m³/ha, soit une réduction de seulement 15%. L'effet positif de la modification des systèmes de culture sur la réduction du ruissellement est donc diminué de 50% lorsque ces deux agriculteurs qui ne peuvent pas traiter l'ensemble de leurs intercultures, privilégient celles localisées à l'extérieur du bassin versant de Bourville.

3.1.2 Simulations avec l'événement pluvieux peu intense B

Si nous nous intéressons à la modification globale des systèmes de culture, la situation est comparable avec celle de l'événement pluvieux intense. La réduction du ruissellement est de 31% entre la situation la plus ruisselante et celle la plus infiltrante, mais avec des volumes d'eau à l'exutoire plus faibles d'une dizaine de m³/ha : l'infiltration est supérieure du fait de l'intensité moindre de l'événement B. Le volume maximum observé est en effet de 64,9 m³/ha et le minimum de 45,1 m³/ha. Si nous considérons maintenant les composantes des systèmes de culture séparément, nous constatons que la modification des itinéraires techniques entraîne une réduction de 22% comparable à celle obtenue avec l'événement pluvieux intense. Quant à la modification des assolements, elle permet une réduction du ruissellement de 13%, soit 5% de plus que dans la situation simulée avec l'événement A. Si nous additionnons les deux, nous obtenons une réduction potentielle de 35%, alors que la simulation des deux modifications simultanées ne donne qu'une diminution de 31%. Nous nous trouvons dans la situation inverse de la précédente : il n'y a pas d'interaction positive entre les deux modifications. Notons enfin que la réduction du ruissellement par une modification des techniques culturales d'interculture est supérieure à celle résultant d'une modification de l'organisation spatiale des cultures, comme avec l'événement A. Toutefois, la différence est plus faible dans le cas de l'événement B.

La simulation qui tient compte du fait que les agriculteurs JMO et VRO ne traitent leurs intercultures qu'à l'extérieur du bassin versant, fournit le même résultat qu'avec l'événement pluvieux intense. Le bénéfice d'une modification des systèmes de culture est fortement amoindri, plus encore qu'avec l'événement pluvieux A : la réduction du ruissellement n'est plus que de 10%. Avec l'événement pluvieux B, la réduction du ruissellement à l'exutoire du bassin versant est diminuée de 68% contre 50% avec l'événement pluvieux intense. Le niveau de ruissellement obtenu, soit 58,5 m³/ha, est comparable à celui obtenu en ne modifiant que les assolements.

3.2 Conséquences des modifications des configurations 2002

L'ensemble des résultats des simulations se rapportant à cette sous-partie est présenté sur la Figure 32.

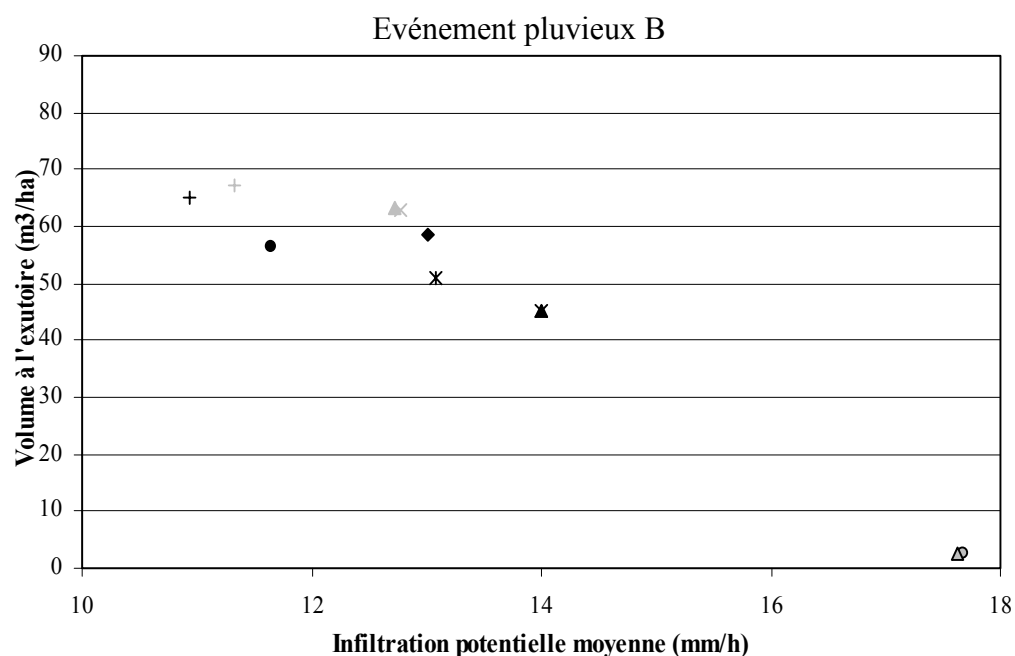
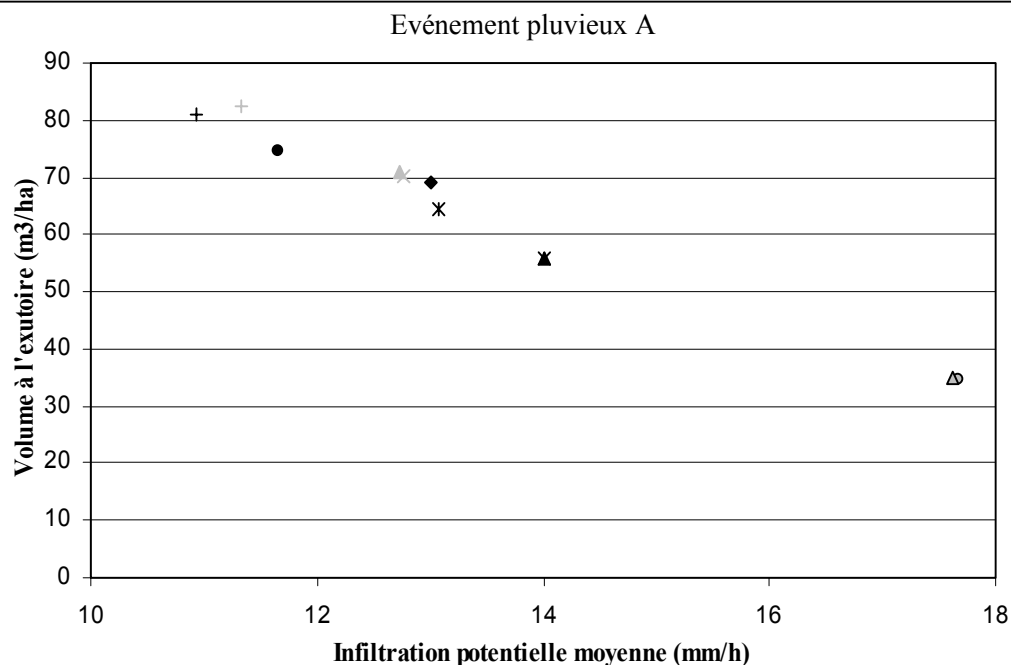
3.2.1 Simulations avec l'événement pluvieux intense A

La valeur de ruissellement observée au printemps avec l'assolement 2002 infiltrant est de 34,8 m³/ha, soit une valeur comprise dans la gamme obtenue lors du diagnostic (de 24,6 m³/ha à 39,78 m³/ha, cf. Figure 23 p. 110). La configuration basée sur l'assolement 2002 le plus favorable en hiver, n'est donc pas plus ruisselante au printemps que les configurations actuelles du bassin versant.

Pour l'assolement 2003 en hiver, nous avons simulé deux cas extrêmes :

- une configuration d'assolement ruisselant sans modifier les techniques, construit à partir de l'assolement ruisselant de 2002 ;
- une configuration d'assolement infiltrant construit à partir de l'assolement infiltrant 2002 et pour laquelle nous avons modifié les techniques.

Nous obtenons, dans le premier cas, un ruissellement de 82,6 m³/ha et dans le second cas un ruissellement de 70,9 m³/ha. Ces résultats montrent qu'il est possible de réduire le ruissellement à l'exutoire du bassin versant deux années de suite par une modification des systèmes de culture. Cependant, la diminution du ruissellement est seulement de 14,2%, soit plus de deux fois moins que pour l'assolement 2002 en hiver. Les configurations basées sur l'assolement 2003 sont globalement plus ruisselantes en hiver que celles basées sur l'assolement 2002.



Assolement \ Technique	2002			2003		
	Ruisselant	Infiltrant	Infiltrant 2 ³³	Ruisselant	Infiltrant	Infiltrant 2
Actuelles	+ Hiver	• Hiver		+ Hiver		
Modifiées	x Hiver	▲ Hiver △ Printemps	x Hiver ○ Printemps		▲ Hiver	x Hiver
Partiellement modifiées ³⁴		◆ Hiver				

Figure 32 : Ruissellement à l'exutoire du bassin – Configurations 2002 et 2003 en hiver et configurations 2002 au printemps

³³ Cet assolement diffère de l'assolement infiltrant d'une modification de la répartition des cultures de printemps sur 50 ha en 2002.

³⁴ Il s'agit du cas pour lequel 2 agriculteurs ne pouvant traiter toutes les intercultures de leur exploitation, le font sur les parcelles situées à l'extérieur du bassin versant

3.2.2 Simulations avec l'événement pluvieux peu intense B

Les résultats obtenus avec l'événement B sont similaires à ceux obtenus avec l'événement A. Avec l'assolement 2002, le ruissellement simulé à l'exutoire du bassin versant pour le printemps est presque nul. Seulement 2,6 m³/ha ne sont pas infiltrés avant l'exutoire. Nous nous situons bien dans la gamme des valeurs du diagnostic obtenues avec le même événement pluvieux (de 2 à 9,9 m³/ha).

Si nous considérons les simulations effectuées avec l'assolement 2003 en hiver, la situation la plus ruisselante produit un volume d'eau de 67,1 m³/ha et la moins ruisselante un volume de 63,3 m³/ha. La recherche d'une configuration infiltrante en 2003, à partir de la configuration infiltrante de 2002, aboutit donc à une valeur plus faible de ruissellement comme nous l'avons déjà constaté avec l'événement pluvieux A. Cependant, la différence entre les situations extrêmes est seulement de 5,7 %, bien inférieure aux 14,2% obtenus avec l'événement pluvieux A, et aux 31% observés en 2002. En 2003, la configuration la moins ruisselante, produit même plus de ruissellement que toutes les configurations de 2002 pour lesquelles nous avons modifié tout ou partie des systèmes de culture.

3.2.3 Effet des différentes organisations des cultures de printemps

Pour 2002, nous avons construit deux assolements infiltrants qui produisent la même quantité d'eau à l'exutoire du bassin versant en hiver mais dont l'organisation des cultures de printemps diffèrent sur 50 ha, situés dans le sous bassin versant SBV13. Les simulations au printemps et à l'hiver suivant montrent que les volumes d'eau à l'exutoire sont proches d'une situation à l'autre. Les différences maximales sont obtenues avec l'événement pluvieux intense, et elles ne sont que de 0,2 % au printemps et 0,9 % en hiver. Si nous nous plaçons à l'échelle du sous bassin versant SBV13, le contraste n'est pas beaucoup plus marqué, alors que les parcelles concernées représentent 19,3% de la surface du sous bassin versant (259 ha), contre 4,6 % de la surface totale du bassin versant de Bourville. Avec ce même événement pluvieux, la différence est de 0,4 % au printemps. C'est en hiver qu'elle est plus marquée, à savoir 2,6%. Globalement, nous constatons donc une faible répercussion du choix de l'une ou l'autre des configurations infiltrantes pour l'hiver en 2002, et pour le printemps et l'hiver suivants. Deux explications peuvent être avancées :

- La première réside dans la structure du réseau d'écoulement du ruissellement (Figure 33). Sur les parcelles concernées par la réorganisation spatiale des cultures (entourées en gras sur la figure), le ruissellement s'écoule rarement de manière diffuse d'une parcelle à l'autre. L'organisation spatiale des cultures a donc peu de répercussions sur la quantité d'eau ruisselée ; c'est l'assolement qui est déterminant.

- La deuxième est liée aux techniques culturales mises en œuvre sur ces parcelles en interculture (cela ne concerne donc que les simulations avec l'assolement 2003 en hiver). Plus de la moitié des parcelles appartient à un agriculteur dont l'organisation du travail ne lui permet pas d'intervenir dans de bonnes conditions pour déchaumer ou semer de la moutarde. En conséquence, les intercultures de ces parcelles ont le même niveau d'infiltration que les cultures d'hiver. Une répartition spatiale différente entre cultures d'hiver et cultures de printemps n'influe donc pas sur le volume d'eau ruisselée.

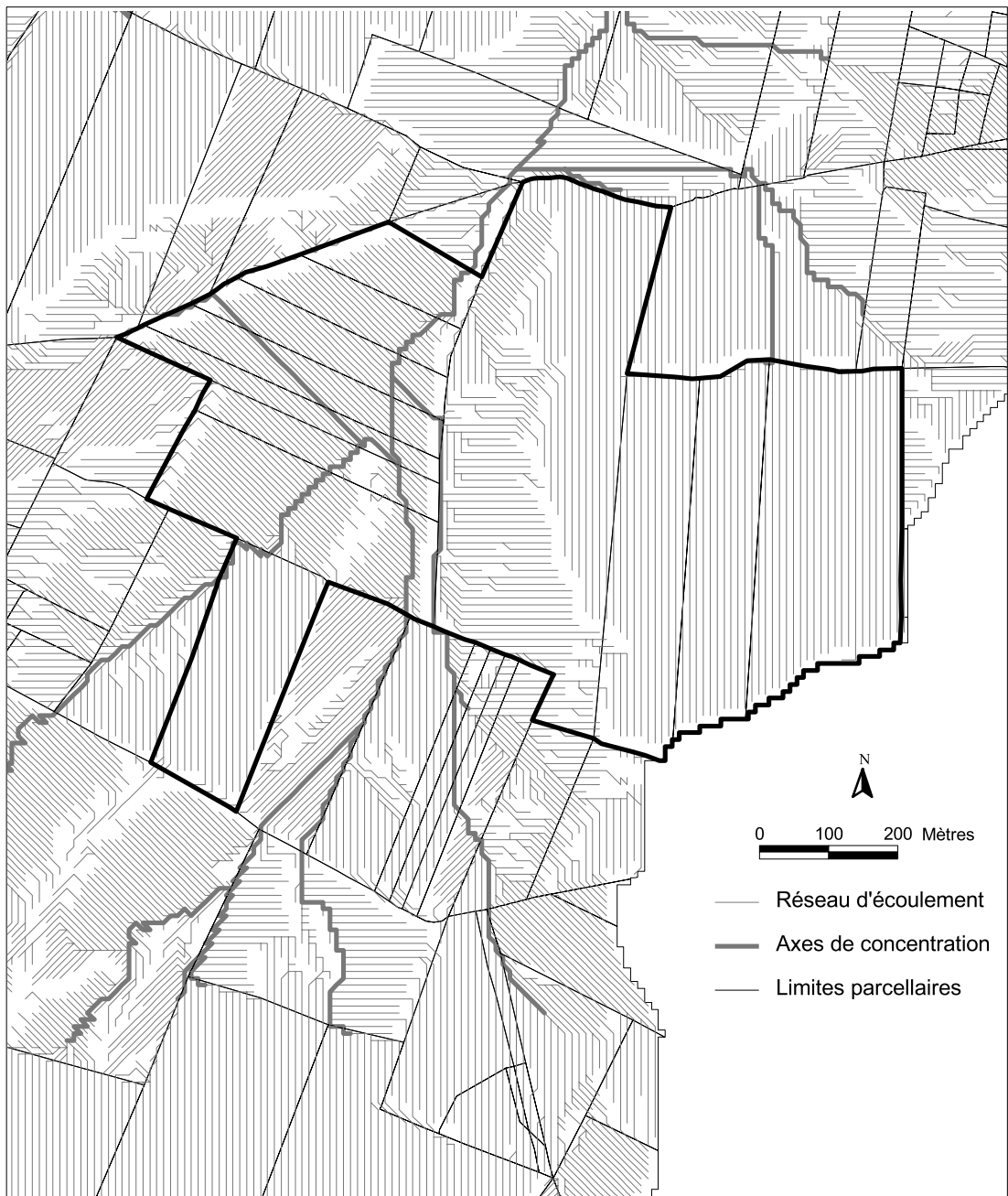


Figure 1 : Réseau d'écoulement du ruissellement dans le SBV 13

3.3 Comparaison avec les valeurs du diagnostic

Nous avons comparé les valeurs de ruissellement obtenues suite aux simulations des modifications des systèmes de culture, avec celles obtenues lors du diagnostic, avec les systèmes de culture actuels. Nous ne présentons ici que les résultats des simulations avec l'événement pluvieux intense (Figure 34), l'autre événement donnant des résultats similaires. Le premier constat qui peut être fait est que les points des simulations reportés sur la figure 6 suivent globalement la même tendance que ceux du diagnostic : plus l'infiltration potentielle moyenne du bassin versant augmente, plus le ruissellement à l'exutoire diminue. L'autre observation est que la gamme de variation des valeurs des simulations est plus importante que celle du diagnostic. En terme d'infiltration moyenne, il y a un écart de 20,4% entre les valeurs extrêmes des simulations, et de seulement 5,1% pour le diagnostic. Pour les valeurs de ruissellement, l'écart est de 32,6% pour les simulations et de 15,6% pour le diagnostic. Cette gamme de variation plus étendue se répartit de manière égale dans les valeurs importantes de ruissellement et dans les faibles valeurs. La différence entre les valeurs maximales est de 11,2%, et de 10% entre les valeurs les plus faibles.

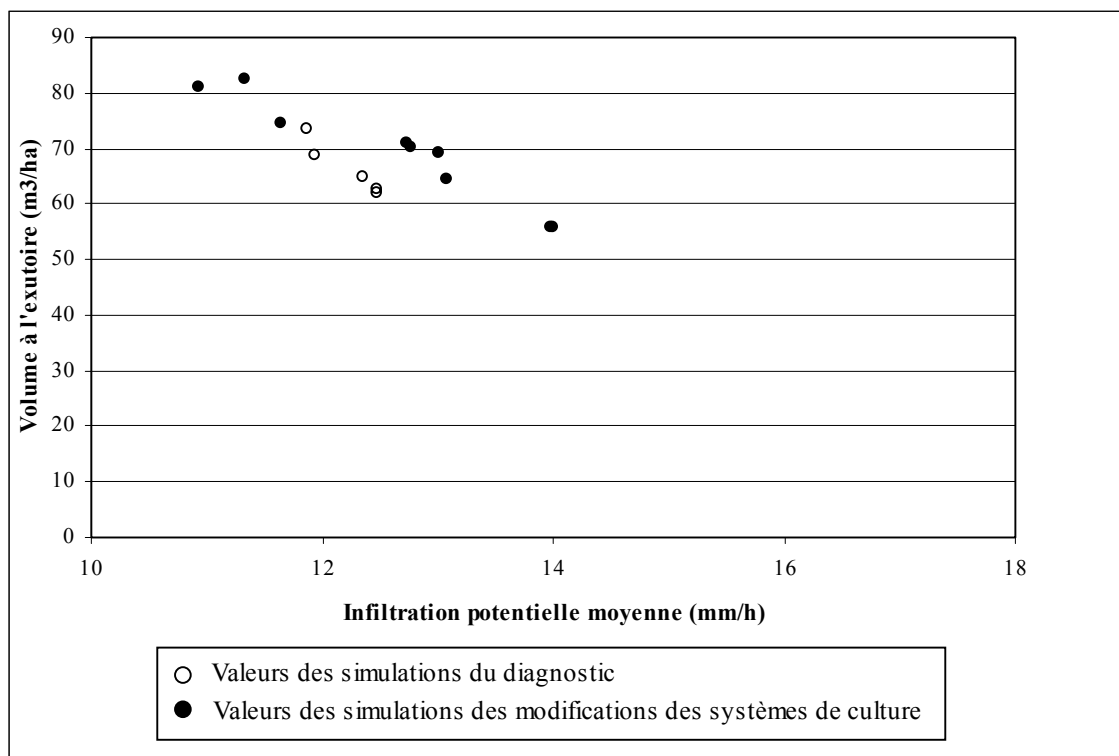


Figure 34 : Comparaison des simulations des modifications des systèmes de culture aux simulations du diagnostic – événement pluvieux intense A

4 Synthèse et discussion : quelle efficacité des modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement ?

La deuxième hypothèse que nous avons formulée pour ce travail de thèse est la suivante : « *dans un bassin versant, l'utilisation des marges de manœuvre spécifiques à chaque exploitation devrait permettre de réduire le flux du ruissellement érosif* ». Dans notre cas d'étude, il s'agit de réduire le ruissellement à l'exutoire du bassin versant de Bourville en hiver, une année donnée, en s'assurant de ne pas aggraver les dégâts au printemps et l'année suivante. Les résultats de nos simulations nous permettent, dans un premier temps, de conclure positivement sur la vérification de cette hypothèse. Nous montrons, dans un deuxième temps, que la régularité de certaines successions culturales peut toutefois limiter les possibilités de réorganisation spatiale des cultures. Enfin, nous exposons à partir d'un cas simplifié comment l'efficacité des modifications des systèmes de culture est dépendante du niveau d'infiltration potentielle des modifications, de leur localisation spatiale les unes par rapport aux autres et des caractéristiques de l'événement pluvieux.

4.1 Une réduction réelle du ruissellement

L'utilisation des marges de manœuvre spécifiques à chacune des exploitations agricoles nous a permis de concevoir différentes configurations du bassin versant de Bourville pour l'année 2002. Les différences entre ces configurations portent sur la répartition spatiale des cultures et sur les itinéraires techniques durant l'interculture. Les simulations de ces configurations en hiver avec le modèle STREAM montrent qu'entre les situations extrêmes, une différence de 31% du ruissellement à l'exutoire du bassin versant est observée. Cela correspond à une diminution de 25,4 m³/ha avec l'événement pluvieux le plus intense, et de 19,8 m³/ha avec le moins intense. A partir de l'assolement de base de 2003, la réduction du ruissellement par une modification similaire des systèmes de culture conduit à une réduction du ruissellement de 14,2% avec l'événement pluvieux le plus intense et de seulement 5,7% avec le moins intense. Nous pouvons donc conclure à une efficacité de la modification des systèmes de culture pour réduire le ruissellement. Toutefois, selon la configuration initiale d'assolement sur le bassin versant, l'application d'un même principe de modification peut conduire à des réductions de ruissellement plus ou moins fortes.

Dans notre cas d'étude, la modification des itinéraires techniques conduit à une réduction du ruissellement plus importante que celle de l'organisation spatiale des cultures pour l'année 2002 en hiver. Cela s'explique par les différences d'infiltration potentielle entre les modifications mises en œuvre :

- modifier l'organisation spatiale des cultures permet d'augmenter potentiellement l'infiltration lorsqu'une culture d'hiver est remplacée par une culture de printemps, et donc une interculture en hiver. L'infiltration de la culture d'hiver est de 2 mm/h. L'infiltration de l'interculture dépend des itinéraires techniques mis en œuvre par les agriculteurs. Elle varie de 2 à 20 mm/h, mais la majorité des intercultures ont une infiltration de 2 ou 5 mm/h, ce qui représente une augmentation maximum de 3 mm/h.
- modifier les itinéraires techniques d'interculture revient à passer d'une infiltration de 2 ou 5 mm/h à une infiltration de 10 ou 20 mm/h, ce qui représente un gain minimum de 5 mm/h.

Il est donc tout à fait normal que nous obtenions de telles différences d'efficacité entre les deux types de modifications. Cependant, la diminution du ruissellement par une modification de la répartition spatiale des cultures n'est pas négligeable, surtout pour l'événement pluvieux peu intense (13%). Il ne faut donc pas négliger cette possibilité d'intervention.

Comparer l'efficacité des modifications des pratiques agricoles pour réduire le ruissellement avec la mise en place d'aménagements est difficile. En effet, les données dont nous disposons pour effectuer une éventuelle comparaison n'ont pas été acquises de manière similaire. Les simulations d'aménagements avec le modèle STREAM réalisées dans des études antérieures correspondent :

- au même bassin versant mais avec des états de surface du début de printemps et donc beaucoup plus infiltrants (Lecomte, 1999 ; Souchère *et al.*, 2003) ;
- à des états de surface hivernaux mais sur un bassin versant de 94 ha entièrement cultivé (Cerdan, 1997).

Une comparaison avec nos simulations hivernales est donc impossible. Quoi qu'il en soit, les modifications de pratiques présentent un avantage par rapport aux aménagements quant à leur faible coût de mise en œuvre. Modifier la localisation spatiale des cultures sur le territoire d'exploitation ne représente aucun coût pour l'agriculteur, dans la mesure où nous avons respecté ses propres règles. En revanche, changer les itinéraires techniques génère un coût pour l'agriculteur ; ce coût est lié à l'achat de matériel spécifique si l'agriculteur ne le possède pas, à l'achat des semences de moutarde, à l'usure du matériel et au gazole consommé. Cependant, en Seine-Maritime, des subventions sont attribuées pour l'achat de matériel en vue de lutter contre l'érosion (taux de subvention de 20 à 30% sur le prix d'achat) ainsi que pour le semis de moutarde (20 à 35 €/ha). Un moyen de supporter plus facilement le coût lié au matériel est l'acquisition en copropriété. Finalement, le coût le plus important lié à la mise en œuvre des modifications des systèmes de culture correspond aux salaires des conseillers chargés d'accompagner les agriculteurs. Toutefois, en Seine-Maritime, cette charge est déjà assumée : des syndicats de bassin versant ont été créés et ceux-ci emploient des animateurs dont la mission est de mettre en place des actions sur le territoire agricole pour diminuer le ruissellement et l'érosion.

4.2 Augmenter les possibilités de réorganisation spatiale des cultures en décalant les successions culturales sur des parcelles voisines

La culture de blé tient une place centrale dans les successions culturales. En effet, celles-ci sont le résultat de combinaisons de motifs de base construits autour du blé, avec un délai de retour de cette culture de deux ou trois ans, et aucune autre culture ne peut remplacer le blé. Ainsi, dans les exploitations dont les successions ne sont basées que sur un seul des deux motifs, le blé revient régulièrement tous les deux ou tous les trois ans sur les mêmes parcelles. Dans les autres exploitations, combinant les deux motifs de base des successions culturales, le blé ne revient pas avec la même régularité et il est possible de remplacer le blé par une autre culture en combinant les deux délais de retour.

La régularité du retour du blé dans certaines exploitations conduit à des flots de culture de blé d'une surface importante, résultant d'une conjonction fortuite des successions culturales sur des parcelles voisines appartenant à des agriculteurs différents. Un exemple en est donné sur la Figure 35. Il s'agit d'un des sous bassins versants principaux, celui situé à l'ouest en l'occurrence (SBV 1, 510 ha de SAU et 374 ha de terres labourables, annexe 8). Les parcelles figurées sur la carte sont toutes en blé en 2002. Ces parcelles représentent 18,5% des terres labourables du SBV1 et alimentent toutes le talweg principal. On note des possibilités d'infiltration du ruissellement : des parcelles de l'agriculteur JCO dans celles de l'agriculteur BOL, et des parcelles d'ARO dans celles de JCO. Soulignons en outre que les eaux de ruissellement venant de l'amont peuvent s'infiltrer sur l'ensemble de ces parcelles. Dans ces conditions, il serait donc intéressant de faire en sorte que ces parcelles ne soient pas toutes en blé la même année, cette culture n'infiltrant que 2 mm/h en hiver. Cependant, les agriculteurs MDE, BOL et JCO ont des successions culturales avec un motif de blé de 3 ans et il s'avère que sur les parcelles figurées sur la carte, les successions sont synchrones : tous les 3 ans, ces parcelles qui occupent 15% des terres labourables, sont en blé ; ce fut le cas en 1996, 1999 et donc 2002. Pour éviter d'avoir cet ensemble de parcelles en blé la même année, il convient de désynchroniser les successions culturales, ce qui signifie pour certaines parcelles d'appliquer une fois un délai de retour de deux ou quatre ans, ou d'implanter deux ans de suite du blé. Dans tous les cas, les règles de succession de cultures ne seront pas respectées et les agriculteurs devront modifier les successions appliquées sur d'autres parcelles de l'exploitation afin de préserver l'assolement de l'exploitation. Un décalage des modifications n'est donc pas simple à mettre en œuvre mais l'effet serait durable tant que les agriculteurs maintiennent un délai de retour fixe pour le blé.

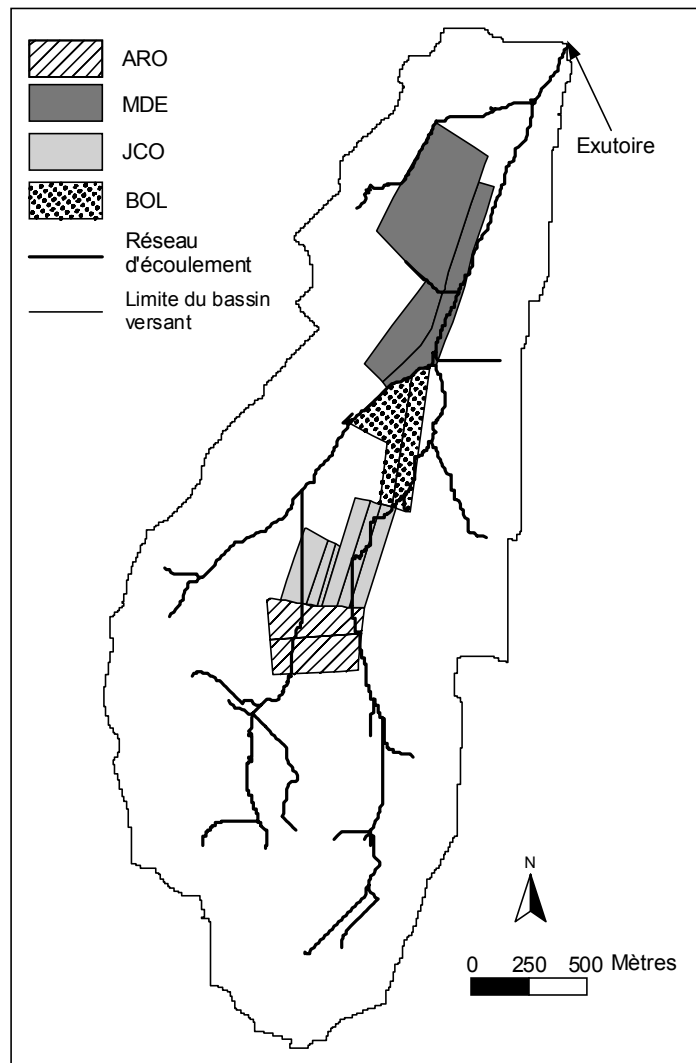


Figure 35 : Illustration de la contrainte posée par la culture de blé pour une modification de l'organisation spatiale des cultures – SBV 1

4.3 Interaction événement pluvieux – niveau d'infiltration – organisation spatiale

Les simulations pour l'année 2002 en hiver ont mis en évidence que la réduction du ruissellement par une modification simultanée de l'organisation spatiale des cultures et des itinéraires techniques était plus importante que la somme des réductions issue de la mise en oeuvre séparée des deux modifications, cela avec l'événement pluvieux intense. Avec l'événement pluvieux peu intense, nous obtenons l'inverse. Cette différence de complémentarité entre les deux types de modification est le résultat d'une interaction entre l'augmentation de l'infiltration engendrée par les modifications, l'organisation spatiale de ces modifications et les caractéristiques de l'événement pluvieux. Nous illustrons cette interaction à partir d'un cas très simplifié (Figure 36 et Figure 37) qui fait intervenir trois parcelles, P1, P2 et P3, de surface égale, et positionnées sur un versant : P1, situé à l'amont, ruisselle dans

P2 qui elle-même ruisselle dans P3. Nous appliquons sur ces parcelles deux événements pluvieux d'une heure : l'un de 13 mm et l'autre de 14 mm. Nous considérons que la pluie d'imbibition est nulle pour l'ensemble des parcelles, ce qui simplifie le calcul du bilan ruissellement / infiltration.

Dans le premier exemple (Figure 36), la situation de départ correspond au cas où chaque parcelle à une capacité d'infiltration de 10 mm/h. Deux modifications des systèmes de culture sont envisagées :

- une modification de l'occupation du sol sur la parcelle amont, qui permet d'augmenter l'infiltration de 10%, soit une infiltration de 11 mm/h ;
- une modification de l'itinéraire technique sur la parcelle aval, qui permet d'augmenter l'infiltration de 100%, soit une infiltration de 20 mm/h.

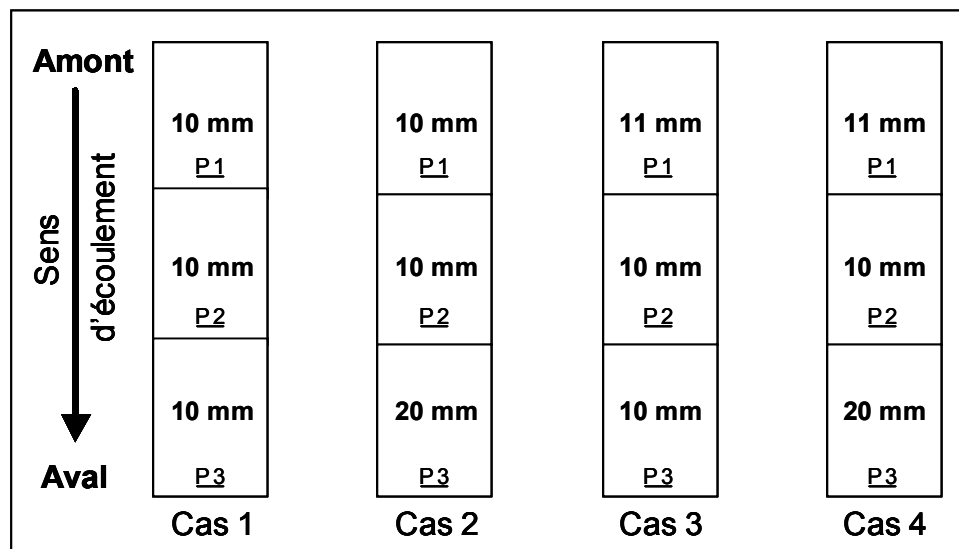


Figure 36 : Exemple 1

Quatre cas sont représentés : aucune modification (cas 1 qui sert de témoin), modification de l'itinéraire technique (cas 2), modification de l'occupation du sol (cas 3) et modification de l'ensemble (cas 4). La valeur du bilan de ruissellement et de la réduction du ruissellement obtenue dans chaque cas sont récapitulés dans le Tableau 39, pour les deux événements pluvieux. Nous constatons qu'avec l'événement pluvieux de 13 mm, le ruissellement est annulé à l'aval du versant, uniquement grâce à une modification de l'itinéraire technique : l'événement pluvieux ne sature pas les 20 mm d'infiltration de la parcelle, et celle-ci peut infiltrer tout le ruissellement venant de l'amont. En comparaison, la modification de l'occupation du sol permet de réduire faiblement le ruissellement. La mise en place simultanée des deux modifications n'apporte aucun gain supplémentaire, la modification de l'occupation du sol est « redondante ». A l'inverse, avec l'événement pluvieux de 14 mm, les effets des deux modifications se complètent. Dans le cas 2, le changement d'itinéraire technique sur la parcelle aval ne permet pas de réduire totalement le ruissellement. La

modification de l'occupation du sol permet comme précédemment de ne réduire légèrement le ruissellement, mais cette réduction s'ajoute à celle obtenue par la modification de l'itinéraire technique lorsque ces deux modifications sont mises en œuvre simultanément.

	Cas 1	Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	Bilan	Bilan	% Réduction	Bilan	% Réduction	Bilan	% Réduction
Événement pluvieux 13 mm	9	0	100%	8	11%	0	100%
Événement pluvieux 14 mm	12	2	83%	11	8%	1	92%

Dans le second exemple (Figure 37), la parcelle amont à déjà une occupation du sol plus infiltrante que les deux autres : 11 mm/h au lieu de 10 mm/h. Les modifications apportées sont les suivantes :

- l'itinéraire technique est modifié sur la parcelle amont, ce qui lui confère une infiltration de 20 mm/h (cas2) ;
- la localisation spatiale de l'occupation du sol infiltrant 11mm/h est permutée avec celle de la parcelle aval (cas 3) ;
- les occupations du sol des parcelles amont et aval sont permutées et l'itinéraire technique est modifié, la parcelle aval ayant cette fois une capacité d'infiltration de 20 mm/h (cas 4).

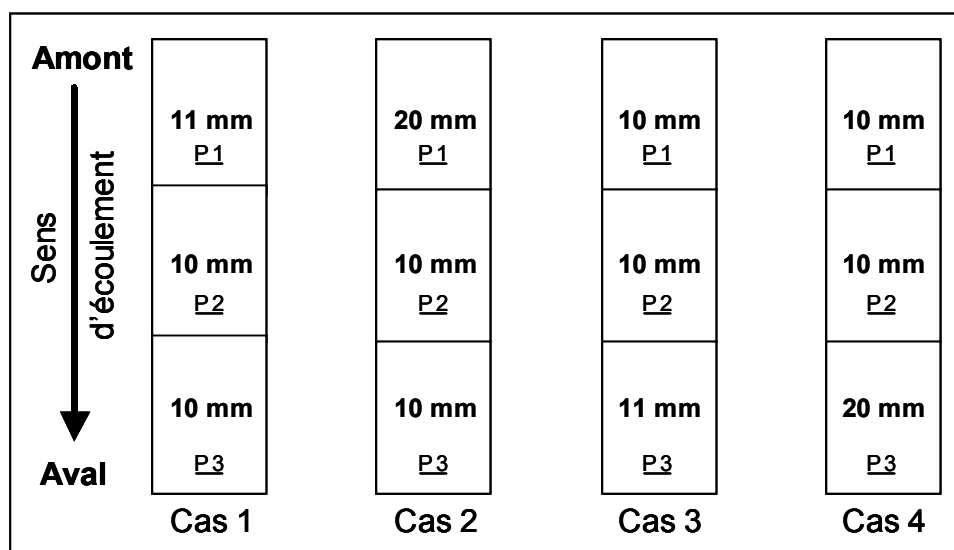


Figure 37 : Exemple 2

Pour les deux événements pluvieux, il existe une interaction positive entre les deux modifications (Tableau 40). Modifier l'itinéraire technique sur la parcelle amont permet de réduire le ruissellement car cette parcelle infiltre alors la totalité des précipitations de l'événement pluvieux. Permuter la localisation spatiale des cultures des parcelles amont et

aval n'a pas d'effet car l'occupation du sol permutée à l'aval est saturée par les deux événements pluvieux ; elle ne peut donc pas infiltrer du ruissellement provenant des parcelles amont. En revanche, en permutant les occupations du sol et en modifiant l'itinéraire technique en même temps, la parcelle aval dont la capacité d'infiltration n'est alors pas saturée par les précipitations, infiltre une partie ou la totalité du ruissellement venant de l'amont.

Tableau 40 : Bilan et % de réduction du ruissellement – exemple 2

	Cas 1	Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	Bilan	Bilan	% Réduction	Bilan	% Réduction	Bilan	% Réduction
Événement pluvieux 13 mm	8	6	20%	8	0%	1	100%
Événement pluvieux 14 mm	11	8	27%	11	0%	2	82%

Ces deux exemples illustrent les trois types de complémentarité entre la modification des itinéraires techniques et celle de la localisation spatiale des cultures : redondance des effets de chacune des modifications, complémentarité des effets ou interaction positive. A l'échelle d'un bassin versant de 1 000 ha comme celui de Bourville, les différents cas coexistent pour un même événement pluvieux et en modifiant l'événement pluvieux les complémentarités entre modifications des systèmes de culture sont modifiées.

Conclusion du chapitre

L'utilisation des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture spécifiques à chacun des agriculteurs du bassin versant de Bourville nous a permis de concevoir pour l'année 2002 différentes configurations du bassin versant. Celles-ci résultent de modifications d'organisation spatiale des occupations du sol et de modifications des itinéraires techniques. Les simulations de ruissellement réalisées avec deux événements pluvieux d'intensité différentes, montrent que ces modifications des systèmes de culture permettent de réduire le ruissellement de manière significative en hiver, sans engendrer des dégâts plus importants au printemps et à l'hiver suivant au sein du bassin versant, ni à l'extérieur.

Une comparaison des valeurs de ruissellement obtenues suite aux modifications des systèmes de culture à celles du diagnostic basé sur les systèmes de culture mis en place entre 1996 et 2001, met en évidence une gamme de variation beaucoup plus importantes dans le cas des simulations des modifications. Il en ressort que laisser les systèmes de culture s'organiser par le simple fait des décisions prises individuellement par les agriculteurs peuvent conduire à des valeurs de ruissellement plus importantes que celles observées actuellement.

Les conditions particulières de notre cas d'étude conduisent à une efficacité plus importante des modifications des itinéraires techniques que celles de l'organisation spatiale des occupations du sol. C'est la conséquence du gain d'infiltration plus important permis par les itinéraires techniques. De tels changements sont donc à privilégier, d'autant plus qu'ils se conçoivent à l'échelle individuelle de l'exploitation agricole. Néanmoins, modifier l'organisation spatiale des systèmes de culture est intéressant pour deux raisons :

- la réduction du ruissellement n'est pas négligeable et permet pour l'événement pluvieux le plus intense de produire une interaction positive avec la modification des itinéraires techniques ;
- elle n'est pas limitée par des conditions climatiques défavorables, contrairement à la mise en œuvre d'une modification des itinéraires techniques. Les années très humides, elle peut ainsi constituer le moyen le plus efficace pour réduire le ruissellement par les pratiques agricoles.

Par ailleurs, pour accroître les possibilités de modification de l'organisation spatiale des occupations du sol, il serait nécessaire de désynchroniser certaines successions de cultures qui conduisent à avoir régulièrement du blé sur des parcelles voisines qui ruissellent en hiver. Ce type de modification imposerait d'aller plus loin dans les modifications des systèmes de culture que ce que nous nous sommes autorisés, en ne respectant pas, une année donnée, les règles de succession culturale.

Enfin, l'efficacité relative des différentes modifications n'est pas indépendante de leur localisation dans le bassin versant et du type d'événements pluvieux. Suivant le cas, les effets des modifications peuvent être redondants ou au contraire aboutir à une interaction positive.

CHAPITRE 6

Synthèse & Perspectives

Chapitre 6 : Synthèse et perspectives

L'étude que nous avons réalisée sur le bassin versant de Bourville avait pour objectif de définir une méthodologie qui permette, en tenant compte du fonctionnement technique des exploitations agricoles, de concevoir et de localiser des modifications de systèmes de culture au sein d'un petit bassin versant agricole, dans le but de limiter les problèmes de ruissellement érosif. Il nous importait, par ailleurs, que cette méthodologie soit transférable aux personnes en charge de bâtir et de mettre en œuvre des plans d'actions pour limiter les coulées boueuses (conseillers de chambre d'agriculture, animateurs de syndicat de bassin versant, etc.). Dans ce chapitre, nous examinons dans quelle mesure nous sommes parvenus à répondre aux objectifs fixés.

Si nous avons effectivement réussi à proposer des modifications des systèmes de culture qui réduisent de manière significative le ruissellement érosif tout en étant compatibles avec le fonctionnement des exploitations agricoles, nous nous sommes placés dans des conditions particulières qu'il est utile de préciser. C'est ce que nous abordons dans la première partie de ce chapitre. Dans la seconde, nous discutons du caractère opérationnel de la méthodologie proposée, condition nécessaire à un transfert aux acteurs de terrain. Enfin, dans la troisième et dernière partie, nous revenons sur l'enjeu annoncé en introduction, à savoir : généraliser la méthodologie mise au point pour le ruissellement érosif à d'autres processus écologiques similaires impliquant, eux aussi, des transferts latéraux entre parcelles voisines ; ces processus s'analysent, de ce fait, sur des espaces continus susceptibles d'englober plusieurs systèmes de culture de différentes exploitations agricoles.

1 Efficacité environnementale de la méthodologie proposée

Dans notre étude, nous avons volontairement limité notre champ d'action, à savoir :

- l'analyse a porté sur un seul bassin versant et c'est seulement *a posteriori* que nous avons vérifié que les modifications proposées avaient pas ou peu de répercussions sur le ruissellement produit sur d'autres bassins versants.
- les conditions climatiques considérées ne comprennent pas les événements pluvieux orageux qui peuvent pourtant avoir des conséquences non négligeables sur le ruissellement.
- nous n'avons pris en compte que le processus de ruissellement, or il est rare que les pratiques agricoles n'agissent que sur un seul processus écologique.

Dans cette partie, nous examinons successivement ce qu'impliquent ces trois simplifications et la manière dont il est possible d'y remédier.

1.1 Liens entre bassins versants résultant de la structure des territoires d'exploitation

Proposer de modifier les systèmes de culture dans d'exploitations agricoles en n'évaluant les conséquences que sur un seul bassin versant peut poser problème. En effet, il se peut que le parcellaire des exploitations recoupe plusieurs bassins versants ; ceci dépend de :

- la superficie des bassins versants au regard de celle des exploitations agricoles : plus les bassins versants sont réduits et les exploitations étendues, plus la probabilité d'intersection des territoires d'exploitation avec plusieurs bassins versants est élevée ;
- la dispersion des parcelles au sein des territoires d'exploitation : pour un rapport de superficie donné entre bassin versant et territoires d'exploitation, plus les parcelles sont dispersées, plus elles appartiennent à différents bassins versants.

Or, les modifications de systèmes de culture proposées, pour une partie seulement du territoire d'exploitation, ne sont pas sans conséquence sur le reste du territoire :

- modifier l'occupation du sol de certaines parcelles a des répercussions sur d'autres parcelles, l'agriculteur ayant un assolement à respecter sur l'ensemble de ses parcelles ;
- insérer des opérations culturales pour limiter le ruissellement n'est pas toujours possible sur l'ensemble des parcelles du fait des contraintes de l'organisation du

travail ; il faut parfois choisir de le faire sur certaines parcelles au détriment d'autres parcelles.

Lorsque nous proposons de modifier les systèmes de culture dans un bassin versant, il apparaît donc nécessaire d'évaluer les répercussions possibles dans les bassins versants où sont situées les autres parcelles des exploitations ; nous les appelons bassins versants « liés ». Si nous appliquons ce principe de manière stricte, cela nous amènerait de proche en proche, à devoir analyser la totalité des bassins versants de la région d'étude. Il nous faut donc fixer des limites à ce principe, et considérer que certaines parcelles peuvent être exclues de l'analyse. Il nous semble ainsi que les parcelles des agriculteurs exploitant le moins de surface dans le bassin versant considéré peuvent être exclues, sous réserve que l'ensemble de ces parcelles ne représente qu'un faible pourcentage de la superficie totale du bassin versant. Ces parcelles sont dites « isolées » car elles correspondent généralement à des parcelles éloignées du corps de ferme. Il s'agit aussi parfois de parcelles regroupées dans un îlot important mais situées en bordure du bassin versant étudié.

Pour le bassin versant de Bourville, nous avons fixé une limite à 10% des terres labourables du bassin et à 15 ha des terres labourables par exploitation. Ce double seuil correspondait, en effet, à une rupture dans la distribution des surfaces de terres labourables par exploitation. Toutefois, il serait nécessaire de tester l'effet d'une variation du taux de 10% des terres labourables du bassin versant, ceci pour le bassin de Bourville, mais aussi pour d'autres configurations de parcellaires et de topographie.

L'application de ce principe fait émerger deux types de bassins versants liés selon que le lien avec le bassin versant étudié tient à des parcelles isolées ou non. Dans le cas de parcelles non isolées, deux stratégies sont envisageables :

- La première consiste à s'assurer que, sur ces parcelles extérieures au bassin versant étudié, les modifications proposées ont peu de répercussions négatives. C'est ce que nous avons fait dans le cadre de notre étude.
- L'autre option est de mener l'étude sur l'ensemble des bassins versants liés, en les hiérarchisant s'ils sont trop nombreux.

Une source de données, intéressante pour l'identification des bassins versants liés, pourrait être la cartographie des territoires d'exploitation commandée par l'ONIC. Réalisée à partir de photos aériennes, elle devrait être généralisée à l'ensemble du territoire national d'ici 2005. Sous réserve de son accessibilité, cette cartographie permettrait de croiser les territoires d'exploitation avec le découpage en bassins versants. Sur un territoire de gestion (syndicat de bassin versant, contrat rural, communauté de communes, etc.), il serait alors possible d'identifier les bassins versants à étudier seuls, et ceux dont il est nécessaire de coupler l'analyse, ou du moins de s'assurer que les modifications des systèmes de culture proposées dans un des bassins n'ont pas de répercussions négatives dans les autres.

1.2 Conséquences des événements pluvieux orageux

Pour réaliser le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement et pour tester l'effet de leurs modifications, nous n'avons considéré que des événements pluvieux non orageux. Dans ces conditions, nous avons pu montrer que les niveaux de ruissellement, au printemps, étaient toujours inférieurs à ceux simulés en hiver, en raison de la plus grande capacité d'infiltration des parcelles : couvert végétal des cultures d'hiver développé et états de surface des semis des cultures de printemps non dégradés. Cependant, au printemps, des orages peuvent se produire et dégrader les états de surface des semis récents dont le couvert végétal n'est pas encore assez développé pour protéger la surface du sol. Un autre type de situation mérite d'être considéré, celui d'événements pluvieux orageux s'abattant sur les états de surface tels que nous les avons définis pour nos simulations : quel est l'effet des modifications des systèmes de culture que nous avons proposées en hiver et quelles sont leurs conséquences au printemps ?

1.2.1 Orage dégradant les états de surface des semis des cultures de printemps

Les cultures les plus sensibles à une dégradation rapide consécutive à un orage survenant dans les jours suivant le semis sont : la betterave sucrière, le maïs et les surfaces en gel semées au printemps. En effet, les orages de printemps sont plus fréquents à partir des mois d'avril – mai, période de semis de ces cultures. Les cultures de lin et de pois se sèment plus précocement et sont moins soumises à cet aléa climatique. Quant aux plantations de pommes de terre, nous avons déjà considéré que leur état de surface avait une capacité d'infiltration minimale.

Nous avons donc réalisé une simulation en partant de la configuration du bassin versant de Bourville en 2002³⁵ au printemps que nous avons modifiée en affectant l'infiltration minimale de 2 mm/h aux betteraves sucrières, au maïs et aux surfaces en gel. Les volumes d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin versant simulés sont les suivants :

- avec l'événement pluvieux le plus intense : 61 675 m³, soit 56,8 m³/ha ;
- avec l'événement pluvieux le moins intense : 23 728 m³, 21,9 m³/ha.

Cela représente une augmentation d'environ 20 m³/ha pour les deux simulations par rapport à la configuration de printemps qui n'a pas été dégradée par un orage. Le niveau de ruissellement simulé avec l'événement pluvieux intense est dans la gamme de ceux obtenus lors des simulations hivernales avec le même événement pluvieux ; il se positionne même

³⁵ Configuration obtenue suite aux modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement en hiver 2001-2002.

parmi les valeurs les plus faibles (Figure 34 p. 181). Le ruissellement s'avère donc plus important au printemps, mais dans des proportions équivalentes au ruissellement hivernal.

1.2.2 Événement pluvieux orageux

Afin de simuler les conséquences d'un événement pluvieux orageux, nous avons retenu la pluie de fréquence cinquantennale utilisée par le bureau d'étude Aqua-Sol pour réaliser une étude diagnostic sur le bassin versant de Bourville et évaluer l'efficacité des aménagements qu'ils proposent pour gérer les conséquences d'événements pluvieux catastrophiques Aqua-Sol (2002). Cette pluie correspond à un cumul de 24 mm en une heure, au lieu de 22 mm en 2h19min et 29,6 mm en 4h58min pour les événements de référence A et B utilisés dans notre étude. Pour nos simulations, nous avons considéré qu'elle s'abattait sur un sol humide résultant d'un cumul de précipitations durant les dernières 48 heures de 50 mm. Nous nous sommes donc placés dans des conditions très défavorables.

Nous avons simulé cet événement pluvieux sur les deux configurations extrêmes de l'hiver 2002 :

- avec la configuration la plus ruisselante, nous avons obtenu un volume de 157 394 m³ à l'exutoire du bassin versant, soit 144,9 m³/ha ;
- avec la configuration la moins ruisselante résultant d'une modification des systèmes de culture, le volume simulé à l'exutoire est de 118 902 m³, soit 109,5 m³/ha.

Nous remarquons que l'effet des modifications des systèmes de culture est non négligeable puisque cela permet de réduire de 24% le volume d'eau à l'exutoire du bassin versant. Cependant globalement les volumes d'eau sont beaucoup plus importants que ceux obtenus avec l'événement A : +79% pour la configuration ruisselante et +97% pour la configuration moins ruisselante.

Au printemps, la simulation avec l'événement de fréquence cinquantennale et la configuration la moins ruisselante, donne un volume de ruissellement de 114 636 m³, soit 105,6 m³/ha. Cela équivaut au triple du volume simulé avec l'événement A. L'ordre de grandeur est, cette fois, similaire au volume simulé en hiver, contrairement aux simulations réalisées avec les événements A et B, non orageux, pour lesquelles le volume au printemps était toujours inférieur à celui d'hiver.

Ces simulations montrent que dans le cas d'un événement pluvieux catastrophique, les volumes de ruissellement sont doublés, voir triplés au printemps, par rapport à un événement pluvieux non orageux (événement A). Dans ce cas, l'effet d'une modification des systèmes de culture est limité, et il est alors nécessaire d'envisager, en complément, la mise en place d'aménagements pour éviter les dégâts catastrophiques qu'un tel événement pluvieux pourrait engendrer. Cependant, pour le dimensionnement des aménagements, les modifications

possibles des systèmes de culture devraient être prises en compte, car elles peuvent modifier significativement les niveaux de ruissellement comme l'ont montré les deux simulations de l'hiver 2002. Par ailleurs, il faudrait également considérer les gains d'infiltration qui pourraient être obtenus par la mise en œuvre d'autres techniques culturales comme les techniques culturales simplifiées.

1.3 D'autres processus écologiques dont la maîtrise est antagoniste à celle du ruissellement

Le fait de ne chercher à réduire que le ruissellement nous a amenés à sélectionner les modifications des systèmes de culture les plus efficaces de ce point de vue. Cependant ces modifications peuvent causer des dégradations environnementales si nous considérons d'autres processus écologiques.

Ruissellement et érosion linéaire

Les modifications que nous avons proposées ont pour but d'augmenter l'infiltration en ameublissant la surface du sol et en positionnant des surfaces infiltrantes à l'aval de surfaces ruisselantes. Une des conséquences possibles est une augmentation du risque d'érosion linéaire dans les parcelles concernées par les modifications si le ruissellement y est concentré.

Ruissellement et érosion diffuse

Nous avons vu, dans le premier chapitre, que réduire le ruissellement et l'érosion diffuse, à l'échelle parcellaire, par la même technique culturale n'était pas toujours possible. Nous illustrons ici qu'à l'échelle du bassin versant, le même constat peut être fait. Nous avons simulé l'érosion diffuse sur les six configurations hivernales du bassin versant de Bourville (1997 à 2002) utilisées pour le diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement, avec les deux événements pluvieux A et B (paragraphe 2.2 p. 105). Les simulations ont été réalisées avec le module érosion diffuse du modèle STREAM, qui permet de simuler les départs de terre ainsi que les dépôts au sein du bassin versant (Cerdan *et al.*, 2002b). Ce module n'est disponible qu'avec le SIG ArcInfo. Il a été construit dans le même esprit que le module ruissellement : seuls les processus dominants sont pris en compte, et les paramètres d'entrée sont peu nombreux. Par rapport aux paramètres d'entrée du module de ruissellement, nous avons seulement dû recueillir pour chaque événement pluvieux simulé l'intensité maximale sur six minutes. Les caractéristiques des deux événements pluvieux sont :

- événement pluvieux intense (A) : 22 mm en 2h19, 37,2 mm de pluie antécédente et 46 mm/h d'intensité maximale sur six minutes ;
- événement pluvieux peu intense (B) : 29,6 mm en 4h58, 9,2 mm de pluie antécédente et 20 mm/h d'intensité maximale sur six minutes.

Les résultats des douze simulations (six configurations hivernales et deux événements pluvieux) sont reportés sur la Figure 38. En abscisse, figure le ruissellement à l'exutoire du bassin versant et, en ordonnée, les départs de terre par érosion diffuse à l'exutoire. Cette représentation permet de mettre en évidence que les configurations les moins ruisselantes ne sont pas forcément les moins érosives. Ainsi pour l'événement A, nous remarquons que pour l'hiver 1997 l'érosion diffuse est quasi équivalente à celle de l'hiver 2002, alors que le ruissellement de l'hiver 1997 est supérieur de 17% à celui de 2002. Inversement, le volume d'eau ruisselée est quasi-équivalent pour les hivers 1997 et 1999, alors que l'érosion de l'hiver 1999 est supérieure de 11% à celle de l'hiver 1997. Avec l'événement B, nous retrouvons les mêmes types de résultats, les valeurs de ruissellement et d'érosion diffuse étant plus faibles.

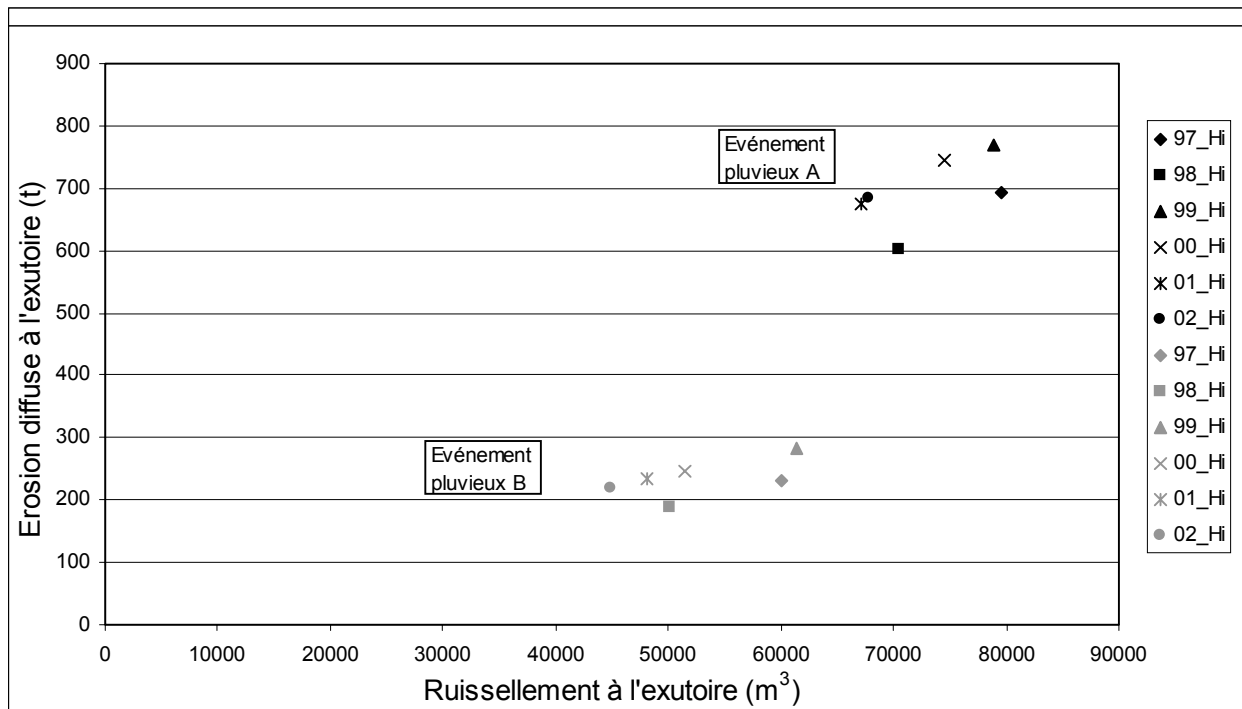


Figure 38 : Ruissellement et érosion diffuse à l'exutoire du bassin versant de Bourville

Une hypothèse permettant d'expliquer cet antagonisme d'effets vis-vis de l'érosion diffuse et du ruissellement réside dans la position des surfaces infiltrantes dans le bassin. En effet, elles sont celles qui présentent le plus de risque d'érosion diffuse. Ainsi :

- plus les surfaces infiltrantes sont à l'amont, moins elles sont efficaces pour réduire le ruissellement. Cependant les départs de terre provenant de ces parcelles peuvent se déposer davantage au sein du bassin et ne pas atteindre l'exutoire. Une telle configuration est donc potentiellement plus ruisselante mais présente des départs de terre par érosion diffuse plus faibles.

- Si les parcelles infiltrantes sont localisées préférentiellement à l'aval du bassin versant, les effets sont alors inversés, les départs de terres atteignant rapidement l'exutoire.

Cette hypothèse mériterait d'être approfondie à travers un diagnostic plus complet de l'effet des systèmes de culture sur l'érosion diffuse, comme nous l'avons fait sur le ruissellement.

Ruissellement et pollution azotée

La réduction du ruissellement peut également aller à l'encontre de la diminution de la pollution azotée. Nous avons effectivement testé les possibilités d'introduire des opérations de déchaumage à socs, durant l'interculture, afin d'augmenter la capacité d'infiltration. Or, un travail du sol, suite à la récolte, favorise la minéralisation de l'azote organique des résidus de récolte, et augmente le risque de lessivage des nitrates vers la nappe.

Nous voyons donc que maîtriser un processus écologique par une modification des systèmes de culture doit se faire en analysant les autres processus écologiques qui peuvent être affectés par les modifications envisagées. Cela peut conduire à réaliser des compromis dans le choix des modifications, ceci en fonction des problèmes posés par les différents processus. Par exemple, en Haute-Normandie, bien que la maîtrise de la pollution azotée soit un enjeu secondaire au regard des problèmes de coulées boueuses, elle est néanmoins importante : l'ensemble de la région est classé en zone vulnérable depuis février 2003 dans le cadre du second programme d'actions de la directive nitrate européenne³⁶. Ainsi, si les risques de ruissellement et de lessivage d'azote coexistent dans une même parcelle, l'implantation de moutarde serait plus intéressante : elle permet de réduire le ruissellement et limite également les pertes d'azote ainsi que l'érosion diffuse. Concernant l'érosion concentrée, les modifications des pratiques agricoles pour limiter le ruissellement doivent s'accompagner d'une gestion particulière des zones de concentration du ruissellement : bandes tassées et semis multiples, non-déchaumage ou bien bandes enherbées.

1.4 Conclusion

Le fait d'avoir considéré uniquement des conditions climatiques non orageuses en hiver n'apparaît pas trop limitant dans la mesure où :

- des orages de printemps dégradant les états de surface des semis tardifs ne conduisent pas à des volumes d'eau plus importants que ceux observés en hiver ; néanmoins la variabilité des orages au printemps, et plus généralement des conditions climatiques, rend difficile la prévision des états de surfaces à cette période ;

³⁶ Directive européenne CEE 91-676 du 12/12/1991, ayant pour objet la maîtrise de la pollution azotée de l'eau.

- un événement catastrophique ne provoque pas plus de ruissellement au printemps qu'en hiver. Toutefois, notons là une des limites du modèle STREAM : les pluies peuvent dégrader fortement les états de surface au cours de l'orage, processus qui n'est pas pris en compte par le modèle STREAM.

En conséquence, si des aménagements sont mis en place pour gérer le ruissellement hivernal, ils devraient être aussi correctement dimensionnés pour le printemps. Une étude plus approfondie du printemps nous semble néanmoins nécessaire. De plus en cas d'orage, les pertes en terre peuvent être plus importantes du fait de l'érosion de type rigoles/inter-rigoles, et, dans ce cas là, l'utilisation du ruissellement comme indicateur des risques d'érosion concentrée n'est peut-être pas le plus pertinent.

Par ailleurs, la maîtrise du ruissellement par les pratiques agricoles nécessite de réaliser une double hiérarchie :

- hiérarchie entre les bassins versants liés au bassin versant d'étude, afin d'identifier ceux dans lesquels les modifications des systèmes de culture auront le plus de répercussions ;
- hiérarchie entre les processus écologiques dont les conséquences négatives peuvent être augmentées du fait des pratiques mises en œuvre pour réduire le ruissellement ; ceci afin de séparer ceux qui posent réellement problème dans la zone d'étude et ceux dont la gestion n'est pas prioritaire.

Cela amènera à proposer des modifications des systèmes de culture en réalisant des compromis : les modifications ne seront peut-être pas optimales pour la réduction du ruissellement, mais elles n'augmenteront pas le ruissellement dans les principaux bassins versants liés et elles n'augmenteront pas les problèmes posés par d'autres processus écologiques identifiés comme prioritaires.

2 Caractère opérationnel de la méthodologie

La méthodologie d'identification des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture afin de réduire le ruissellement érosif est coûteuse en temps de recueil et d'analyse des données. La recherche de différentes configurations de bassin versant limitant le ruissellement demande encore de l'expertise et dépend du type d'événements pluvieux pour une gamme de pratiques donnée. Toutefois, les résultats acquis dans le cadre de ce travail de thèse permettent de simplifier ces deux étapes : connaissance locale des systèmes de culture pour identifier les marges de manœuvre et typologie des situations pour orienter la recherche de configurations de bassins versants limitant le ruissellement. Des perspectives d'automatisation de la méthode par la création d'outils informatiques sont envisageables.

2.1 Identification des marges de manœuvre

L'identification des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture découle de l'analyse des règles de constitution des systèmes de culture, à savoir, pour ce qui nous concerne, les règles d'affectation des facteurs de production. L'analyse des règles s'effectue, à partir d'enquêtes en exploitations agricoles, afin de connaître les règles spécifiques à chaque agriculteur. Si cette analyse s'avère fastidieuse, nous avons pu définir, à partir de notre travail, deux modèles généraux valables pour la zone d'étude. Notre expérience nous permet, en outre, de proposer une démarche rapide d'identification des marges de manœuvre.

2.1.1 Règles de constitution des systèmes de culture

2.1.1.1 Localisation spatiale des cultures

Le modèle général de succession culturale établi résulte de différentes combinaisons des règles de délai de retour et de précédents culturels. Elaboré sur la base d'enquêtes, il est cohérent avec les successions de cultures relevées entre 1996 et 2001 dans 26 exploitations. La connaissance de ce modèle peut faciliter la reconstitution des successions culturales dans d'autres exploitations, mais une phase d'enquêtes est toujours nécessaire pour :

- identifier les règles de succession culturale spécifiques à l'agriculteur - parfois plus restrictives que celles du modèle général - ainsi que le type de mise en œuvre des successions de cultures, à savoir planifiée sur plusieurs années ou bien annuelle ;
- préciser les zones cultivables de chaque culture qui varient d'une exploitation à l'autre en fonction des caractéristiques du territoire d'exploitation et des contraintes acceptées par l'agriculteur ;
- connaître l'assolement de l'exploitation.

A partir du modèle général et des informations complémentaires recueillies par enquête, il est possible de reconstituer les successions culturales et leur organisation spatiale sur le territoire d'exploitation.

2.1.1.2 Organisation du travail

Sur la base de l'analyse détaillée de l'organisation du travail entre les mois de juillet et novembre dans les 14 exploitations principales du bassin versant de Bourville, nous avons proposé un calendrier général des itinéraires techniques pour les principales cultures. Cela comprend les différentes opérations culturales et leur période de réalisation, ainsi que les règles de priorité entre opérations culturales devant être réalisées en même temps. La

modélisation complète de l'organisation du travail requiert toutefois d'acquérir des données spécifiques à chaque exploitation :

- sur la base du modèle général, il faut préciser les opérations culturales réellement mises en œuvre sur l'exploitation ;
- la vitesse d'avancement des chantiers et les possibilités de mener plusieurs chantiers simultanément, qui dépendent de la main d'œuvre et du matériel disponibles.

2.1.1.3 Conclusion : une reconstitution des systèmes de culture facilitée mais nécessitant des enquêtes complémentaires

Les modèles de successions culturales et de calendrier d'organisation du travail élaborés dans le cadre de notre étude pourront faciliter la reconstitution des systèmes de culture au sein des exploitations agricoles. Une phase d'enquête s'avère toutefois nécessaire pour adapter et compléter ces modèles en fonction des spécificités de chaque exploitation. Les modèles établis pourront être directement utilisés dans le cadre d'études sur des bassins versants proches de celui de Bourville. C'est le cas en particulier du bassin versant de Canville, situé à l'est de celui de Bourville. Sur ce bassin versant, des aménagements ont été construits et une animation des actions agricoles devrait débiter.

En Haute-Normandie, chaque animateur de bassin versant est chargé de gérer le territoire d'un grand bassin versant hydrographique regroupant plusieurs sous bassins versants proches géographiquement. Ainsi, le syndicat du bassin versant du Dun et de la Veule, dont fait partie Bourville, a une superficie totale de 15 900 ha. Dans ces conditions, une analyse approfondie des systèmes de culture sur un échantillon restreint d'agriculteurs devrait leur permettre, par la suite, de simplifier l'étude dans les autres exploitations agricoles du bassin versant qu'ils animent. Dans cette même optique, une analyse régionale des successions culturales, à partir des données TERRUTI, peut fournir aux animateurs des indications sur les grands types de successions culturales présentes au sein de leur bassin versant (Schott, 2002).

2.1.2 Des règles de constitution des systèmes de culture aux marges de manœuvre

A partir de la connaissance des règles de constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole, nous avons identifié les marges de manœuvre dont disposaient les agriculteurs pour les modifier.

Concernant la localisation spatiale des cultures, nous avons proposé d'utiliser quelques paramètres qui découlent directement de l'analyse des règles. Nous pouvons ainsi classer les exploitations en fonction de l'importance des marges de manœuvre laissées par les règles et des possibilités de modification de la localisation spatiale des cultures qui en résultent.

Pour ce qui est de l'organisation du travail, nous avons évalué les marges de manœuvre pour l'introduction de nouvelles techniques culturales sur la base d'une simulation. En effet, estimer les marges de manœuvre sur la base de paramètres simples n'était pas envisageable. Nous avons développé une feuille de calcul Excel qui intègre les principes du logiciel OTELO que nous avons simplifiés. Cette feuille de calcul permet de réaliser un diagnostic rapide en estimant les jours disponibles pour réaliser des opérations culturales limitant le ruissellement, dans des conditions climatiques données.

Au final, nous pouvons classer, de cette manière, les différentes exploitations agricoles d'un bassin versant en fonction de l'importance des marges de manœuvre relatives à la modification de la localisation spatiale des cultures et à l'introduction de nouvelles techniques culturales.

2.2 Recherche de configurations de bassin versant limitant le ruissellement en combinant les marges de manœuvre individuelles

La recherche de configurations limitant le ruissellement pour le bassin versant de Bourville nous a conduit à faire deux constats susceptibles de simplifier la recherche et la mise en œuvre des modifications. D'une part, il n'est pas toujours nécessaire de rechercher toutes les modifications possibles des systèmes de culture, certaines n'étant pas efficaces dans certains cas. D'autre part, la mise en œuvre des modifications des systèmes de culture ne nécessite pas systématiquement une coordination entre les agriculteurs exploitant le bassin versant.

2.2.1 Des modifications des systèmes de culture ne permettant pas toujours de réduire le ruissellement érosif

Nous avons constaté que certaines modifications des systèmes de culture n'étaient pas toujours efficaces vis-à-vis de la réduction du ruissellement mais cela ne vaut que pour les modifications portant sur la localisation spatiale des cultures sur le territoire d'exploitation. En effet, concernant les itinéraires techniques, toute modification de technique culturale augmentant l'infiltration a un effet positif sur la réduction du ruissellement, ceci quelles que soient les parcelles du bassin versant concernées par le changement de technique culturale. A l'opposé, réorganiser l'agencement spatial des cultures, en cherchant à positionner des occupations du sol infiltrantes, à l'aval d'occupations ruisselantes, ne permet de réduire le ruissellement que sous certaines conditions ; nous les détaillons dans les paragraphes suivants. Avant cela, notons, toutefois, que les conditions climatiques ne limitent pas les modifications de localisation des cultures contrairement aux modifications d'itinéraire technique.

Niveau de saturation de l'infiltration des occupations du sol par l'événement pluvieux

Pour chaque occupation du sol du bassin versant, nous pouvons savoir si sa capacité d'infiltration est saturée ou non par l'événement pluvieux. En fonction de la durée de l'événement pluvieux et du cumul des pluies antécédentes, nous pouvons déterminer la hauteur de précipitations que peut infiltrer chaque type d'occupation du sol sur la durée de l'événement. En la comparant avec le cumul des pluies nous pouvons classer les occupations qui ruisselleront et celles qui infiltreront pour l'événement pluvieux donné. S'il y a saturation de l'ensemble des occupations du sol, c'est-à-dire si toutes les parcelles sont ruisselantes, il n'est alors pas possible de réduire le ruissellement en réorganisant l'agencement des cultures dans le bassin. La seule possibilité pour limiter le ruissellement est d'augmenter l'infiltration en positionnant, à l'intérieur du bassin versant, des occupations moins ruisselantes, situées sur des parcelles extérieures au bassin versant. Toutefois, il est impératif de s'assurer que cela n'augmentera pas le ruissellement dans d'autres bassins versants, ou du moins que l'augmentation qui en résultera est acceptable. Nous appelons ce type de modification une réorganisation des cultures inter bassins versants.

Type de connexion hydraulique entre parcelles

Si l'événement pluvieux ne sature pas l'ensemble des occupations du sol du bassin versant, cela signifie que certaines d'entre elles sont infiltrantes. Il est alors possible de chercher à localiser les surfaces infiltrantes en question à l'aval des surfaces ruisselantes, en modifiant l'organisation spatiale des cultures à l'intérieur du bassin versant, ce que nous appelons une réorganisation des cultures intra bassin versant. Mais cela n'est envisageable que si la connexion hydraulique entre les parcelles se fait de manière diffuse. En effet, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, si le ruissellement de la parcelle amont passe dans la parcelle aval en étant concentré, seule une faible partie sera infiltrée (Figure 28 p. 159).

Correspondance entre le territoire du bassin versant et celui des exploitations agricoles

Enfin, une réorganisation des cultures inter bassins versants n'est envisageable que si les territoires d'exploitations ne correspondent pas au territoire du bassin versant étudié. Inversement, plus il y aura de correspondance entre les deux types de territoires, plus il y aura de possibilités de modifier l'agencement spatial des cultures à l'intérieur du bassin versant.

Sur la base de ces trois critères, nous pouvons différencier trois types de situations (Tableau 41) :

- celles où aucune réorganisation des cultures ne permet de réduire le ruissellement,
- celles où seule une réorganisation inter bassins versant est efficace,
- celles où une réorganisation interne au bassin versant peut également limiter le ruissellement.

Tableau 41 : Possibilité de réduire le ruissellement par une réorganisation spatiale des cultures au sein des territoires d'exploitation		
	Correspondance entre territoire du BV et celui des EA	Non correspondance entre territoire du BV et celui des EA
Evénement pluvieux saturant	Aucune	(1)
Evénement pluvieux non saturant et pas de connexion hydraulique diffuse entre les parcelles	Aucune	(1)
Evénement pluvieux non saturant et connexions hydrauliques diffuses entre les parcelles	(2)	(1) (2)

BV : Bassin versant / EA : Exploitation agricole

(1) Réorganisation inter bassins versants / **(2)** Réorganisation intra bassin versant

2.2.2 Une mise en œuvre ne nécessitant pas toujours une coordination entre agriculteurs

Là encore, il convient de différencier les modifications des itinéraires techniques de celles de l'agencement spatial des cultures. En effet, modifier les techniques culturales, au sein d'une exploitation, pour augmenter l'infiltration ne nécessite aucune coordination entre agriculteurs, l'efficacité des modifications n'étant pas dépendante des parcelles voisines.

En revanche, modifier l'organisation spatiale des cultures peut nécessiter une coordination des assolements entre exploitations, dans la mesure où des parcelles appartenant à différents agriculteurs sont connectées hydrauliquement de manière diffuse. En effet, si les parcelles ne sont pas connectées entre elles, ou bien uniquement par un écoulement concentré, les possibilités d'infiltration du ruissellement d'une parcelle amont dans une parcelle aval sont très faibles. Dans ce cas-là, le choix des cultures, sur chaque parcelle, peut être raisonné de manière indépendante, si nous nous limitons, comme dans notre étude, à considérer la production de ruissellement au sein du bassin versant. Il est clair qu'il ne peut en être ainsi dès lors que la concentration du ruissellement entraîne de l'érosion linéaire dans les axes de concentration. Dans cette situation, la diminution de la sensibilité au cisaillement des états de surface en aval est d'autant plus nécessaire que les surfaces en amont sont dans un état favorable à la production de ruissellement.

Il en résulte que, pour un bassin donné, la structure du réseau d'écoulement détermine si une coordination est nécessaire ou non entre exploitations agricoles. Or, nous avons vu que, pour le bassin versant de Bourville, le réseau d'écoulement était relativement stable avec les systèmes de culture actuels, la structure du parcellaire n'étant pas modifiée. Nous pouvons donc envisager de définir, au sein d'un bassin versant donné, les zones où la coordination entre agriculteurs sera nécessaire ainsi que les agriculteurs concernés. Pour ce faire, nous nous basons :

- sur un réseau d'écoulement simulé dont nous aurons préalablement testé la stabilité,
- sur le découpage du territoire du bassin versant entre les différentes exploitations agricoles.

2.3 Automatisation de la méthodologie par des outils informatiques

Deux étapes de la méthodologie développée dans cette étude méritent d'être automatisées : l'identification des marges de manœuvre et la recherche de configurations du bassin versant limitant le ruissellement.

2.3.1 Identification des marges de manœuvre

En utilisant des critères simples découlant de l'analyse des règles de localisation spatiale des cultures sur le territoire de l'exploitation, nous avons évalué le niveau des marges de manœuvre pour modifier cette localisation. Les exploitations du bassin de Bourville ont ainsi été classées en trois groupes selon leur marge de manœuvre : aucune, faible ou importante. Cependant, la détermination précise des possibilités de réorganisation, une année donnée, en l'occurrence l'année 2002 pour le bassin versant de Bourville, n'ont été obtenues que par une simulation manuelle des successions culturales. Une informatisation de cette étape au sein d'un logiciel gestionnaire de bases de données permettrait une économie de temps importante et faciliterait l'appropriation de la méthodologie par des conseillers. La Figure 39 donne un aperçu de la structure d'ensemble de la base de données qui pourrait être envisagée : il s'agit de coupler une description des parcelles de l'exploitation aux règles d'affectation des cultures aux parcelles pour en ressortir, une année donnée, les différentes cultures possibles sur chaque parcelle de l'exploitation.

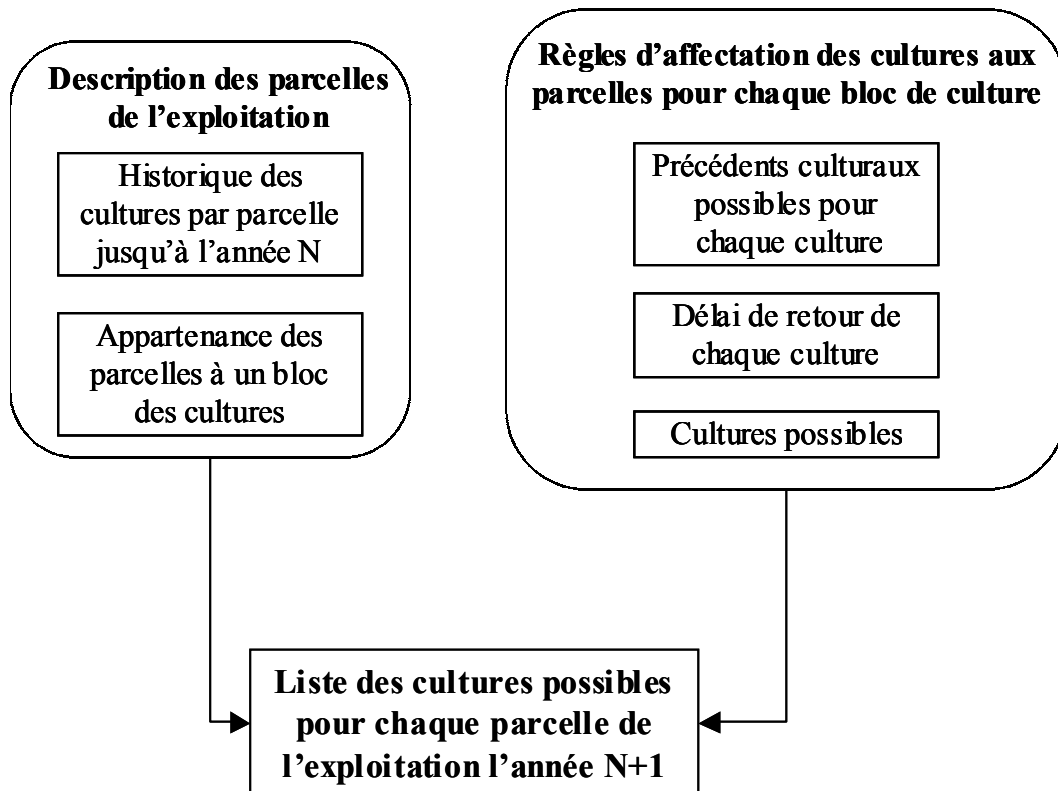


Figure 39 : Principe d'automatisation de recherche des possibilités de modification de l'organisation spatiale des cultures sur le territoire d'une exploitation

Afin d'identifier les marges de manœuvre laissées par l'organisation du travail, nous avons mis au point une feuille Excel permettant de déterminer rapidement les jours disponibles pour l'introduction de techniques culturales. Cela était possible dans la mesure où nous disposions d'un formalisme développé dans le cadre du modèle OTELO. Néanmoins, une des simplifications adoptées, dans l'élaboration de la feuille Excel, pour alléger le diagnostic, entraîne une sous-estimation importante des jours disponibles (lorsque deux chantiers se succèdent pour la même culture, le second chantier ne peut débuter que si le premier est terminé sur l'ensemble de la surface). Sur ce point, une amélioration de la feuille de calcul pourrait être apportée.

2.3.2 Recherche de configurations de bassin versant

Le second type d'outil informatique qu'il est envisageable de développer permettrait de systématiser la recherche de différentes configurations de bassin versant résultant de l'organisation spatiale des systèmes de culture dans le bassin. Le principe consisterait :

- à rechercher, dans un premier temps, à l'aide d'un SIG, les différentes organisations spatiales des systèmes de culture sur le territoire de chaque exploitation compte-tenu de l'assolement de chacune ;

- puis à les combiner entre elles, ce qui permettrait d'obtenir toutes les configurations du bassin versant possibles³⁷.

Un couplage avec le modèle STREAM permettrait, ensuite, d'évaluer la production du ruissellement de chaque configuration, au cours de différents événements pluvieux. Le nombre de configurations de bassin versant pouvant être très élevé, il serait nécessaire de prévoir une procédure de tri rapide permettant de sélectionner celles qui sont le moins ruisselantes, cela pour éviter d'avoir un nombre trop important de simulations à réaliser et pour optimiser le temps à consacrer à ces simulations.

3 Une méthodologie applicable à la maîtrise d'autres processus écologiques par les pratiques agricoles

D'autres problèmes environnementaux s'appréhendent à l'échelle d'espaces continus et mettent en jeu des transferts latéraux entre parcelles. C'est le cas de la pollution des captages d'eau potable lorsqu'elle résulte d'un transfert de polluant par le ruissellement de surface (phytosanitaire, azote) ou bien de processus indépendants du ruissellement comme les flux de gènes entre parcelles. Comme le ruissellement érosif, ces processus peuvent, en partie, être maîtrisés par les pratiques agricoles ; celles-ci doivent être organisées spatialement sur l'entité pertinente pour l'étude du processus écologique en cause (Angevin *et al.*, 2002a ; Colbach *et al.*, 2003). La méthodologie développée pour la maîtrise du ruissellement érosif par les pratiques agricoles pourrait donc avoir un intérêt dans le cadre de la maîtrise de processus écologiques de ce type.

Nous illustrons concrètement ce point à partir de l'exemple de la contamination des récoltes au champ par du pollen et des graines OGM à l'échelle d'un bassin de collecte. Nous considérons ici uniquement les cas du maïs et du colza OGM.

3.1 Le problème environnemental posé

En raison de la demande sociale actuelle, il sera nécessaire pour les organismes de collecte, lors d'une éventuelle mise en culture de variétés OGM, de mettre en place des filières séparées OGM et non-OGM à l'échelle de leurs bassins de collecte (Angevin *et al.*, 2002b ; Le Bail *et al.*, 2001). Pour qu'une récolte soit considérée comme non-OGM, le taux de contamination doit être inférieur à 0,9%. Or, il existe des risques de dispersion des transgènes des parcelles où sont implantées des cultures OGM vers des parcelles voisines. Ces

³⁷ Des travaux de ce type ont débuté à l'université de Rouen.

dispersions par le pollen (Lavigne *et al.*, 1998) ou par les graines (Colbach *et al.*, 2001b) peuvent se produire sur plusieurs centaines de mètres.

Nous nous trouvons dans le cas d'un processus similaire à celui du ruissellement érosif, résultant d'un transfert latéral entre parcelles voisines. Son analyse et sa maîtrise doivent donc s'effectuer à l'échelle d'un espace continu comprenant différents systèmes de culture et plusieurs exploitations agricoles. L'entité spatiale pertinente d'étude est celui des bassins d'approvisionnement des organismes de collecte. A la différence du ruissellement qui peut être en partie infiltré par des parcelles lors de son cheminement vers l'exutoire, l'objectif est ici de réduire toute contamination d'une parcelle à l'autre. En effet, le taux de 0,9% n'autorise qu'une très faible dilution de la récolte de parcelles contaminées avec des récoltes pures.

3.2 Des possibilités de maîtrise par les pratiques agricoles nécessitant d'en étudier la mise en œuvre au sein des exploitations agricoles

3.2.1 Mesures nécessitant une analyse des successions culturales et de leur organisation spatiale

Colbach *et al.* (2001b), Angevin *et al.* (2002b) ont réalisé plusieurs simulations mettant en évidence l'effet du type de succession culturale sur la dispersion du transgène d'une culture de colza OGM. L'augmentation de la fréquence de retour du colza dans la succession de cultures tend à augmenter le nombre de repousses dans des parcelles distantes de plus d'un kilomètre de la parcelle source. Les auteurs ont également montré que, pour une parcelle de colza OGM, le choix de la culture suivante avait des répercussions sur le nombre de repousses.

Dans le cas de la culture du maïs, le risque de dispersion du transgène n'existe que durant la phase de pollinisation. Un moyen de le diminuer est donc d'implanter les cultures OGM et non-OGM sur des parcelles suffisamment éloignées afin que la pollinisation croisée ne puisse pas avoir lieu.

Mettre en place ces différents types de gestion impose de comprendre comment sont construites les successions culturales et comment sont organisées spatialement les cultures sur le territoire des exploitations.

3.2.2 Mesures nécessitant une étude de l'organisation du travail

Dans le cas du maïs, la dispersion des transgènes est essentiellement due au pollen. Deux arguments peuvent être donnés : nous pouvons considérer que, dans les régions tempérées présentant une période de gel hivernal, les repousses de maïs sont quasi-inexistantes ; il

n'existe pas d'espèce sauvage apparentée au maïs sauvage en Europe (Meynard et Le Bail, 2001). Un des moyens de limiter la contamination des parcelles non-OGM est de décaler les périodes de floraison : le pollen OGM est alors produit au moment où les fleurs femelles du maïs non-OGM ne sont pas encore réceptives ou bien ne le sont plus. Cela s'obtient par des choix de variétés de précocités différentes ou un décalage des périodes de semis, ce qui a des conséquences sur l'étalement de la période de récolte. Ce type de mesure peut donc causer des problèmes d'organisation du travail, notamment à la récolte qui est déjà une période chargée durant laquelle les jours disponibles sont faibles.

Si nous prenons maintenant l'exemple du colza, la dispersion des transgènes se fait par le pollen mais aussi par les graines qui sont disséminées de proche en proche et dont le stock est maintenu sur plusieurs années par les repousses. Une gestion consiste à détruire les repousses par voie chimique ou par broyage, à l'intérieur des parcelles mais aussi sur les bordures de champs. Pour être efficace, il est nécessaire d'appliquer deux herbicides ou bien de réaliser un broyage qui peut suffire si celui-ci est bien positionné dans le temps par rapport à la floraison des repousses. (Colbach *et al.*, 2001b). Ces opérations culturales représentent une charge en travail supplémentaire dont la faisabilité doit être étudiée par rapport aux contraintes d'organisation du travail des exploitations agricoles. C'est également le cas du désherbage du colza transgénique qui peut entrer en concurrence avec les semis de blé.

3.3 Apport envisageable de la méthodologie développée pour le ruissellement érosif dans le cadre des recherches actuelles sur la maîtrise des flux de gènes

Les recherches actuelles sont orientées vers la construction de modèles permettant de simuler la dispersion des transgènes dans l'espace en fonction des systèmes de culture. Les deux modèles existants sont GENESYS-colza développé sur une échelle pluriannuelle (Colbach *et al.*, 2001a ; Colbach *et al.*, 2001b) et MAPOD-maïs à l'échelle annuelle (Angevin *et al.*, 2001). Ces deux modèles permettent d'évaluer l'effet des systèmes de culture sur la dispersion d'un transgène pour un parcellaire donné et aussi l'effet de différentes modifications des systèmes de culture.

Des travaux pour développer un générateur de paysages aléatoires, sont également en cours. Il permettra de reconstituer des paysages agricoles en fonction de descripteurs synthétiques de l'organisation spatiale du parcellaire et des cultures. En couplant ce simulateur avec les modèles GENESYS-colza et MAPOD-maïs, l'objectif est de proposer des méthodes génériques de séparation des cultures OGM et non-OGM en fonction des caractéristiques du paysage (Angevin *et al.*, 2002b).

Jusque-là, l'étude des possibilités de mise en œuvre des modifications des systèmes de culture par les agriculteurs n'a pas été abordée. Les premiers travaux sur ce thème vont débiter dans le cadre du programme européen SIGMEA. C'est à ce niveau que notre approche peut trouver son utilité. En effet, nous proposons une démarche qui permet de reconstituer les systèmes de culture mis en œuvre par les agriculteurs en les modélisant sous la forme d'un système de règles de décision. Cette modélisation permet de prendre en compte les contraintes posées par le partage des facteurs de production (terre et travail) entre les différentes productions. Elle contribue aussi à l'évaluation des marges de manœuvre dont disposent les agriculteurs pour modifier leurs systèmes de culture en vue d'un objectif précis, en l'occurrence ici : réduire les flux de gènes.

Compte tenu des possibilités de chaque agriculteur, nous pouvons proposer des modifications des systèmes de culture ainsi que différentes organisations spatiales de ces modifications sur un territoire. La démarche correspondante, développée dans notre travail, s'avère dépendante du processus étudié, le ruissellement érosif, et des interactions entre parcelles qui en découlent. Le principe de recherche d'une organisation spatiale des cultures dans le but de maîtriser les flux de gènes est différent en ce sens qu'il y a moins de possibilités « d'absorption » par certaines parcelles des gènes « produits » par d'autres parcelles. Par ailleurs, dans le cas de la maîtrise du flux de gènes, il est impératif d'avoir une coordination de l'ensemble des agriculteurs afin que certains d'entre eux ne compromettent pas la gestion mise en place par la majorité (Abildtrup et Gylling, 2003), contrairement au cas du ruissellement érosif. En effet, pour ce dernier, nous avons mis en évidence que certaines modifications pouvaient se raisonner indépendamment d'une parcelle à l'autre, et par conséquent d'un agriculteur à l'autre.

Conclusion du chapitre

Concernant l'efficacité environnementale de la méthodologie que nous avons mise au point lors de l'étude du bassin versant de Bourville, il est important de mentionner deux limites qui résultent des choix initiaux :

- le ruissellement ne doit pas être considéré comme le seul processus écologique dans la mesure où sa maîtrise peut aggraver d'autres problèmes environnementaux ;
- il est important de bien prendre en compte les répercussions des modifications mises en œuvre dans le bassin versant étudié, sur les parcelles extérieures au bassin versant ; ces modifications peuvent, en effet, engendrer une augmentation du ruissellement dans d'autres bassins versants.

En conséquence, alors que nous avons cherché à réduire au maximum le ruissellement sur le bassin versant de Bourville, une mise en œuvre de la démarche proposée devrait inclure une prise en compte des parcelles extérieures au bassin et d'autres processus écologiques, dès la conception des solutions. Cela amènerait à faire des compromis en ne cherchant pas systématiquement les modifications des systèmes de culture les plus efficaces vis-à-vis de la réduction du ruissellement.

Concernant le printemps, si l'examen rapide des conséquences d'événements pluvieux orageux au printemps montre que les volumes de ruissellement ne sont jamais plus importants que ceux simulés en hiver, ces résultats sont toutefois à manier avec prudence. En effet la variabilité des états de surface au printemps est difficilement prévisible étant donné celle des conditions climatiques.

Par ailleurs, les possibilités de transfert immédiat de la méthodologie aux acteurs de terrain concernent uniquement les connaissances acquises sur les systèmes de culture locaux. La méthodologie de reconstitution des systèmes de culture et d'analyse des marges de manœuvre requiert des développements informatiques pour être véritablement opérationnelle. Il en est de même pour la recherche d'agencements spatiaux des systèmes de culture pour limiter le ruissellement. Nous avons également constaté que, d'une part, toutes les modifications des systèmes de culture n'étaient pas toujours efficaces et que, d'autre part, la coordination entre agriculteurs n'était pas systématiquement nécessaire. Ces constats facilitent la conception et la mise en œuvre des modifications des systèmes de culture, d'autant plus qu'une étude sociologique a montré sur une commune voisine de Bourville que les coopérations entre agriculteurs n'étaient pas des plus spontanées (Cartier, 1999).

Enfin, des perspectives d'application pour d'autres processus écologiques sont envisageables. L'analyse du cas des flux de gènes entre parcelles montre que c'est la démarche d'analyse des marges de manœuvre qui est le plus facilement exploitable. Toutefois, il est nécessaire que l'effet des systèmes de culture sur le processus écologique soit bien connu au préalable, afin de savoir quelles marges de manœuvre rechercher. La démarche de recherche d'organisations spatiales de modifications de systèmes de culture est, elle, dépendante des spécificités du processus écologique étudié.

CONCLUSION

CONCLUSION

Rappel de l'objectif et de la démarche

Nous sommes partis du constat suivant : si nous considérons les processus écologiques qui mettent en jeu des transferts latéraux entre parcelles voisines, leur maîtrise par les pratiques agricoles nécessite de coordonner dans l'espace les systèmes de culture. Cette coordination doit se faire au sein des exploitations agricoles mais aussi entre exploitations voisines. Pour être facilement mise en œuvre par les agriculteurs, elle doit, en outre, perturber le moins possible l'affectation des facteurs de production aux différentes cultures, notamment la terre et le temps de travail. Dans ces conditions, l'objectif de cette thèse était de mettre au point une méthodologie opérationnelle permettant de concevoir de telles coordinations.

Pour cela, nous avons considéré le cas du ruissellement érosif dans les plaines loessiques du nord de l'Europe, et nous avons pris, en exemple, le Pays de Caux (cas du bassin versant de Bourville). La démarche d'analyse appliquée a été la suivante :

- analyser la constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole dans le but d'en ressortir les marges de manœuvre pour les modifier ;
- rechercher des configurations du bassin versant à partir de la combinaison des modifications des systèmes de culture au sein de chaque exploitation, afin de réduire le ruissellement à l'exutoire du bassin versant.

Nous avons, au préalable, analysé l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement pour en déduire les modifications des systèmes de culture les plus efficaces pour réduire le ruissellement dans les conditions locales de notre étude.

Principaux résultats

L'analyse de la constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation a consisté à déterminer les règles de répartition des facteurs de production en couplant deux méthodes d'analyse : l'analyse des règles d'affectation des parcelles aux cultures et celle des règles d'affectation du temps de travail aux différentes opérations culturales. Cela nous a permis de proposer deux modèles communs à l'ensemble des exploitations agricoles :

- un modèle des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation,
- un modèle de calendrier d'organisation du travail pour les cultures, incluant les règles de priorité entre chantiers, pour une période allant de juillet à novembre.

Ces deux modèles ont été validés sur chacune des 14 exploitations principales du bassin versant de Bourville. De cette analyse, nous avons déduit les marges de manœuvre dont disposaient les agriculteurs pour modifier leurs systèmes de culture, sans remettre en cause les règles qu'ils nous avaient données. Il en est ressorti que, d'une exploitation à l'autre, les marges de manœuvre étaient différentes : elles concernaient l'organisation spatiale des cultures et/ou la modification des itinéraires techniques, et cela à des degrés variables.

Grâce aux résultats de l'analyse précédente et à la connaissance de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement, nous avons conçu des modifications des systèmes de culture au sein de chaque exploitation agricole. Organisées spatialement à l'échelle du bassin versant, elles ont pour but de réduire le ruissellement hivernal à l'exutoire. Les résultats pour l'hiver 2001-2002 montrent qu'une réduction significative du ruissellement peut être obtenue de cette manière. Nous avons simulé avec le modèle STREAM jusque 31% de réduction du ruissellement entre des configurations extrêmes. Les simulations ont également permis de montrer que ces modifications n'entraînaient pas une augmentation du ruissellement au printemps et à l'hiver suivant. Par ailleurs, les différentes simulations portant sur une modification de tout ou partie des systèmes de culture ont mis en évidence qu'il pouvait y avoir dans certains cas une interaction sur le ruissellement, entre la réorganisation spatiale des cultures et les changements d'itinéraires techniques. Nous avons montré que l'existence de cette synergie ainsi que son importance peuvent être le résultat d'une interaction entre le niveau de saturation des états de surface par l'événement pluvieux et leur organisation spatiale au sein du bassin versant.

Au final, à travers le cas d'étude du bassin versant de Bourville, nous sommes en mesure de proposer les bases d'une méthodologie de recherche de modifications des systèmes de culture dans le but de réduire le ruissellement érosif à l'échelle d'un bassin versant. Cette méthodologie repose sur une analyse préalable des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole. Elle présente, cependant, certaines limites que nous détaillons ci-après.

Tout d'abord, nous avons montré que contrairement à l'hiver, les états de surface au printemps étaient très variables ; ceci s'explique par la variabilité des conditions climatiques. C'est pourquoi les résultats obtenus au printemps, doivent être considérés avec prudence et méritent d'être approfondis.

Soulignons deux autres limites :

- lors de la recherche des modifications des systèmes de culture, nous n'avons pas tenu compte des parcelles extérieures au bassin versant, même si elles représentaient une part non négligeable dans d'autres bassins versants. Néanmoins, nous nous sommes assurés que les répercussions des modifications sur ces parcelles n'avaient pas de conséquences négatives sur le ruissellement dans les bassins versants concernés ;
- les modifications des systèmes de culture testées sont susceptibles d'avoir des conséquences sur d'autres processus écologiques au sein du bassin versant ; nous ne les avons pas évaluées.

La prise en compte de ces deux points pourrait amener à réaliser des compromis et par conséquent à proposer des modifications peut-être moins efficaces vis-à-vis de la réduction du ruissellement.

Notre objectif était également de produire une méthodologie opérationnelle. Actuellement, la mise en œuvre de cette méthodologie est très coûteuse en temps, que ce soit pour l'identification des marges de manœuvre ou la recherche de configurations de bassin versant limitant le ruissellement. Plusieurs résultats acquis dans le cadre de notre étude permettent d'ores et déjà de simplifier la démarche :

- nous proposons une méthode d'identification des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture au sein d'une exploitation ; celle-ci est basée sur une analyse préalable des règles d'affectation des facteurs de production aux différentes productions de l'exploitation, analyse qui mobilise des méthodes déjà établies ;
- nous avons ébauché, pour un bassin versant et des systèmes de culture donnés, une classification des situations, qui permet de déterminer les types de modifications des systèmes de culture efficaces, en fonction des caractéristiques des territoires d'exploitation, du réseau d'écoulement du ruissellement et des événements pluvieux.
- nous avons constaté qu'une coordination des modifications entre exploitations n'est pas toujours nécessaire. Ce besoin de coordination dépend du réseau d'écoulement et du parcellaire des exploitations.

Par ailleurs, les connaissances acquises sur les systèmes de culture locaux peuvent aider à la compréhension des systèmes de culture dans d'autres bassins versants géographiquement proches.

Notons, enfin, que cette démarche n'a, dans un premier temps, été conçue que de façon théorique sans être mise en œuvre. Pour cela, il sera indispensable d'étudier comment elle est perçue à la fois par les animateurs de bassins, dont le rôle est d'accompagner la recherche de solutions, et par les agriculteurs eux-mêmes. C'est seulement alors qu'une généralisation de la méthode sera envisageable.

Perspectives

Concernant l'analyse des marges de manœuvre pour modifier la localisation des cultures, nous n'avons pas remis en cause les règles énoncées par les agriculteurs. Or celles-ci engendrent, dans certaines exploitations, des contraintes de successions culturales plus fortes que celles imposées par la conduite agronomique des cultures. Il serait donc intéressant d'évaluer les marges de manœuvre avec des niveaux de contraintes plus faibles et d'en mesurer les conséquences sur les possibilités de réduire le ruissellement. Envisager des contraintes plus faibles nécessite de comprendre les facteurs explicatifs des règles des agriculteurs à l'origine de contraintes élevées, facteurs qui peuvent être autres qu'agronomiques. Notons que dans certains cas ces contraintes élevées résultent d'un souci de simplification des décisions à prendre de la part de l'agriculteur.

Un autre point mérite d'être approfondi, à savoir la compréhension des interactions possibles entre modification de l'agencement spatial des cultures et modification des itinéraires techniques. Cela permettrait de concevoir des organisations spatiales des systèmes de culture réduisant le ruissellement encore plus efficacement.

Le développement d'outils informatiques permettrait d'automatiser l'identification des marges de manœuvre au sein des exploitations agricoles et la recherche d'organisations spatiales des systèmes de culture, compte tenu des ces marges de manœuvre. Cela aurait pour avantage :

- de rendre la méthodologie beaucoup plus opérationnelle du fait du gain de temps ; les enquêtes en exploitations pour reconstituer les systèmes de culture resteront toutefois nécessaires ;
- de pouvoir explorer les points évoqués ci-dessus beaucoup plus systématiquement, à savoir, l'effet du niveau de contraintes fixé sur les marges de manœuvre et les conséquences sur le ruissellement. Cela en faciliterait la compréhension.

Enfin, il existe des perspectives d'application de la méthodologie à d'autres processus écologiques lorsque leur maîtrise impose de modifier des systèmes de culture et de les organiser spatialement. Mais de telles applications ne sont envisageables que dans la mesure où les effets des systèmes de culture sur les processus en question sont connus.

BIBLIOGRAPHIE

- Abildtrup, J. & Gylling, M. (2003) Genetically modified crops and agricultural landscapes: spatial constraints on farmers' crop rotations. In: *Proceedings of the first European Conference on Co-existence of Genetically Modified crops with Conventional and Organic Crops, Borupsgaard, 13-14 November 2003*. 194-196.
- Agence de l'Eau Seine Normandie. (2003) *Suivi de la qualité des eaux souterraines du bassin Seine Normandie - Année 2001*. AESN / DASS et DRASS, 150 pages
- Armstrong, A.C., Davies, D.B. & Castle, D.A. (1990) Soil water management and the control of erosion on agricultural land. In: *Soil erosion on agricultural land* (Ed. by J. Boardman, I. D. L. Foster & J. A. Dearing), John Wiley & Son Ltd. 569-574.
- Angevin, F., Colbach, N., Meynard, J.M. & Roturier, C. (2002a) Analysis of necessary adjustments of farming practices. In: *Scenarios for co-existence of genetically modified, conventional and organic crops in European agriculture, Technical Report Series of the Joint Research Center of the European Commission, EUR 20394 EN* (Ed. by A.-K. e. a. Bock).
- Angevin, F., Colbach, N., Meynard, J.M. & Roturier, C. (2002b) Utilisation des modèles GeneSys-Colza et Mapod-Maïs pour raisonner des stratégies de ségrégation de filières et évaluer la faisabilité de certains seuils de pureté dans différents systèmes de culture et de production. In: *Séminaire de restitution de l'AIP-INRA "OGM et Environnement"*, Paris. 50-54.
- Angevin, F., Klein, E., Choimet, C., Meynard, J.M., de Rouw, A. & Sohbi, Y. (2001) Modélisation des effets des systèmes de culture et du climat sur les pollinisations croisées chez le maïs. In: *Pertinence économique et faisabilité d'une filière sans utilisation d'OGM*, INRA - FNSEA. 21-36.
- Aqua-Sol (2002) *Syndicat mixte du bassin versant du Dun et de la Veule, sous bassin versant de Bourville, Proposition d'aménagement*. 18 pages + annexes
- Archer, D.W., Pikul, J.L. & Riedell, W.E. (2002) Economic risk, returns and input use under ridge and conventional tillage in the northern Corn Belt, USA. *Soil & Tillage Research*, **67**, 1-8.
- Arduin-Dumazet (1898) *Voyage en France (17) : Littoral du Pays de Caux, Vexin, Basse-Picardie*. Berger-Levrault, Paris. 394 pages.

- AREAS. (2001) *Recensement des ouvrages de lutte contre les inondations en Seine-Maritime*. 68 pages + annexes
- Attonaty, J.M., Chatelin, M.H., Poussin, J.C. & Soler, L.G. (1990) Un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail en agriculture. In: *Représentation, modélisation, développement* (Ed. by P. Matarasso), Montpellier. 310-314.
- Aubry, C. (1995) *Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde*. Thèse, INA P-G, Paris, 271 pages.
- Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F. & Papy, F. (1998) Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole : la constitution de systèmes de culture. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, **31**, 25-43.
- Auzet, A.V. (1987) *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques*. Rapport Ministère de l'environnement / Ministère de l'agriculture, CERAG-URA 95 CNRS, 60 pages
- Auzet, A.V. (1990) *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects aménagements*. Rapport Ministère de l'environnement / Ministère de l'agriculture, CERAG-URA 95 CNRS, 39 pages
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Ludwig, B. & Guérif, J. (1998) Effects of agricultural land use on spatial and temporal distribution of soil erosion in small catchments : implications for modelling. In: *Modelling Soil Erosion by Water* (Ed. by J. Boardman & D. Favis-Mortlock), Springer, Berlin. *NATO-ASI Series I-55*. 309-338.
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Ludwig, B. & Maucorps, J. (1993) Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena*, **20**, 41-62.
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Maucorps, J. & Ouvry, J.-F. (1990) An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris Basin, France. In: *Soil erosion on agricultural land* (Ed. by J. Boardman, I. D. L. Foster & J. A. Dearing), John Wiley & Son Ltd. 383-400.
- Baudry, J., Burel, F., Thenail, C. & Le Coeur, D. (2000) A holistic landscape ecological study of the interactions between farming activities and ecological patterns in Brittany, France. *Landscape and Urban Planning*, **50**, 119-128.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F. & Monke, E.J. (1980) ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE*, **23**(4), 938-944.
- Benoît, M., Deffontaines, J.P., Gras, F., Bienaimé, E. & Riela-Cosserat, R. (1997) Agriculture et qualité de l'eau : une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. *Cahiers Agricultures*, **6**, 97-105.
- Beven, K. & Kirkby, M. (1979) A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrologic Science Bulletin*, **24**, 43-69.
- Boardman, J. (1993) The sensitivity of downland arable land to erosion by water. In: *Landscape sensitivity* (Ed. by D. S. G. Thomas & R. J. Allison), John Wiley & Son Ltd. 211-228.
- Boardman, J., Evans, R. & Ford, J. (2003a) Muddy floods on the South Downs, southern England: problem and responses. *Environmental Science & Policy*, **6**, 69-83.
- Boardman, J., Poesen, J. & Evans, R. (2003b) Socio-economic factors in soil erosion and conservation. *Environmental Science & Policy*, **6**, 1-6.

- Boiffin, J. (1984) *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse, INA P-G, Paris, 320 pages + annexes.
- Boiffin, J. & Monnier, G. (1994) Suppression du labour et érosion hydrique dans le contexte agricole français : bilan et possibilité d'application des références disponibles. In: *Simplification du travail du sol, Vol. 65*, Editions INRA, Les Colloques, Paris (France). 85-103.
- Boiffin, J., Papy, F. & Eimberck, M. (1988) Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I.-Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, **8**(8), 663-673.
- Boiffin, J., Papy, F. & Peyre, Y. (1986) *Systèmes de production, systèmes de culture et risque d'érosion dans le Pays de Caux*. INRA / INA P-G, 154 pages + annexes
- Botterweg, P., Leek, R., Romstad, E. & Vatn, A. (1998) Erosion control under different political and economic conditions. *Soil & Tillage Research*, **46**, 31-40.
- Capillon, A. & Caneill, J. (1987) Du champ cultivé aux unités de production : un itinéraire obligé pour l'agronome. *Cahier de l'ORSTOM, série sciences humaines*, **23**(3-4), 409-420.
- Cartier, S. (1999) *Entre recours à l'état et recours au marché, principes de solidarité face au risque de ruissellement érosif en Pays de Caux*. Thèse, Université Paris X - Nanterre, 543 pages + annexes.
- Cerdan, O. (1997) *Prise en compte des états de surface des parcelles et de leur organisation spatiale dans la modélisation du ruissellement et de l'érosion à l'échelle du bassin versant*. Mémoire de DEA, Université de Nancy, 51 pages
- Cerdan, O. (2001) *Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés*. Thèse, Université d'Orléans, 175 pages + annexes.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Bourennane, H. & Souchère, V. (2002a) Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil & Tillage Research*, **67**(1), 99-108.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A. & Saby, N. (2002b) Modelling interill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes*, **16**, 3215-3226.
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A. & Le Bissonnais, Y. (2002c) Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : Sealing and Transfer by runoff erosion related to agricultural management. *Catena*, **46**, 189-205.
- Colbach, N., Angevin, F., Fargue, A. & Meynard, J.M. (2003) Using the GeneSys model quantifying the effect of cropping systems on gene flow from GM rape varieties to rape volunteers for designing and evaluating scenarios for co-existence of GM, non-GM and organic crops. In: *Proceedings of the first European Conference on Co-existence of Genetically Modified crops with Conventional and Organic Crops, Borupsgaard, 13-14 November 2003*. 163-165.
- Colbach, N., Clermont-Dauphin, C. & Meynard, J.M. (2001a) GENESYS: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers - I. Temporal evolution of a population of rapeseed volunteers in a field. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **83**, 235-253.
- Colbach, N., Clermont-Dauphin, C. & Meynard, J.M. (2001b) GENESYS: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape

- volunteers - II. Genetic exchanges among volunteer and cropped populations in a small region. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **83**, 255-270.
- De Ploey, J. (1989) Erosional systems and perspectives for erosion control in european loess areas. *Soil Technology Series*, **1**, 93-102.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G. & Ritsema, C.J. (1996) Lisem : a single-even physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I : Theory, input and output. *Hydrological Processes*, **10**, 1107-1117.
- DEFRA. (1999) *Controlling soil erosion*. London, 44 pages
- Delahaye, D. & Hauchard, E. (1998) Analyse spatiale des processus de ruissellement en Pays de Caux au travers de quelques épisodes critiques. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, **3**, 306-315.
- Delahaye, D., Hauchard, E. & Freire-Diaz, S. (2002) Impact des échelles morphologiques sur l'organisation spatiale de l'occupation du sol : conséquences sur le fonctionnement du ruissellement érosif. In: *Proceedings of the international symposium - Géomorphology : from expert opinion to modelling, Strasbourg, 26-27 avril 2002* (Ed. by D. Delahaye, F. Levoy & O. Maquaire). 149-158.
- Dobremez, L., Perret, E., Delattre, F. & Camacho, O. (2002) Le maintien des paysages ouverts en montagne : une contribution différenciée selon les exploitations agricoles. Illustration en Tarentaise. *Ingénieries, N° spécial "Aménités"*, 53-65.
- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H. & Van Ittersum, M.K. (2003) ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, **19**(2), 239-250.
- Doré, T., Sebillotte, M. & Meynard, J.M. (1997) A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural systems*, **54**(2), 169-188.
- Dregne, H.E. (1988) *Erosion, productivity and sustainable agriculture*. Center for arid and semiarid land studies, Texas Techn. Univ., Lubbock, 11 pages
- Dubreuil, N. (2001) *Utilisation régionale d'un modèle de ruissellement : STREAM*. Rapport de DESS, Université d'Orléans, 49 pages + annexes
- Dubreuil, N., King, C., Lecomte, V., Souchère, V. & Le Bissonnais, Y. (2002) *Régionalisation d'un modèle de ruissellement en zone agricole (STREAM)*. BRGM/RP-51115-FR, 52 pages
- Edwards, L., Burney, J.R., Richter, G. & MacRae, A.H. (2000) Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **81**, 217-222.
- Elyakime, B. & Bruno, J.F. (2000) Gestion de la lutte contre une érosion de versant, avec dégâts sur site public. *Economie Rurale*, **297**, 66-77.
- Flanagan, D.C. & Nearing, M.A. (1995) *USDA Water Erosion Prediction Project documentation*. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, USA.
- Fohrer, N., Möller, D. & Frede, H.G. (2001) An interdisciplinary modelling approach for the development of soil and water conservation strategies. In: *Multidisciplinary approaches to soil conservation strategies - Proceedings of the international symposium, Müncheberg, Germany, May 2001* (Ed. by K. Helming), ZALF, bericht 47. 173-178.

- Fox, D.M. & Le Bissonnais, Y. (1998) Process-based analysis of aggregate stability effects on sealing, infiltration and interrill erosion. *Soil Science Society of America Journal*, **62**(3), 717-724.
- Fullen, M.A. (1998) Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soil in east Shropshire, UK. *Soil & Tillage Research*, **46**, 41-49.
- Gallien, E., Le Bissonnais, Y., Eimberck, M., Benkhadra, H., Ligneau, L., Ouvry, J.F. & Martin, P. (1995) Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricultures*, **4**, 171-183.
- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J & Lautreidou, J.P. (1990) A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**, 313-328.
- Govers, G., Takken, I. & Helming, K. (2000) Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, **20**, 131-146.
- Gril, J.J. & Duvoux, B. (1991) *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion - Conditions d'adaptation des méthodes américaines*. CEMAGREF DICOVA, 157 pages
- Gyssels, G. & Poesen, J. (2003) The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**, 371-384.
- Gyssels, G., Poesen, J., Nachtergaele, J. & Govers, G. (2002) The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. *Soil & Tillage Research*, **64**, 189-201.
- Helming, K. (2001) *Multidisciplinary approaches to soil conservation strategies*. ZALF, bericht 47, 191 pages.
- Hénin, S. & Gobillot, T. (1950) L'érosion en France. *BTI*, **50**, 431-433.
- His, M. (1996) *Possibilités d'insertion de pratique de lutte contre le ruissellement dans le calendrier de travail des exploitations agricoles du Pays de Caux*. Mémoire de fin d'étude, ISAB, 61 pages + annexes
- Jankauskas, B. & Jankauskiene, G. (2003) Erosion-preventive crop rotation for landscape ecological stability in upland regions of Lithuania. *Agriculture Ecosystems & Environments*, **95**, 129-142.
- Jaziri, W., Paquet, T., Gaillard, D. & Alimi, A. (accepté) Knowledge Modelling and Multi-Agent Simulation: Application to Flood Risks. In: *IEEE-SMC, octobre 2002*, Tunisie.
- Kauark Leite, L.A. (1990) *Réflexion sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole*. Thèse, ENPC, Paris, 342 pages + annexes.
- Kinell, P.I.A. & Risse, L.M. (1998) USLE-M: empirical modelling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*, **62**, 1667-1672.
- King, C., Le Bissonnais, Y., Carloz, R., Hill, J., Rasio, R., Clément, P., Bonn, F., Pouliot, J., Desprats, J.F., Udelhoven, T., Cerdan, O., Remond, A., Lenôtre, N., Ajmar, A. & Souadi, T. (1997) *Floodgen, spaceborne recognition of indicators of excess runoff generating areas*. First interim report to the CEO/CEE programme, 49 pages + annexes
- Koga, N., Tsuruta, H., Tsuji, H. & Nakano, H. (2003) Fuel consumption-derived CO₂ emissions under conventional and reduced tillage cropping systems in northern Japan. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **99**, 213-219.

- Kwaad, F.J.P.M., Van Der Zijp, M. & Van Dijk, P.M. (1998) Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands. *Soil & Tillage Research*, **46**, 13-21.
- Landais, E. & Deffontaines, J.P. (1988) Les pratiques des agriculteurs : point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique. *Etudes Rurales*, **109**, 125-158.
- Landers, J.N. (2001) How and why the Brazilian zero tillage explosion occurred. In: *Sustaining the Global Farm, selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, 1999, Purdue University* (Ed. by D. E. Stott, R. H. Mohtar & G. C. Steinhardt). 29-39.
- Langlois, P. & Delahaye, D. (2002) RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface. *Revue Internationale de Géomatique*, **12**(4), 461-487.
- Lavigne, C., Klein, E.K., Vallée, P., Pierre, J., Godelle, B. & Renard, M. (1998) A pollen-dispersal experiment with transgenic oilseed rape. Estimation of the average pollen dispersal of an individual plant within a field. *Theoretical and Applied Genetics*, **96**, 886-896.
- Le Bail, M., Meynard, J.M. & Angevin, F. (2001) Proposition de stratégies de ségrégation au champ et en entreprise de collecte-stockage. In: *Pertinence économique et faisabilité d'une filière sans utilisation d'OGM*, INRA - FNSEA. 5-21.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V. & Martin, P. (accepté) Spatial and temporal variability of soil surface characteristics influencing infiltration, runoff and interrill erosion of cultivated fields. *Catena*.
- Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Lecomte, V., Cerdan, O., Papy, F., Martin, P., Souchère, V., Bruno, J.F., Lebrun, P., Fox, D., Morschel, J. & Elyakime, B. (2003) *Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés : phénomènes physiques et dispositifs d'action*. Rapport final, programme GESSOL, 69 pages
- Le Bissonnais, Y., Gallien, E., Kuzucuoglu, C., Montier, C., Peyre, Y. & Guilbaut, P. (1996) *Les coulées de boue liées à l'érosion des terres agricoles - Dossier Haute-Normandie*. Rapport Ministère de l'environnement / Ministère de l'agriculture, INRA / CNRS / ADEPRINA, 35 pages
- Le Bissonnais, Y. & Gascuel-Oudou, C. (1998) L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré. In: *Sol : interface fragile* (Ed. by P. Stengel & S. Gelin), INRA Editions, Coll. Mieux Comprendre, Paris. 129-144.
- Le Bissonnais, Y. & Papy, F. (1997) Les effets du ruissellement et de l'érosion sur les matières en suspension dans l'eau. In: *L'eau dans l'espace rural, production végétale et qualité de l'eau* (Ed. by C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu & F. Papy), INRA Editions, Paris. 265-279.
- Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C. & Daroussin, J. (2002) *L'érosion hydrique des sols en France*. INRA/IFEN, Orléans, 103 pages + annexes
- Lecomte, V. (1999) *Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant : processus, déterminisme et modélisation spatiale*. Thèse, ENGREF, Paris, 242 pages + annexes.
- Ludwig, B. (2000) Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion. De la parcelle au bassin versant. *Ingénieries*, **22**, 37-47.

- Ludwig, B., Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., King, D. & Chadoeuf, J. (1996) Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etude et Gestion des Sols*, **3**(1), 53-70.
- Ludwig, B., Boiffin, J., Chadoeuf, J. & Auzet, A.V. (1995) Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena*, **25**, 227-252.
- Ludwig, B., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Cerdan, O. & Jetten, V. (accepté) Intégration des pratiques agricoles dans la modélisation du ruissellement et de l'érosion : les modèles LISEM et STREAM. In: *Ecospace*, INRA Editions, Coll. Science Update, Paris. .
- Mabit, L., Laverdière, M.R. & Bernard, C. (2002) L'érosion hydrique : méthodes et études de ce cas dans le Nord de la France. *Cahiers Agricultures*, **11**, 195-206.
- Maillard, A., Vacheron, C. & Perrotet-Müller, J. (1990) Lutte contre l'érosion du sol en grandes cultures par le semis sous litière. Résultat d'essais dans la pratique avec le maïs et la betterave sucrière. *Revue Suisse Agricole*, **22**(4), 215-226.
- Martin, P. (1997) *Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du Nord ouest de l'Europe : applications aux intercultures du Pays de Caux*. Thèse, INA P-G, Paris, 184 pages + annexes.
- Martin, P. (1999) Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Tillage Research*, **52**, 233-245.
- Martin, P., Joannon, A., Souchère, V. & Papy, F. (accepté) Management of soil surface characteristics for soil and water conservation, case of a silty loam region: the Pays de Caux. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Martin, P., Le Bissonnais, Y., Benkhadra, H., Ligneau, L. & Ouvry, J.F. (1997) Mesures du ruissellement et de l'érosion diffuse engendrés par les pratiques culturales en Pays de Caux (Normandie). *Geomorphologie*, **2**, 143-154.
- Martin, P., Legout, C., Planchon, O. & Le Bissonnais, Y. (2002) Building a network for runoff-data production in Upper-Normandy (France): socio-technical aspects. COST 623 Workshop "Socio-economic factors and soil erosion" Brussels 7-9 Mars 2002, Poster et résumé.
- Martin, P. & Meynard, J.-M. (1997) Systèmes de culture, érosion et pollution des eaux par l'ion nitrate. In: *L'eau dans l'espace rural, production végétale et qualité de l'eau* (Ed. by C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu & F. Papy), INRA Editions, Paris. 303-322.
- Martin, P., Papy, F., Souchère, V. & Capillon, A. (1998) Maîtrise du ruissellement et modélisation des pratiques de production. *Cahiers Agricultures*, **7**, 111-119.
- Massei, N., Lacroix, M., Wang, H., Mahler, B. & Dupont, J. (2002) Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer: the role of the karst/alluvium interface. *Journal of Hydrology*, **260**(1-4), 88-101.
- Mathieu, A. & Joannon, A. (2003) How farmers view their job in Pays de Caux, France. Consequences for grassland in water erosion. *Environmental Science & Policy*, **6**, 29-36.
- Maxime, F., Mollet, J.M. & Papy, F. (1995) Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cahiers Agricultures*, **4**, 351-362.
- Maxime, F., Nicoletti, J.-P., Leroy, P. & Papy, F. (1997) Donner de la souplesse au choix d'assolement par des rotations-cadres. In: *Actes du colloques : aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles; 10-11 décembre 1996*, INRA-ESR, Grignon. 85-99.

- Meadows, M.E. (2003) Soil erosion in the Swartland, Western Cape Province, South Africa: implications of past and present policy and practice. *Environmental Science & Policy*, **6**, 17-28.
- Meynard, J.M. & Le Bail, M. (2001) *Pertinence économique et faisabilité d'une filière sans utilisation d'OGM*. INRA - FNSEA, 56 pages
- Meynard, J.M. (1985) *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*. Thèse, INA P-G, Paris, 258 pages + annexes.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Chisci, G. & Torri, D. (1998) The EUROSEM model. In: *Modelling Soil Erosion by Water* (Ed. by J. Boardman & D. T. Favis-Mortlock), Springer, Berlin. *NATO-ASI Series I-55*. 389-398.
- Morlon, P. & Benoit, M. (1990) Etude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système. *Agronomie*, **6**, 499-508.
- Mousset, J. (1996) *Mecagro, conseil en agroéquipement dans les exploitations de grande culture*. Le bipôle végétal, Amiens, 338 pages
- Napier, T.L. (1990) The evolution of US soil-conservation policy : from voluntary Adoption to Coercion. In: *Soil erosion on agricultural land* (Ed. by J. Boardman, I. D. L. Foster & J. A. Dearing), John Wiley & Son Ltd. 627-644.
- Nedelec, Y., Bouye, J.M., Manojlovic, J., Vincent, B., Ouvry, J.F. & Collange, B. (1998) *Retenue d'infiltration sur la commune de Néville (76)*. CEMAGREF / AREAS, 45 pages
- Ouvry, J.F. (1987) *Bilan des travaux, campagne 1986-87*. Association régionales pour l'étude et l'amélioration des sols, Saint Valéry en Caux, France, 153 pages + annexes
- Ouvry, J.F. (1989) Bulletin d'information de l'AREAS N°5.
- Ouvry, J.F. (1989-90) Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré, expérience de Pays de Caux (France). *Cahiers de l'ORSTOM - Série pédologique*, **25**(1-2), 157-169.
- Ouvry, J.F. (1992) L'évolution de la grande culture et l'érosion des terres dans le Pays de Caux. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, **2**, 107-113.
- Ouvry, J.F. (1994) Le pays de Caux, région tempérée de grande culture du nord-ouest de la France - Protéger le réseau de drainage et améliorer l'infiltration. In: *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* (Ed. by E. Roose), Rome. 371-379.
- Papy, F. (2001) Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation. In: *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision* (Ed. by E. Malézieux, G. Trébuil & M. Jaegger), INRA Editions /CIRAD, Coll. Repères. 51-74.
- Papy, F. (accepté) Parcellaire et risque d'érosion. In: *Ecospace*, INRA Editions, Coll. Science Update, Paris.
- Papy, F. & Boiffin, J. (1988) Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II.-Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie*, **8**(9), 745-756.
- Papy, F. & Douyer, C. (1991) Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie*, **11**, 201-215.

- Papy, F. & Lelièvre, F. (1979) Les pratiques de céréaliculture dans une région à climat aride de type méditerranéen, la Plaine de Benguerir. *Revue de géographie du Maroc*, **3 (nouvelle série)**, 23-44.
- Papy, F., Martin, P. & Bruno, J.-F. (1996) Comment réduire les risques d'érosion par les pratiques agricoles? S'adapter aux systèmes érosifs et au contexte économique. In: *Forum "Sécheresse, pollution, inondation, érosion ; que fait la recherche?" Futuroscope - Poitiers, 29 sept - 1 oct 1996*, Poitiers. 11 pages.
- Papy, F., Poujade, C. & Souchère, V. (1992) Maîtrise du ruissellement et de l'érosion sur un territoire agricole, le double découpage de l'espace. In: *Gestion de l'espace rural et système d'Information géographique* (Ed. by P. Buche, D. King & S. Lardon), INRA Editions, Paris. 167-176.
- Peiretti, R.A. (2001) Keynote: the development and future of direct seed cropping systems in Argentina. In: *Sustaining the Global Farm, selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, 1999, Purdue University* (Ed. by D. E. Stott, R. H. Mohtar & G. C. Steinhardt). 234-247.
- Peyre, Y. (1982) L'érosion par l'eau. *Techniques Agricoles*, **1385**, 16 pages.
- Pihan, J. (1978) Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. In: *Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg - Colmar, 20-23 septembre*, Université Louis Pasteur & INRA Colmar. 13-18.
- Pivain, Y. & Faucon, T. (1995) *Le bassin versant de Bourville en Seine Maritime - Etat initial - Analyse des risques d'érosion*. Rapport de stage, MST Sciences de l'environnement, Université de Rouen, 76 pages
- Poesen, J. & Govers, G. (1990) Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures. In: *Soil erosion on agricultural land* (Ed. by J. Boardman, I. D. L. Foster & J. A. Dearing), John Wiley & Son Ltd. 513-530.
- Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie. (1998a) *Bande de terre retassée et chemin d'eau enherbé - Conception par l'AREAS et les Chambres d'agriculture de l'Eure et la Seine-Maritime*. 4 pages
- Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie. (1998b) *Des pratiques culturales pour limiter le ruissellement : gestion de la parcelle entre deux cultures - Conception par l'AREAS et les Chambres d'agriculture de l'Eure et la Seine-Maritime*. 4 pages
- Pôle de Compétence Sol et Eau de Haute-Normandie. (2002) *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion par l'hydraulique douce dans l'espace rural - Guide des aménagements du champ au bassin versant*. 16 pages
- Poujade, C. (1989) *La maîtrise du ruissellement et de l'érosion par concentration du ruissellement par les pratiques agricoles, à l'échelle du bassin versant (approche méthodologique)*. Mémoire de fin d'étude, INA P-G, 62 pages + annexes
- Poussin, J.C. (1992) *OTELLO, organisation du travail en langage objet*. INRA / ORSTOM, Paris, 60 pages
- Rauws, G. & Govers, G. (1988) Hydraulic and soil mechanical aspect of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science*, **39**, 111-124.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. & Porter, J.P. (1991) RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **46(1)**, 30-33.

- Rhoton, F.E., Shipitalo, M.J. & Lindbo, D.L. (2002) Runoff and soil loss from midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil & Tillage Research*, **66**, 1-11.
- Richard, G., Roger-Estrade, J., Cousin, I. & Labreuche, J. (2001) Fonctionnement physique des sols cultivés : labour, non labour, structure et érosion. In: *Du labour au semis direct : enjeux agronomiques*, INRA / ITCF. 8-10.
- Rieu, C. (2001) Enjeux économiques de la simplification du travail du sol. In: *Du labour au semis direct : enjeux agronomiques*, INRA / ITCF. 21-23.
- Robinson, D.A. & Boardman, J. (1988) Cultivation practice, sowing season and soil erosion on the South Downs, England : a preliminary study. *Journal of Agricultural Sciences, Cambridge*, **110**, 169-177.
- Roose, E. (1994a) Définitions : les mots cachent une philosophie. In: *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* (Ed. by E. Roose), Rome. 13-22.
- Roose, E. (1994b) Quelques aspects socio-économiques de l'érosion. In: *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* (Ed. by E. Roose), Rome. 45-82.
- Schmidt, J., Schmidt, W., Werner, M.v. & Michael, A. (2001) Actions against soil erosion at the single field and the catchment scale guided by computer simulation. In: *Sustaining the Global Farm, selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, 1999, Purdue University* (Ed. by D. E. Stott, R. H. Mohtar & G. C. Steinhardt). 973-978.
- Schmidt, J., Werner, M.v. & Michael, A. (1999) Application of the EROSION 3D model to CATSOP watershed, The Netherlands. *Catena*, **37**, 449-456.
- Schmidt, J., Werner, M.v., Michael, A. & Schmidt, W. (1997) *EROSION 2D/3D — Ein Computermmodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie & Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Schott, C. (2002) *Contribution des modèles de Markov cachés (HMM) à l'étude des successions de cultures. Application du logiciel CarottAge à l'étude des successions de cultures de Seine-Maritime*. Rapport d'étude, INRA Mirecourt, 21 pages
- Schuler, J. & Kächele, H. (2003) Modelling on-farm costs of soil conservation policies with MODAM. *Environmental Science & Policy*, **6**, 51-55.
- Sebillotte, M. (1974) Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers de l'ORSTOM*, **24**, 3-25.
- Sebillotte, M. (1990) Le système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In: *Les systèmes de culture* (Ed. by L. Combe & D. Picard), INRA Editions - Coll. Un point sur, Paris. 165-196.
- Sebillotte, M. & Soler, L.G. (1990) Les processus de décision des agriculteurs : conséquences pour les démarches d'aide à la décision. In: *Modélisation systémique et système agraire : décision et organisation* (Ed. by J. Brossier, B. Vissac & J. L. Le Moigne), INRA Editions, Paris. 93-117.
- Seta, A.K., Blevins, R.L., Frye, W.W. & Barfield, B.J. (1993) Reducing soil erosion and agricultural chemical losses with conservation tillage. *Journal of Environmental Quality*, **22**, 661-665.

- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. & Unkrich, C.L. (1995) KINEROS—A kinematic runoff and erosion model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology* (Ed. by V. J. Singh). *Water Resources Publications*. 697-732.
- Souadi, T., King, C. & Le Bissonnais, Y. (2000) *Cartographie de l'aléa "érosion des sols" en région Haute-Normandie*. BRGM/RP-50454-FR, 95 pages
- Souchère, V. (1995) *Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion de talweg - Application à des petits bassins versants en Pays de Caux (Haute-Normandie)*. Thèse, INA P-G, Paris, 197 pages + annexes.
- Souchère, V., Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., King, D. & Papy, F. (2001) Incorporating surface crusting and its spatial organization in runoff and erosion modelling at the watershed scale. In: *Sustaining the Global Farm, selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24-29, 1999, Purdue University* (Ed. by D. E. Stott, R. H. Mohtar & G. C. Steinhardt). 888-895.
- Souchère, V., King, C., Dubreuil, N., Lecomte-Morel, V., Le Bissonnais, Y. & Chalot, M. (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.
- Souchère, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F. & Capillon, A. (1998) Effects of tillage on runoff directions : consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, **206**, 256-267.
- Spieß, E., Amman, H., Heusser, J., Bohren, C., Dubois, D. & Zihlmann, U. (1999) *Systèmes écologiques de culture des pommes de terre*. Rapport FAT 540, FAT, Tänikon, 12 pages
- Sturny, W.G. (1998) L'expérience suisse et les pratiques culturales : le semis sous litière, le semis sur bandes fraisées et le semis direct. In: *Actes du forum : Pour une gestion collective appliquée au bassin versant afin de maîtriser les ruissellements et leurs conséquences*, Pôle de Compétence "Sol et Eau" de Haute-Normandie. 31-32.
- Takken, I., Govers, G., Steegen, A., Nachtergaele, J. & Guérif, J. (2001a) The prediction of runoff flow directions on tilled fields. *Journal of Hydrology*, **248**, 1-13.
- Takken, I., Jetten, V., Govers, G., Nachtergaele, J. & Steegen, A. (2001b) The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. *Geomorphology*, **37**, 1-14.
- Tebrügge, F. & Düring, R.A. (1999) Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, **53**, 15-28.
- Thorez, J.P. (1997) Ruissellement et inondations : agir très en amont. *AREHN Info*, **3**, 1-4.
- Trevisan, D. (1984) *Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion des sols limoneux cultivés- Etude expérimentale au champ sous pluies simulées*. Thèse, Université d'Orléans, 244 pages.
- Van Dijk, P.M., Kwaad, F.J.P.M. & Klapwijk, M. (1996a) Retention of water and sediment by grass strips. *Hydrological Processes*, **10**, 1069-1080.
- Van Dijk, P.M., Van Der Zijp, M. & Kwaad, F.J.P.M. (1996b) Soil erodibility parameters under various cropping systems of maize. *Hydrological Processes*, **10**, 1061-1067.
- Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P. (2000) Evaluating the effect of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, **15**, 577-589.

- Van Rompaey, A.J.J., Govers, G., Van Hecke, E. & Jacobs, K. (2001) The impacts of land use policy on the soil erosion risk : a case study in central Belgium. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **83**, 83-94.
- Van Vliet, L.J.P., Kline, R. & Hall, J.W. (1993) Effects of three tillage treatments on seasonal runoff and soil loss in the Peace River. *Canadian Journal of Soil Science*, **73**, 469-480.
- Vandaele, K. & Poesen, J. (1995) Spatial and temporal patterns of soil erosion rates in an agricultural catchment, central Belgium. *Catena*, **25**, 213-226.
- Vandewiele, A. (1999) *Le point sur la vulnérabilité et la protection des captages d'eau potable*. Mémoire de DESS, Faculté d'histoire et de géographie, Amiens, 57 pages
- Vereijken, P. (1997) A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, **7**, 235-250.
- Verstraeten, G. & Poesen, J. (1999) The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology*, **29**, 275-292.
- Verstraeten, G. & Poesen, J. (2001) Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. *Geomorphology*, **40**, 123-144.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Govers, G., Gillijns, K., Van Rompaey, A. & Van Oost, K. (2003) Integrating science, policy and farmers to reduce soil loss and sediment delivery in Flanders, Belgium. *Environmental Science & Policy*, **6**, 95-103.
- Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J. & Govers, G. (2002) Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, **19**, 386-394.
- Vivier, M. & Douyer, C. (1985) Evolution de la géographie pastorale du Pays de Caux. *Actes du Museum de Rouen*, **4**, 81-101.
- Williams, J. R., Jones, C. A. & Dyke, P. T. (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of ASAE*, **27**, 129-144.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses*. US Department of Agriculture, Agricultural Research service handbook, 58 pages.
- Zemenchik, R.A., Albrecht, K.A., Boerboom, C.M. & Lauer, J.G. (2000) Corn production with kura clover as a living mulch. *Agronomy Journal*, **92**, 698-705.
- Zenter, R.P., Lafond, G.P., Derksen, D.A. & Campbell, C.A. (2002) Tillage method and crop diversifications : effect on economic returns and riskiness of cropping systems in a Thin Black Chernozem of the Canadian Prairies. *Soil & Tillage Research*, **67**, 9-21.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Formation de la croûte de battance (d'après Boiffin, 1984 dans Lecomte, 1999).....	7
Figure 2 : Organisation spatiale des formes d'érosion dans un bassin versant	9
Figure 3 : Comparaison de la vitesse de développement d'une croûte de battance sur un sol argileux et un sol limoneux (d'après Fox et Le Bissonnais, 1998)	11
Figure 4 : Infiltration préférentielle de l'eau dans un sous-sol karstique (d'après Massei <i>et al.</i> , 2002).....	16
Figure 5 : Evolution du cumul de pluie et du % de croûte de battance depuis la réalisation du semis de la culture d'hiver (in Vandaele et Poesen, 1995).....	21
Figure 6 : Exemple de carte du bilan ruissellement / infiltration - bassin versant de Blosseville	52
Figure 7 : Exemple de carte d'accumulation du ruissellement	54
Figure 8 : Schéma récapitulatif de la démarche d'analyse.....	62
Figure 9 : Carte simplifiée des sols de Haute-Normandie	64
Figure 10 : Variabilité des précipitations annuelles en Haute-Normandie	65
Figure 11 : Précipitations médianes mensuelles à Saint-Laurent-en-Caux (1985-1999).....	66
Figure 12 : Carte de situation du bassin versant de Bourville.....	69
Figure 13 : Morcellement du bassin versant de Bourville entre les différents territoires des exploitations agricoles	71
Figure 14 : Cumul des précipitations des 6 campagnes culturales analysées (en mm).....	82
Figure 15 : Répartition des états de surface pour les céréales d'hiver – saison 2	85
Figure 16 : Variabilité des états de surface des cultures de printemps au 15 mai.....	90
Figure 17 : Comparaison des réseaux d'écoulement principaux des configurations Topo, TP et PDT.....	98
Figure 18 : Comparaison des superficies des sous bassins versants	100
Figure 19 : Zonages des portions de territoires affectées à différents sous bassins versant en fonction du réseau d'écoulement choisi	101

Figure 20 : Fréquence cumulée des caractéristiques des événements pluvieux.....	104
Figure 21 : Bilan de ruissellement / infiltration à 2 et 5 mm/h d'infiltration potentielle.....	106
Figure 22 : Réduction du bilan de ruissellement par une augmentation de l'infiltration potentielle de 2 à 5 mm/h et de 2 à 10 mm/h.....	108
Figure 23 : Ruissellement à l'exutoire du bassin versant, diagnostic 1996-2002.....	110
Figure 24 : Concentration du ruissellement – Hiver 2000 et 2001	113
Figure 25 : Comparaison de l'assolement 2001 simulé avec celui réellement mis en œuvre par les agriculteurs cette même année	129
Figure 26 : Calendrier simplifié de l'organisation du travail dans les exploitations agricoles du bassin versant de Bourville.....	134
Figure 27 : Tableau récapitulatif d'une simulation de l'organisation du travail (extrait exploitation MDE, climat de l'année 1992)	138
Figure 28 : Ruissellement diffus et ruissellement concentré.....	159
Figure 29 : Schéma de construction des différentes configurations de bassin versant	164
Figure 30 : Construction des assolements ruisselant et infiltrant pour l'année 2002.....	166
Figure 31 : Ruissellement à l'exutoire du bassin – Configurations 2002 en Hiver	174
Figure 32 : Ruissellement à l'exutoire du bassin – Configurations 2002 et 2003 en hiver et configurations 2002 au printemps	178
Figure 33 : Réseau d'écoulement du ruissellement dans le SBV 13.....	180
Figure 34 : Comparaison des simulations des modifications des systèmes de culture aux simulations du diagnostic – événement pluvieux intense A.....	181
Figure 35 : Illustration de la contrainte posée par la culture de blé pour une modification de l'organisation spatiale des cultures – SBV 1	185
Figure 36 : Exemple 1	186
Figure 37 : Exemple 2	187
Figure 38 : Ruissellement et érosion diffuse à l'exutoire du bassin versant de Bourville	196
Figure 39 : Principe d'automatisation de recherche des possibilités de modification de l'organisation spatiale des cultures sur le territoire d'une exploitation.....	205

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules de sol et des caractéristiques du ruissellement (d'après Auzet <i>et al.</i> , 1990)	8
Tableau 2 : Interaction entre la variation de la taille des parcelles et celle de la proportion de terres arables entre 1947 et 1990 : conséquence sur l'érosion. (d'après Van Oost <i>et al.</i> , 2000).....	18
Tableau 3 : Détail des dispositifs expérimentaux.....	28
Tableau 4 : Erosion et ruissellement annuel pour trois itinéraires techniques (British Columbia, Canada) (d'après Van Vliet <i>et al.</i> , 1993).....	29
Tableau 5 : Caractéristiques attendues du modèle de ruissellement	47
Tableau 6 : Liste des modèles analysés.....	47
Tableau 7 : Synthèse des principaux modules de ruissellement au regard des critères de sélection fixés	48
Tableau 8 : Capacité d'infiltration (Inf en mm) en fonction des paramètres : faciès, rugosité et couvert végétal.....	51
Tableau 9 : Hauteurs de pluie d'imbibition (P_i en mm) en fonction de la capacité d'infiltration (Inf) et de la pluie antécédente (P_{48}).....	51
Tableau 10 : Principales caractéristiques des 26 exploitations enquêtés	76
Tableau 11 : Définition des séries hivernales d'observations (Sh) – Saison 2	84
Tableau 12 : Définition des séries printanières d'observations (Sp) – Saison 2	86
Tableau 13 : Récapitulatif des états de surface du sol pour lesquels nous avons pu fixer les valeurs suite à notre analyse et de ceux nécessitant une expertise	89
Tableau 14 : Infiltration potentielle des chantiers de déchaumages et des semis de cultures intermédiaires – Période hivernale	92
Tableau 15 : Infiltration potentielle des prairies	93
Tableau 16 : Récapitulatif des infiltrations potentielles - Période hivernale	94
Tableau 17 : Récapitulatif des infiltrations potentielles - Période printanière.....	94
Tableau 18 : Limite des classes d'infiltration du modèle STREAM*	95

Tableau 19 : Contraintes déterminant la zone cultivable de chaque culture	120
Tableau 20 : Délais de retour (en année) et précédents cultureux appliqués	122
Tableau 21 : Respect des règles de délai de retour	127
Tableau 22 : Respect des règles de précédents cultureux	128
Tableau 23 : Résultats des simulations des calendriers d'organisation du travail des 14 exploitations agricoles du groupe A, pour les années climatiques 1990 et 1992	140
Tableau 24 : Niveaux de contraintes à une modification de l'organisation spatiale des cultures résultant des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation	144
Tableau 25 : Marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures.....	145
Tableau 26 : Marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures : classement des 14 exploitations principales du bassin versant de Bourville.....	146
Tableau 27 : Indicateurs de marges de manœuvre, laissées par l'organisation du travail, pour modifier les itinéraires techniques	148
Tableau 28 : Classement des années climatiques sur la base des jours disponibles pour les chantiers de semis et déchaumage (% du nombre total de jour entre le 01/09 et le 30/09)	150
Tableau 29 : Jours disponibles pour des chantiers de semis de culture intermédiaire entre le 1 ^{er} août et le 30 septembre après réalisation des opérations prévues par l'agriculteur (récoltes, semis, déchaumages éventuels, etc.)	151
Tableau 30 : Classification des exploitations sur la base des marges de manœuvre pour modifier les systèmes de culture.....	152
Tableau 31 : Dispositif de simulations	163
Tableau 32 : Répartition des terres labourables du bassin versant de Bourville après application des règles d'assolement	165
Tableau 33 : Répartition des terres labourables par type de culture pour les quatre assolements principaux du bassin versant de Bourville.....	167
Tableau 34 : Répartitions des parcelles de terres labourables extérieures au site de Bourville dans les différents bassins versants (surface en ha).....	169
Tableau 35 : Jours nécessaires pour la réalisation d'opérations culturelles réduisant le ruissellement.....	170
Tableau 36 : Jours nécessaires et jours disponibles pour les travaux d'interculture.....	172
Tableau 37 : Récapitulatif des comparaisons entre les différentes configuration en 2002 pour les simulations de l'hiver, événement pluvieux A.....	175
Tableau 38 : Récapitulatif des comparaisons entre les différentes configuration en 2002 pour les simulations de l'hiver, événement pluvieux B.....	175
Tableau 39 : Bilan et % de réduction du ruissellement – exemple 1	187
Tableau 40 : Bilan et % de réduction du ruissellement – exemple 2	188
Tableau 41 : Possibilité de réduire le ruissellement par une réorganisation spatiale des cultures au sein des territoires d'exploitation.....	203

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Exemples de dégâts causés par le ruissellement érosif	1
Annexe 2	Exemples d'états de surface	.3
Annexe 3	Questionnaire d'enquête. Groupe A – Première enquête	.5
Annexe 4	Questionnaire d'enquête. Groupe A – Seconde enquête...	.18
Annexe 5	Questionnaire d'enquête. Groupe B	.30
Annexe 6	Dates des relevés disponibles par bassin versant et par campagne culturale pour l'analyse de la variabilité des états de surface	.39
Annexe 7	Analyse de la variabilité des états de surface due au climat	.41
Annexe 8	Découpage du bassin versant de Bourville en sous bassins versants	..47
Annexe 9	Exemple de données recueillies dans les exploitations du groupe A	...49
Annexe 10	Support de la présentation orale pour la soutenance de thèse – 11 mars 2004	...52

Annexe 1
Exemples de dégâts causés
par le ruissellement érosif



Dégât sur parcelle agricole : ravine



Dégât sur parcelle agricole : dépôt de sédiments



Dégât sur propriété privée : inondation



Dégât sur route



Inondation sur route

Annexe 2

Exemples d'états de surface



Labour – forte rugosité (R4)



Semis – rugosité intermédiaire (R2)



Rugosité faible (R0) et Faciès F2 : semis de pois roulé



Faciès F2 : semis de blé



Faciès F11



Faciès F0

Annexe 3
Questionnaire d'enquête
Groupe A – Première enquête

Groupe A – Première enquête

Noms des enquêteurs :

Date :

Nom de l'exploitant :

Adresse :

Téléphone :

Première partie : caractéristiques de l'exploitation

1. Données générales

Statut de l'exploitation :

SAU totale :

STH :

SAU en propriété :

Nombre d'UTH :

Age du chef d'exploitation :

Date d'installation :

Niveau de formation :

Personnes vivant sur l'exploitation :

Source de revenu autre que l'exploitation :

2. Productions végétales

Culture	Surface en 2001	Sole habituelle (Mini-Maxi)	Présence systématique ou occasionnelle / Raison des écarts	Rendement	Marge brute moyenne	Destination	Gestion des pailles (*)

(*) Si les pailles sont vendues, le fumier est-il restitué en échange ?

Parmi les cultures possibles dans la région, lesquelles ne sont jamais cultivées ? Pourquoi ?

Mise en place de cultures dérobées ou de cultures intermédiaires ?

Les jachères :

Quels types ?

Localisation ?

Prairies : surface, utilisation ?

Naturelle :

Temporaire :

3. Productions animales

Atelier	Effectif	Niveau de production	Type de déjection	Quantités	Stockage (lieu et durée)

Où sont épandues les déjections animales ?

Quand ?

A quelle dose ?

4. Autres productions

Deuxième partie : le ruissellement et l'érosion sur le territoire de l'exploitation

1. Localisation des parcelles (Cf. cartes)

Localisation précise des parcelles dans le bassin versant étudié (sur carte de l'ensemble des parcelles du bassin versant obtenu à partir d'une photographie aérienne).

Localisation des autres parcelles sur le fond IGN 1/25 000^{ème}

Croquis récapitulatif avec les distances au siège d'exploitation :

2. Les manifestations du ruissellement et de l'érosion

Indiquer sur la carte du parcellaire les écoulements d'eau, les ravines, les zones de dépôt □

Noter sur cette feuille la fréquence d'apparition, la période, l'origine du phénomène (d'où vient l'eau, les cultures en cause □), les conséquences (pour l'agriculteur ou en dehors du territoire de l'exploitation) :

3. Les solutions envisageables

Quelles actions avez-vous entreprises pour limiter l'érosion ou en diminuer les conséquences ?

Quelles actions supplémentaires envisagez-vous ? Pourquoi ne les avez-vous pas déjà mises en place ?

Quelles solutions estimez-vous ne pas pouvoir mettre en place ? Pourquoi ?

Quelles solutions jugez-vous inefficaces ?

Quels sont les problèmes qui se posent dans le voisinage, en dehors de vos parcelles ?
(D'où vient l'eau, où va-t-elle ?)

4. Les bétoires ou marnières

Parcelle	Nombre	Dimension	Conséquences

Lorsqu'une bétoire ou une marnière apparaît, la rebouchez-vous ?

Si oui, pourquoi et comment ?

Troisième partie : les successions culturelles

1. Les contraintes par culture

Faire l'inventaire dans le tableau suivant et récapituler ensuite les successions culturelles pratiquées :

Annexe 4
Questionnaire d'enquête
Groupe A – Seconde enquête

Groupe A – Deuxième enquête

Noms des enquêteurs :

Date :

Nom de l'exploitant :

CODE :

Retour sur la première enquête

- Précision sur certaines données incomplètes.

Première partie : la main d'œuvre**1. Main d'œuvre permanente (préciser si permanente ou salariée)**

	Age	Principales tâches	Disponibilité		Vacances
			Jours/Sem	Heures/jour	

Activités ou responsabilités extérieures :

2. Main d'œuvre occasionnelle (préciser si permanente ou salariée)

	Age	Principales tâches	Période	Disponibilité	
				Jours/Sem	Heures/jour

3. Main d'œuvre extérieure

Chantier	Origine de la main d'œuvre	Période et durée	Raison

Deuxième partie : le matériel

Matériel	Caractéristiques (1)	Type de propriété (2)
Traction		
Travail du sol Semis (y compris tasse avant)		

(1) : Puissance, nombre de roues motrices et catégories de travaux effectués pour le matériel de traction / Largeur de travail pour les autres

(2) : Individuelle, Copropriété, CUMA, Echange, Entreprise

Matériel	Caractéristiques (1)	Type de propriété (2)
Traitement Epandage (3)		
Récolte Presse		
Autres		

(1) : Puissance et nombre de roues motrices pour le matériel de traction / Largeur de travail pour les autres

(2) : Individuelle, Copropriété, CUMA, Echange, Entreprise

(3) : Préciser la surface traitable avec le pulvérisateur

Troisième partie : itinéraires techniques et organisation du travail

1. Les cultures

Au printemps :

- Préciser les dates de semis recherchées et si les objectifs sont atteints chaque année :

Période automnale (juillet à novembre = récolte, semis des cultures d'hiver et gestion des intercultures)

1. Une fiche par culture pour préciser les itinéraires techniques (les différentes opérations culturales et la période précise (optimale) de réalisation)

2. Une fiche globale pour l'ensemble des cultures pour :
- préciser si les objectifs de date sont globalement atteints
- préciser la gestion des concurrences entre travaux

3. Un récapitulatif de la vitesse d'avancement des différents chantiers

2. L'élevage

Charges de travail ponctuelles :

Astreintes quotidiennes :

3. Autres charges en travail (autres activités, responsabilités professionnelles□)

Annexe 5
Questionnaire d'enquête
Groupe B

Enquête Groupe B

Noms des enquêteurs :

Date :

Nom de l'exploitant :

Adresse :

Téléphone :

Première partie : caractéristiques de l'exploitation

1. Données générales

Statut de l'exploitation :

SAU totale :

STH :

SAU en propriété :

Nombre d'UTH :

Age du chef d'exploitation :

Date d'installation :

Niveau de formation :

Personnes vivant sur l'exploitation :

Source de revenu autre que l'exploitation :

2. Productions végétales

Culture	Surface en 2001	Sole habituelle (Mini-Maxi)	Présence systématique ou occasionnelle / Raison des écarts	Destination	Gestion des pailles (*)

(*) Si les pailles sont vendues, le fumier est-il restitué en échange ?

Parmi les cultures possibles dans la région ; lesquelles ne sont jamais cultivées ? Pourquoi ?

Mise en place de cultures dérobées ou de cultures intermédiaires ?

Les jachères :

Quels types ?

Localisation ?

Prairies : surface, utilisation ?

Naturelle :

Temporaire :

3. Productions animales

Atelier	Effectif	Niveau de production	Type de déjection	Quantités	Stockage (lieu et durée)

4. Autres productions

Deuxième partie : le ruissellement et l'érosion sur le territoire de l'exploitation

Localisation précise des parcelles dans le bassin versant étudié (cf. cartes)

Inventorier les problèmes d'érosion/ruissellement/bétoire sur les parcelles situées dans le bassin versant étudié

Croquis récapitulatif avec les distances au siège :

Troisième partie : les successions culturelles

1. Les contraintes par culture

Faire l'inventaire dans le tableau suivant et récapituler ensuite les successions culturelles pratiquées :

2 Détail des assolements sur les parcelles du bassin versant de Bourville

Parcelle	Surface	1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002	
		Interculture	Culture	Interculture	Culture	Interculture	Culture	Interculture	Culture	Interculture	Culture	Interculture	Culture	Interculture	Culture

Préciser si les semis sont roulés

Détail de la gestion des intercultures sur le bassin versant étudié :

Troisième partie : les successions culturales

1. Analyse des marges de manœuvres sur les parcelles du bassin versant de Bourville

Assolement :

Rôle des parcelles du bassin versant de Bourville dans l'assolement de l'exploitation :

Régularité de la succession de culture sur les parcelles du bassin versant de Bourville et possibilité de la modifier :

Gestion des intercultures (déchaumage et culture intermédiaire)

Contraintes d'organisation du travail (en particulier la distance au siège de l'exploitation) et autres (agronomiques, économiques) :

Annexe 6
Dates des relevés disponibles
par bassin versant et par campagne culturelle
pour l'analyse de la variabilité des états de surface

Dates des relevés disponibles par bassin versant et par campagne culturale pour l'analyse de la variabilité des états de surface

Bassin versant de Bourville (322 parcelles)		
Campagnes culturales	Saison 2 (15/11-15/02)	Saison 4 (01/05-15/07)
1996-1997	21/01/97	29/04/97 – 20/06/97
1997-1998	26/11/97 – 19/02/98	09/04/98 – 16/06/98

Bassin versant de Blosseville et Fongusemare (246 parcelles)		
Campagnes culturales	Saison 2 (15/11-15/02)	Saison 4 (01/05-15/07)
1992-1993	05/11/92 – 27/11/92 21/12/92 18/01/93	Fin Avril 1993
1993-1994	03/11/93 08/12/93 – 19/01/94	-

Bassin versant de Blosseville_1 (30 parcelles, sous bassin versant de Blosseville)		
Campagnes culturales	Saison 2 (15/11-15/02)	Saison 4 (01/05-15/07)
1994-1995	05/01/95	25/04/95
1996-1997	-	20/05/97
1997-1998	-	09/04/98
1999-2000	-	15/05/00

Bassin versant du Hanouard (47 parcelles)		
Campagnes culturales	Saison 2 (15/11-15/02)	Saison 4 (01/05-15/07)
1994-1995	01/12/94 – 05/01/95	30/04/95
1996-1997	-	07/05/97
1997-1998	-	15/05/98

Annexe 7
Analyse de la variabilité
des états de surface due au climat

Analyse de la variabilité des états de surface due au climat

Nous détaillons, dans cette annexe, l'analyse de la variabilité des états de surface dont le principe est expliqué dans le chapitre 3, et détaillé à partir de l'exemple de la culture des céréales d'hiver à la saison culturale 2 (15/11-15/02).

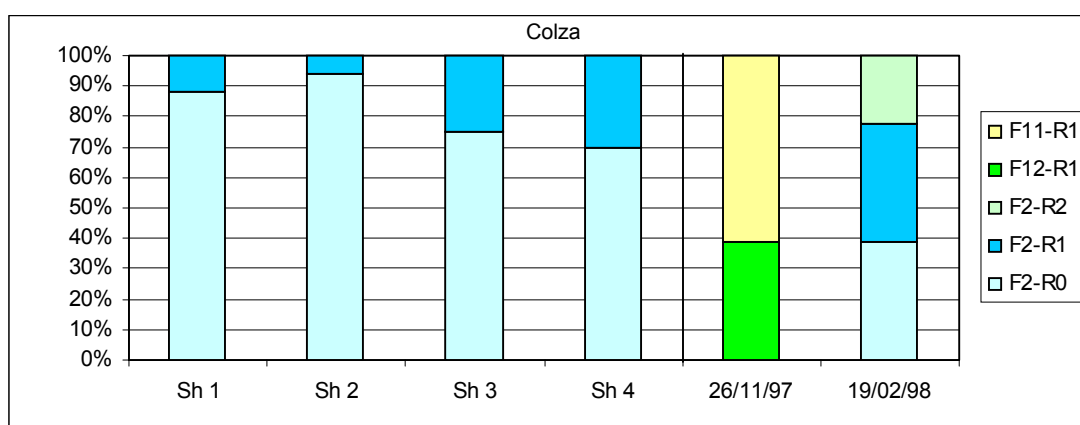
Variabilité des états de surface au cours de la saison culturale 2 (15/11-15/02)

Semis de blé et d'escourgeon

Le détail de cette analyse est fournie dans le document principal (cf. chapitre 3, § 1.1.2.3).

Semis de colza

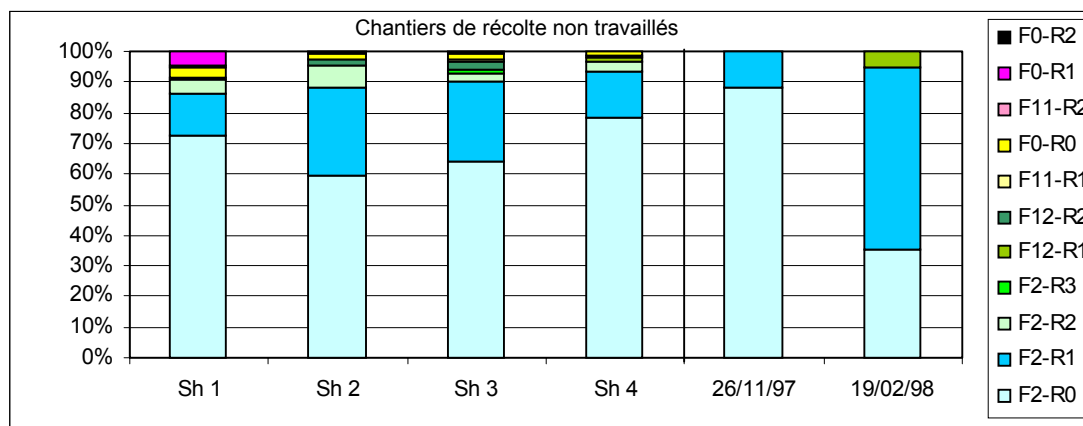
Dans un premier temps, nous n'avons pas pris en compte le couvert végétal, étant donné le manque d'information dans certains relevés et la variabilité des valeurs existantes dans les autres. Les quatre séries sont caractérisées par une homogénéité des états de surface puisque seuls les deux états les plus dégradés sont représentés (F2-R0 et F2-R1). Il n'y a donc pas d'évolution vers une dégradation des états de surface, celle-ci est totale dès la série 1. Comme précédemment, nous remarquons que la campagne 1997-1998 se caractérise par une dégradation moins systématique des états de surface, en raison des faibles précipitations survenues à la suite des semis. En effet, on observe seulement 13,2 mm de pluie entre le 01/09 et le 06/10, ce qui a probablement permis au couvert végétal de se développer et de protéger la surface du sol. Cette campagne se caractérise par un taux de couvert végétal intermédiaire (C2), alors que, pour les autres campagnes culturales, c'est le couvert C1 qui domine. En résumé, retenons que les états de surface principalement observés dans les séries 1 à 4 sont F2-R0-C1 ou F2-R1-C1, hormis pour la campagne culturale 97-98.



Chantiers de récolte non travaillés

La répartition des états de surface au sein des quatre séries est comparable à celle observée pour les céréales d'hiver mais la proportion des deux états les plus dégradés est nettement plus importante dès la saison 1. En ce qui concerne la campagne culturale 1997-1998, le contraste avec les autres années est peu marqué. Les états de surface des chantiers de récolte non travaillés résultent principalement de ceux acquis durant la période de culture. Les conditions climatiques suivant la récolte ne peuvent que dégrader encore

plus les états de surface du sol, excepté pour le paramètre relatif à la couverture végétale susceptible d'augmenter du fait des repousses. Cela explique les états dégradés observés pour la campagne 1997-1998. Des relevés de la campagne 1998-1999 nous auraient probablement montré des états de surface de chantiers de récolte peu dégradés. Nous pouvons finalement conclure, comme pour les céréales d'hiver, à une évolution des états de surfaces vers un état très dégradé, la variabilité étant encore plus faible au sein de chaque série.



Semis de culture intermédiaire

Parmi les relevés parcellaires dont nous disposons, seuls 15 correspondent à des semis de cultures intermédiaires. Les états de surface représentés sont au nombre de 4 : F2-R0-C2 (3 parcelles), F2-R0-C3 (4 parcelles), F2-R1-C2 (7 parcelles) et F2-R1-C3 (1 parcelle). Il ne correspondent, en outre qu'aux campagnes culturales 1992-1993 et 1993-1994, campagnes particulièrement pluvieuses. Etant donné ce faible nombre de relevés, il semble difficile de conclure quant à la variabilité des états de surface des semis de cultures intermédiaires. De plus, les cultures intermédiaires connaissent un fort développement depuis 1994 et les techniques de semis ont changé. En particulier la moutarde est semée sur des lits de semence plus grossiers (semis à la volée après un déchaumage, sans travail superficiel au préalable), ce qui laisse présager une rugosité et un faciès moins dégradés durant la période hivernale.

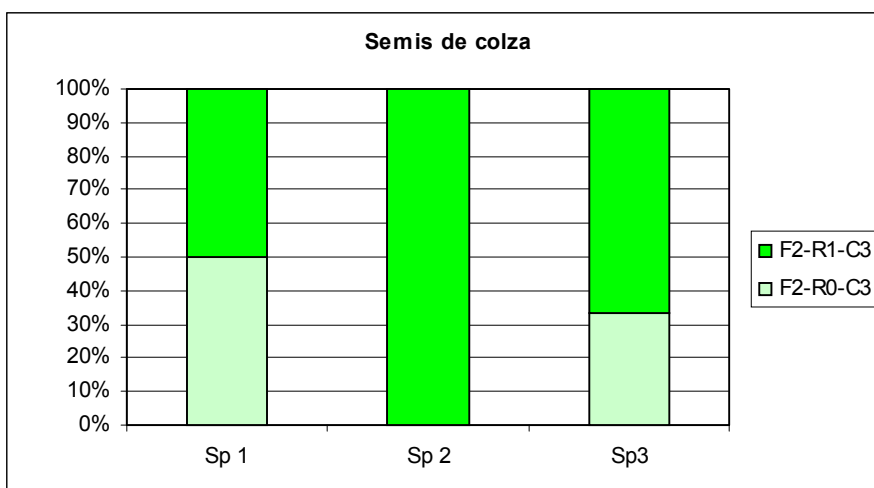
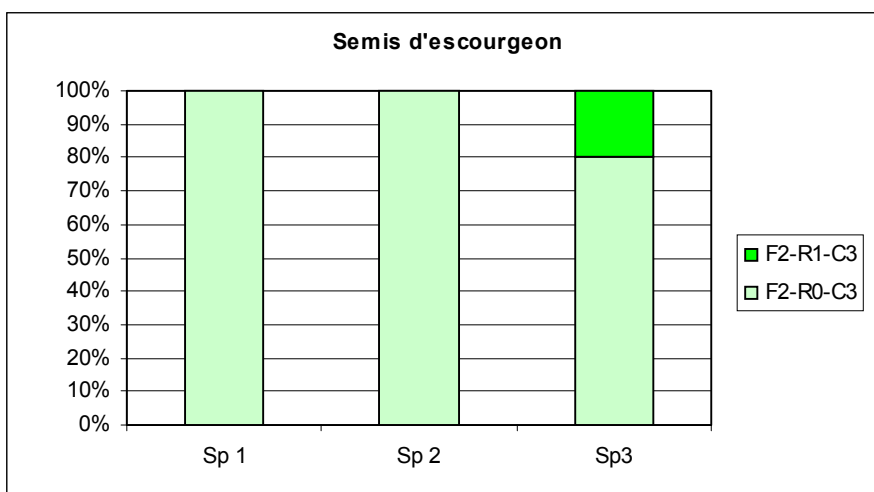
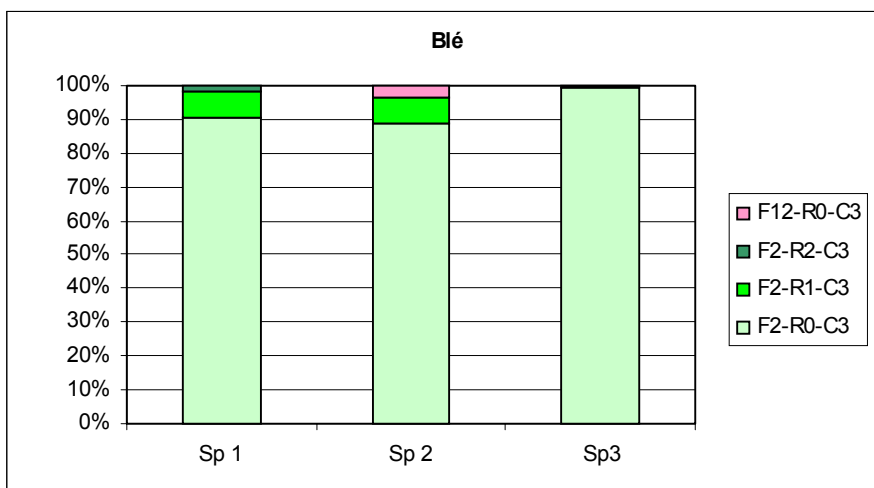
Chantiers de récolte déchaumés

Ce type de relevé est très bien représenté dans notre échantillon (40% des parcelles). Les états de surface observés varient d'une situation complètement dégradée (F2-R0) à un état de surface très fragmenté et à forte rugosité (F0-R3/4). Deux facteurs peuvent expliquer cette diversité d'états de surface durant la période hivernale : les dates de déchaumage, plus que les conditions climatiques, et les outils utilisés. Contrairement aux opérations de semis, les dates de réalisation des déchaumages sont très variables ; ne considérant pas cette opération prioritaire, l'agriculteur déchaume en dehors des autres chantiers (récolte ou semis). Pour déchaumer, l'agriculteur est susceptible d'utiliser différents matériels de déchaumage, autre cause potentielle de la variabilité des états de surface. Malheureusement, pour 65% des relevés, nous ne disposons ni de la date de déchaumage ni de l'outil utilisé et sommes donc incapables d'interpréter la variabilité constatée. Les relevés pour lesquels ces informations ont été collectées, correspondent à la campagne 1992-1993 pour laquelle tous les états de surface sont dégradés. Nous pouvons conclure que la variabilité des états de surface des chantiers de récolte déchaumés est importante et que cette variabilité est, en partie, la conséquence d'une diversité des itinéraires techniques (outils et dates d'intervention). Toutefois il ne nous est pas possible de l'analyser avec les données disponibles.

Variabilité des états de surface au cours de la saison culturale 4(01/05-15/07)

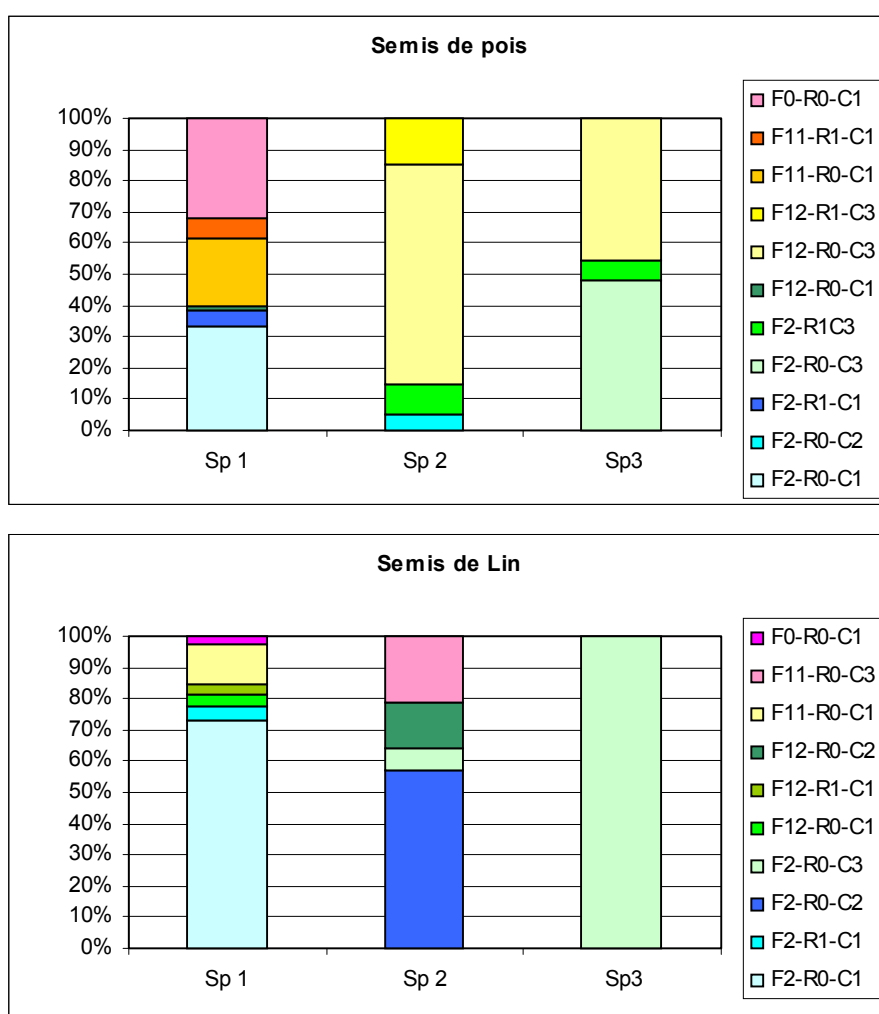
Blé, colza et escourgeon

Il existe une grande homogénéité des états de surface pour les cultures d'hiver : quasiment 100% des relevés correspondent à deux états de surface, F2-R0-C3 et F2-R1-C3. Le premier est majoritaire pour les céréales d'hiver, alors que le second l'est pour le colza. Ces états de surface correspondent à un développement du couvert végétal au printemps sur des états (faciès et rugosité orientée) dégradés au cours de l'hiver.



Semis de pois et de lin

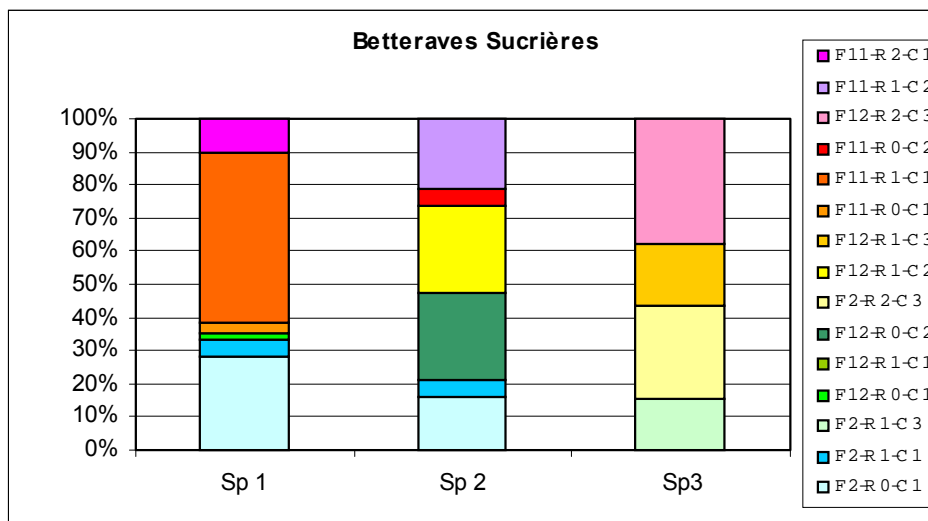
Pois et lin ont fait l'objet d'une analyse commune, ces deux cultures étant semées précocement en début de printemps (entre fin février et fin mars). Contrairement aux cultures d'hiver, nous observons une grande diversité d'états de surface, due essentiellement au faciès et au couvert végétal. Les faciès et les taux de couvert végétal relevés recouvrent l'ensemble de la gamme, alors que la rugosité est limitée aux deux premières classes R0 et R1. De la série 1 à la série 3, le faciès se dégrade et la rugosité diminue mais le taux de couvert végétal augmente. Nous remarquons cependant une différence entre le pois et le lin, le lin présentant toujours des états de surface globalement plus dégradés que le pois à la même période. Enfin, la diversité des états de surface observée pour les deux cultures peut s'expliquer, en partie, par des itinéraires techniques différents (roulage/non roulage de semis). Toutefois ne disposant pas d'information à ce sujet pour chaque parcelle, nous n'avons pas pu aller plus loin dans cette investigation.



Semis de betteraves sucrières

Comme dans le cas précédent, nous observons une grande diversité d'états de surface d'une série à l'autre. Pour la culture de betteraves sucrières, celle-ci est également due au faciès et au couvert végétal, mais aussi à la rugosité orientée qui varie de R0 à R2. Cependant, nous ne notons pas la même dégradation du faciès et de la rugosité de la série 1 à la série 3 que pour le lin et le pois. Le faciès F2 et la rugosité R0 sont plus représentés

dans les séries 1 et 2 que dans la série 3. Ceci peut être la conséquence d'un binage des betteraves sucrières, courant juin (information non disponible comme pour le roulage du lin et du pois).

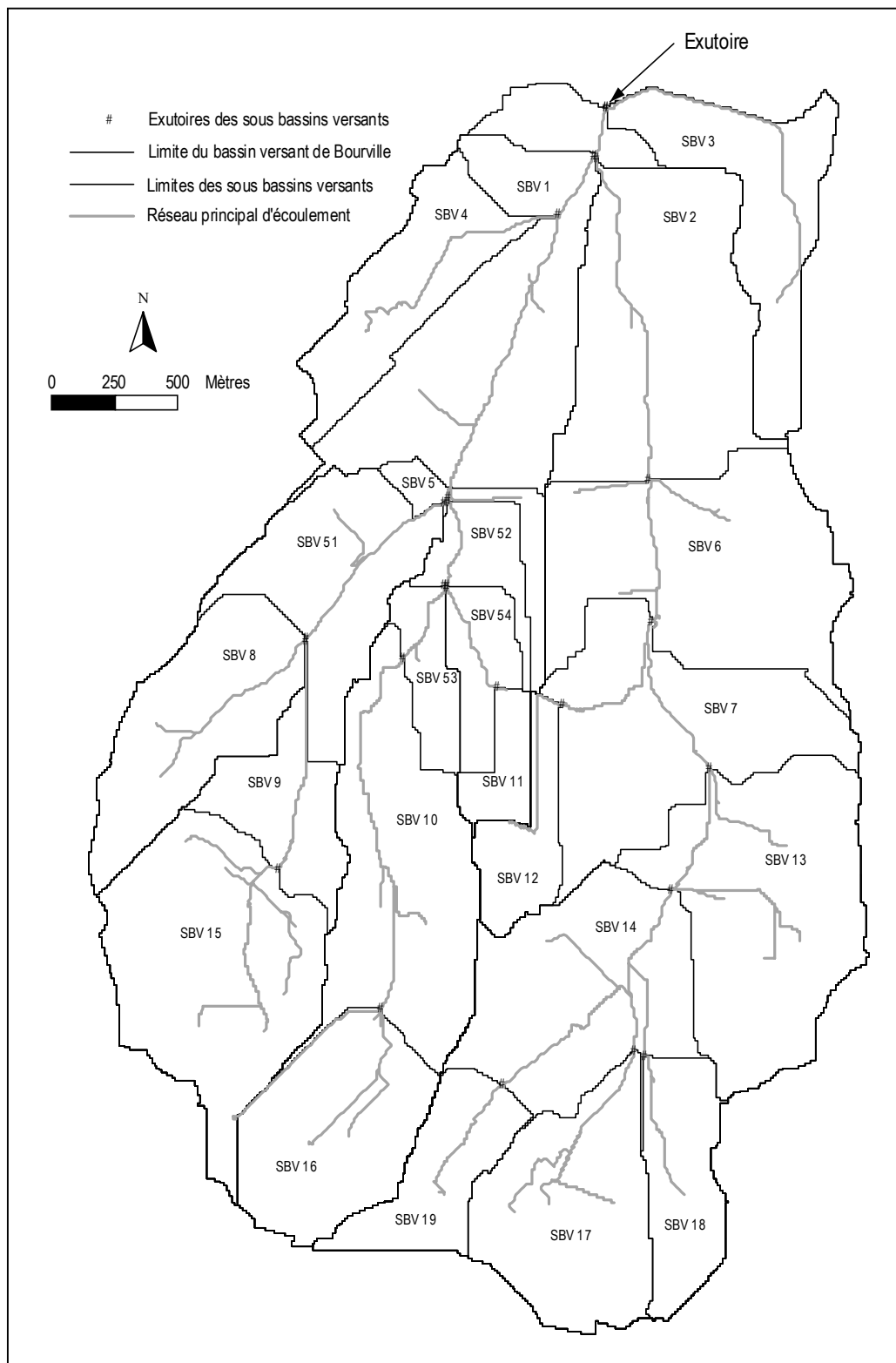


Semis de maïs et plantation de pomme de terre

Pour ces deux occupations du sol, nous ne disposons pas de nombreux relevés (20 relevés en moyenne par série, et, pour chaque série, 2 ou 3 états de surface différents). Nous ne sommes donc pas en mesure de réaliser une analyse pertinente de la variabilité des états de surface. Nous notons néanmoins une grande diversité des états de surface. Ainsi, pour le maïs, les états décrits vont du lit de semence fragmentaire (F0-R2-C1) pour un semis précoce dans la série 1 à une surface battue (F2-R0-C3) dans la série 3. Ces différences résultent de la proximité des dates de semis et des dates d'observation.

Annexe 8
Découpage du bassin versant
de Bourville en sous bassins versants

Découpage du bassin versant de Bourville en sous bassins versants



Sur cette figure, tous les sous bassins versants sont superposés. Le numéro de chacun d'eux est positionné à l'intérieur du sous bassins versants et non pas à proximité de l'exutoire.

Annexe 9
Exemple de données recueillies
dans les exploitations du groupe A

Exemple de données recueillies dans les exploitations du groupe A

Dans cette annexe, nous présentons le détail des occupations du sol recueillies pour chaque parcelle, ainsi que le calendrier d'organisation du travail, en prenant pour exemple l'exploitation MDE.

Occupations du sol par parcelle entre 1996 et 2001

Exploitation MDE

Parcelles	1996	1997	1998	1999	2000	2001	Surface des sous parcelles(ha)	Surface totale (ha)
1	BS	PDT	B	L	PDT	B		5
2	B	C	B	C	B	L		7
5	BS	P	B	L	PDT	B		6,4
6	L	PDT	B	BS	P	B		7,4
7a	B	L	P	B	BS	GEL	2	21
7d						GEL	2	
7b						PDT	14	
7c						GEL	3	
8	P	B	L	PDT	B	BS		16,4
9	L	B	P	B	E	BS	5	6,3
	GEL	GEL	GEL	GEL	GEL	GEL	1,3	
10	PDT	B	E	C	B	L	5	24
			BS	PDT			2	
				P			17	
11-2	L	P	B	GEL	GEL	PDT	1,25	12,9
11-3		GEL	GEL	GEL	GEL	GEL	2,15	
11-4		P	B	BS	PDT	B	9,5	
12-2	B	E	C	B	E	C	6,5	35,9
12-3		BS	PDT	B	L	PDT	6	
12-4						P	20	
12-5	GEL	GEL	GEL	GEL	GEL	GEL	1,8	
12-6							1,6	
13	BS	PDT	B	L	P	B		
14	B	C	B	E	P	B		3,4
15	C	B	L	PDT	B	E		10,4

B : Blé
 BS : Betterave Sucrière
 C : Colza
 E : Escourgeon
 L : Lin
 P : Pois
 PDT : Pomme de terre

Calendrier d'organisation du travail

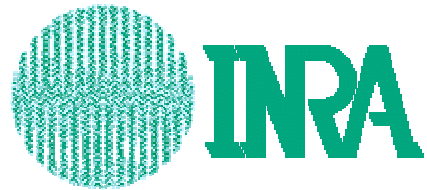
Exploitation MDE

	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
Blé 60 ha		Récolte		Semis	Désherbage
Esc 5 ha	Récolte		Canadien	Semis	
Colza 5 ha	Récolte		Semis		
Pois 20 ha		Récolte			
Lin 25 ha	Arrachage	Ecapsulage	Enroulage		
BS 20 ha	Fongicide BS	Fongicide BS		Arrachage BS en trois fois	
PDT 20 ha		Défanage	Arrachage		
Interculture avant Pois, lin et BS					Désherbage glyphosate
Tri et vente PDT					Tri et vente

Annexe 10

Support de la présentation orale pour la soutenance de thèse – 11 mars 2004

Nous reportons ici l'ensemble des transparents utilisés lors de la soutenance de thèse. Il est à noter que, par rapport au document écrit, les classes de marges de manœuvre pour modifier la localisation des cultures sont différentes. La classification présentée lors de la soutenance a été affinée.



UMR SAD-APT

Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques

Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants
agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie

Alexandre Joannon

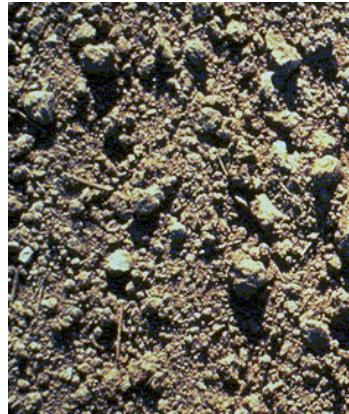
Soutenance de thèse – 11 mars 2004

A. Joannon
11/03/2004

Quelques exemples de dégâts dans les plaines limoneuses du nord de l'Europe



L'érosion hydrique dans les plaines limoneuses : échelle parcellaire



Etat initial fragmentaire



Photo : INRA Sciences du sol - Orléans

Croûte structurale



Croûte sédimentaire



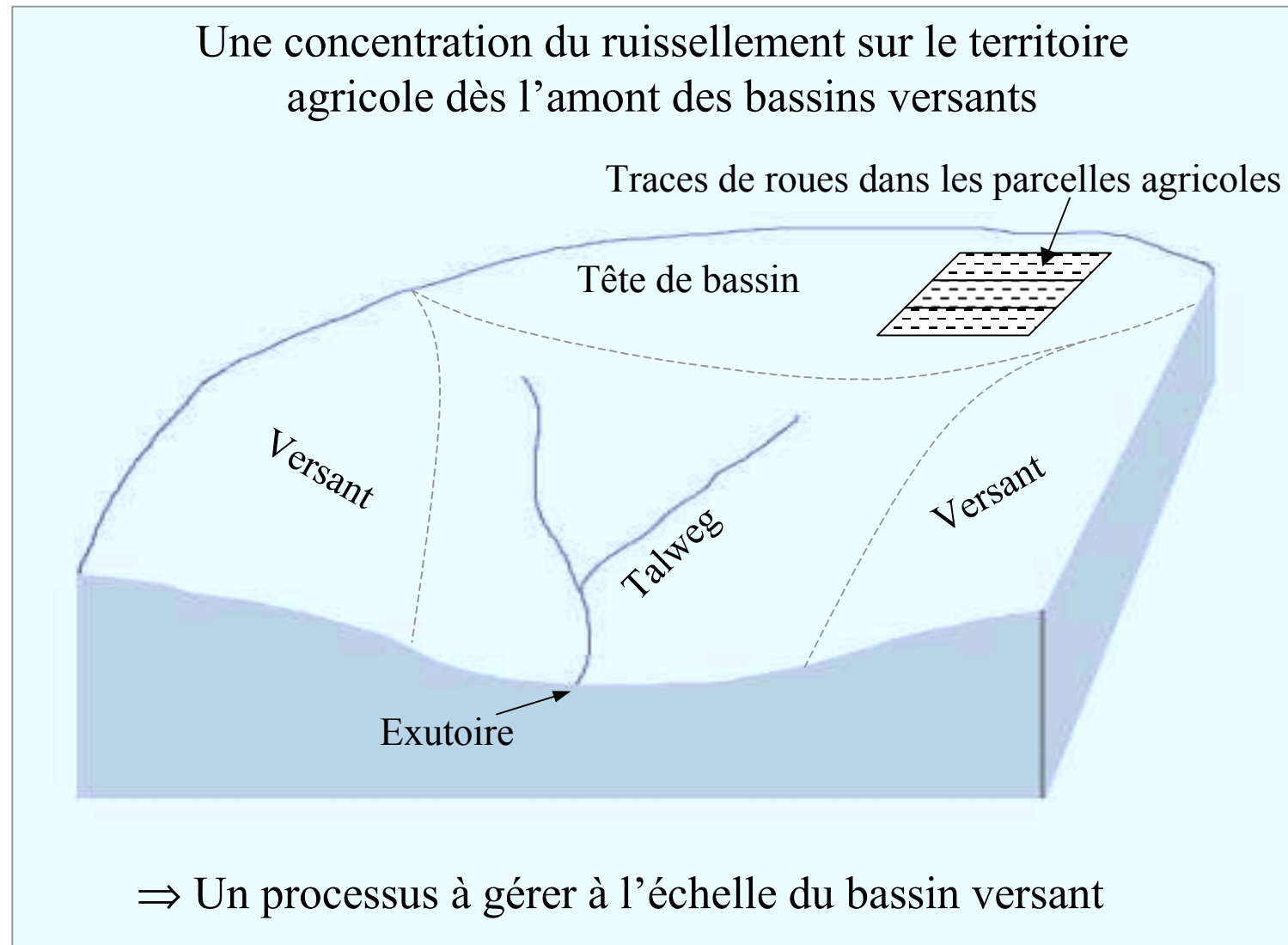
Photo : Y. Le Bissonais

Ruissellement

**Infiltration et
rugosité faible**

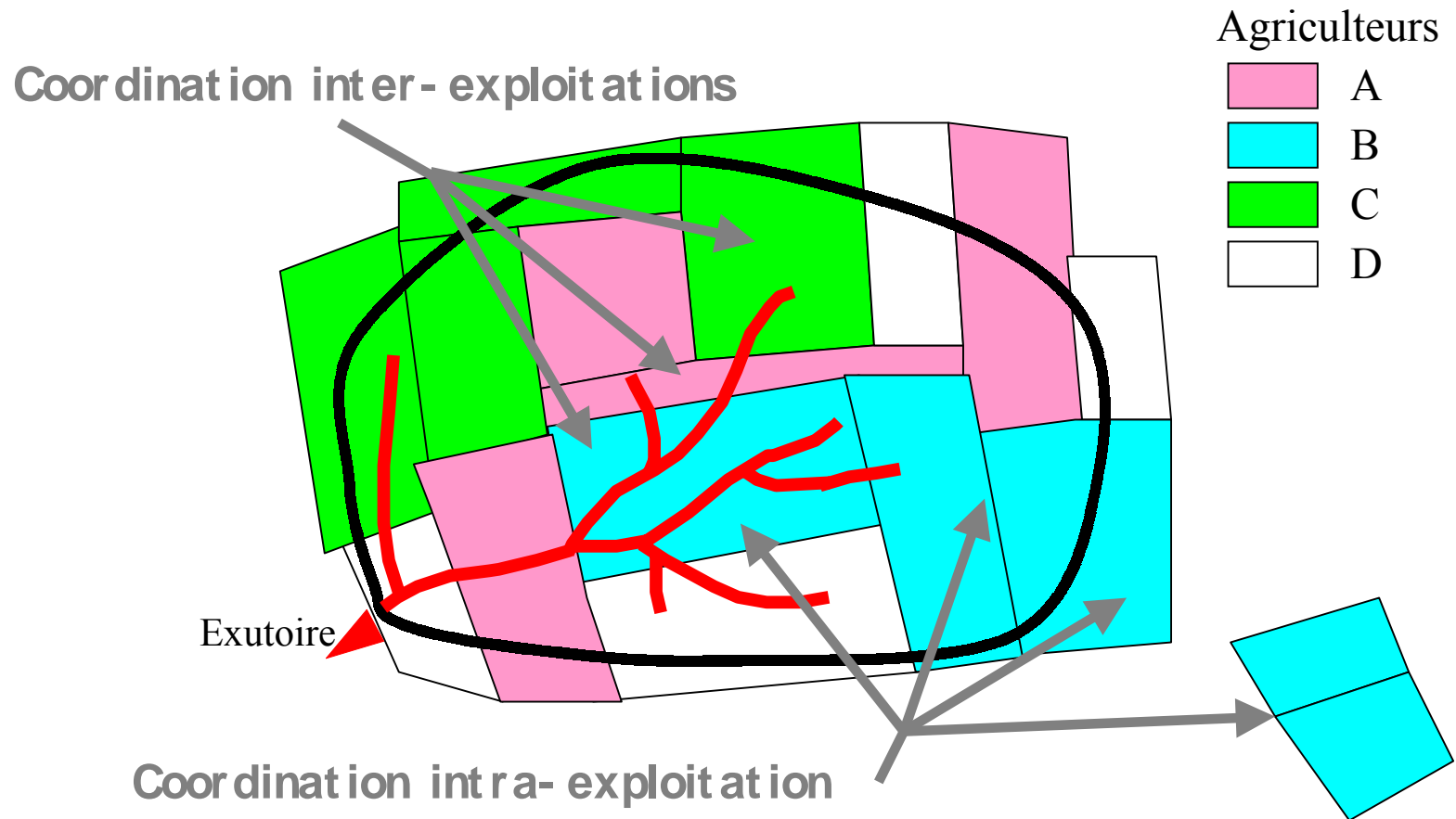
... accentué par une faible couverture végétale

L'érosion hydrique dans les plaines limoneuses : échelle du bassin versant élémentaire



Limiter la production du ruissellement par une modification des pratiques agricoles

→ Localisation des cultures → Itinéraires techniques



⇒ Analyser les décisions à l'origine des pratiques agricoles

Problématique

Objectif : Elaborer une méthodologie opérationnelle d'aide à la conception de modifications des systèmes de culture :

- efficaces vis-à-vis de la maîtrise du ruissellement
- compatibles avec le fonctionnement des exploitations agricoles
- organisées spatialement à l'échelle du bassin versant

Hypothèses :

1. Il existe une diversité de marges de manœuvre et il est possible de définir des types d'exploitation sur cette base.
2. L'utilisation des marges de manœuvre de chaque exploitation permet de réduire le ruissellement d'un bassin versant.

Méthodologie proposée

Etape 1
**Analyse de l'effet des
systèmes de culture
sur le ruissellement**

Echelle :

→ bassin versant

Etape 2
**Analyse des règles
de constitution des
systèmes de culture**

Echelle :

→ exploitation agricole

Etape 3
**Conception de
modifications des
systèmes de culture pour
réduire le ruissellement**

Outils mobilisés

1. Modèle de ruissellement à l'échelle du bassin versant:

→ **STREAM**

Etape 1
Analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement

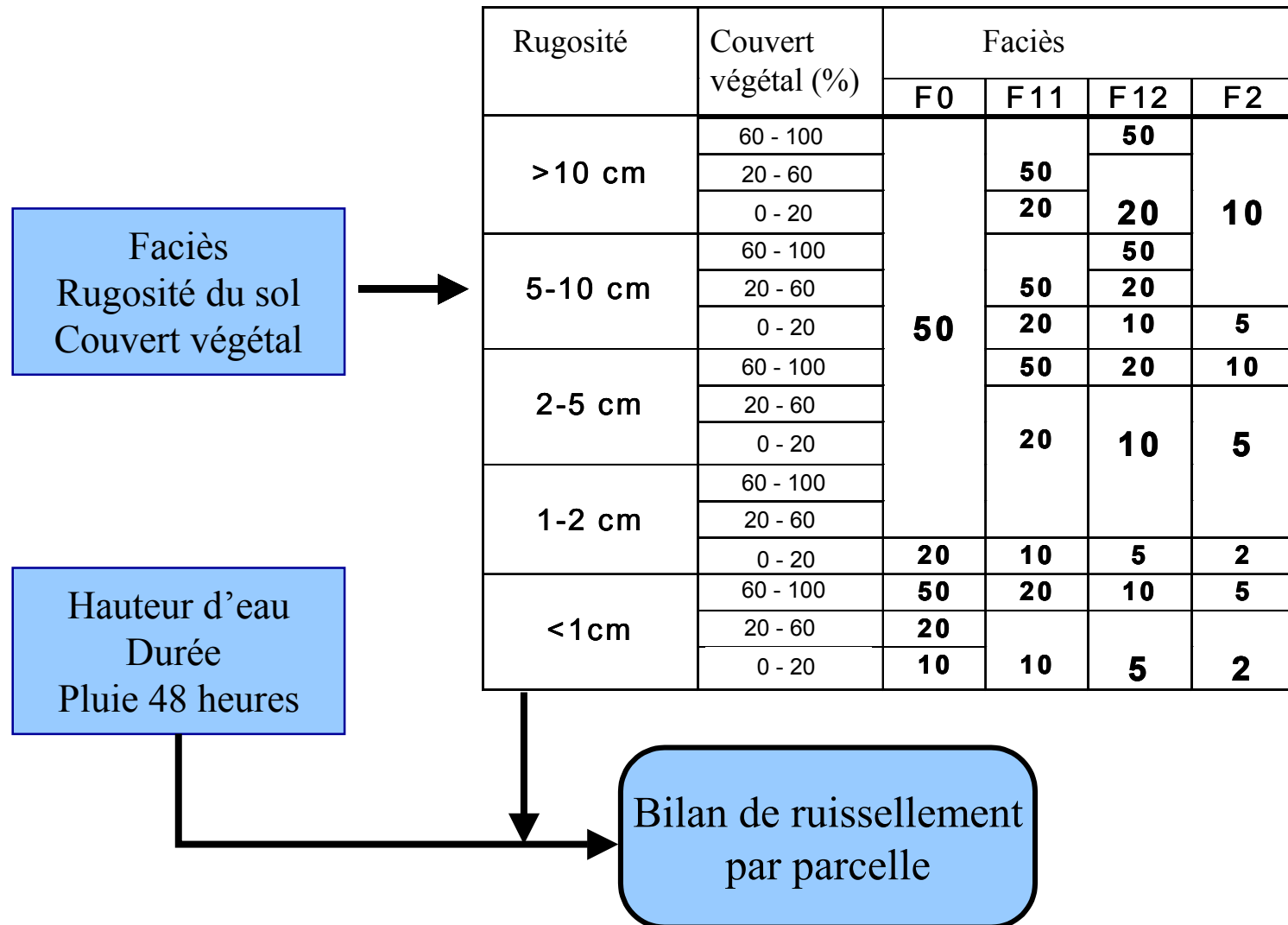
Echelle :

→ bassin versant

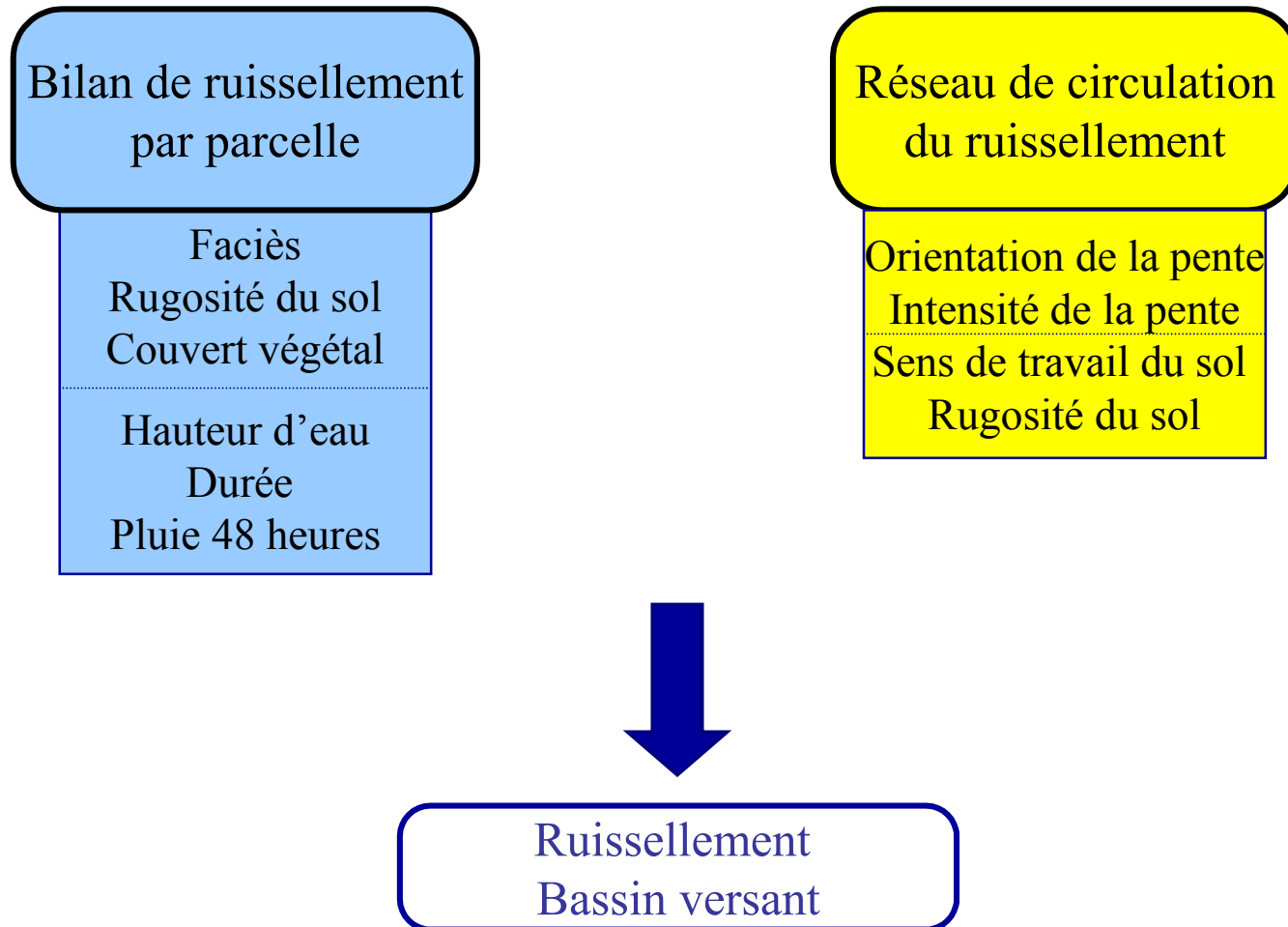
STREAM, module ruissellement

→ L'échelle de temps : l'événement pluvieux / non dynamique

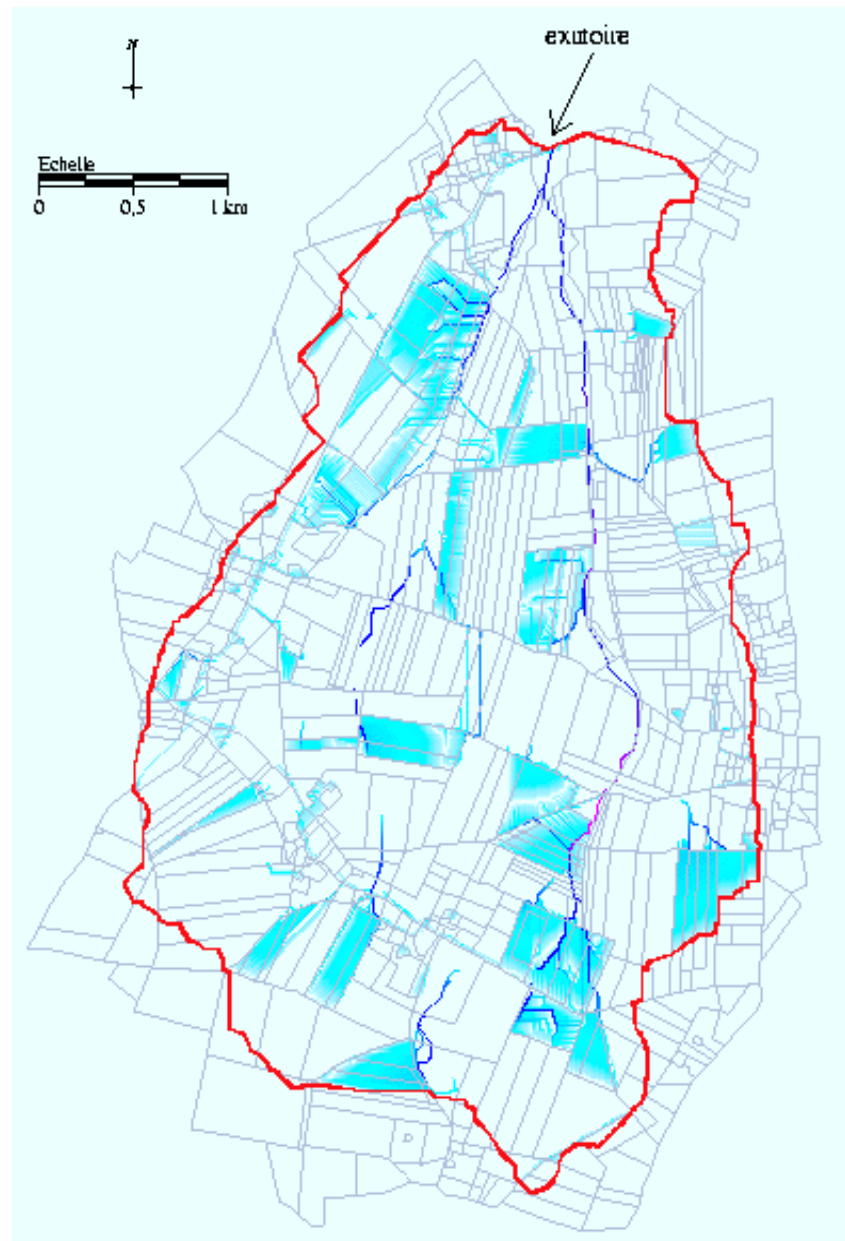
Capacité d'infiltration (mm/h)



STREAM, module ruissellement



STREAM, module ruissellement



Outils mobilisés

Etape 1
**Analyse de l'effet des
systèmes de culture
sur le ruissellement**

Echelle :

→ bassin versant

1. Modèle de ruissellement à l'échelle du bassin versant:

→ **STREAM**

Paramètres d'entrée :
états de surface du sol



2. Correspondance à l'échelle de la parcelle

SDC – états de surface

→ **A établir**

Outils mobilisés

Etape 2
**Analyse des règles
de constitution des
systèmes de culture**

Echelle :

→ exploitation agricole

Modèles décisionnels :

- **D'affectation des cultures
aux parcelles**
- **D'organisation du travail**

Outils mobilisés

Etape 3
Conception de
modifications des
systèmes de culture
pour réduire le
ruissellement

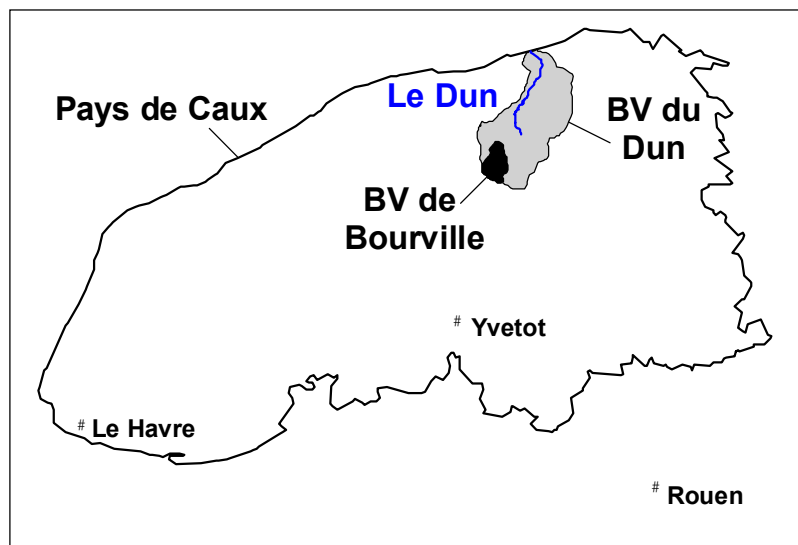
1. Recherche des organisations spatiales des modifications des systèmes de culture :

→ **Méthode à établir**

2. Evaluation des modifications :

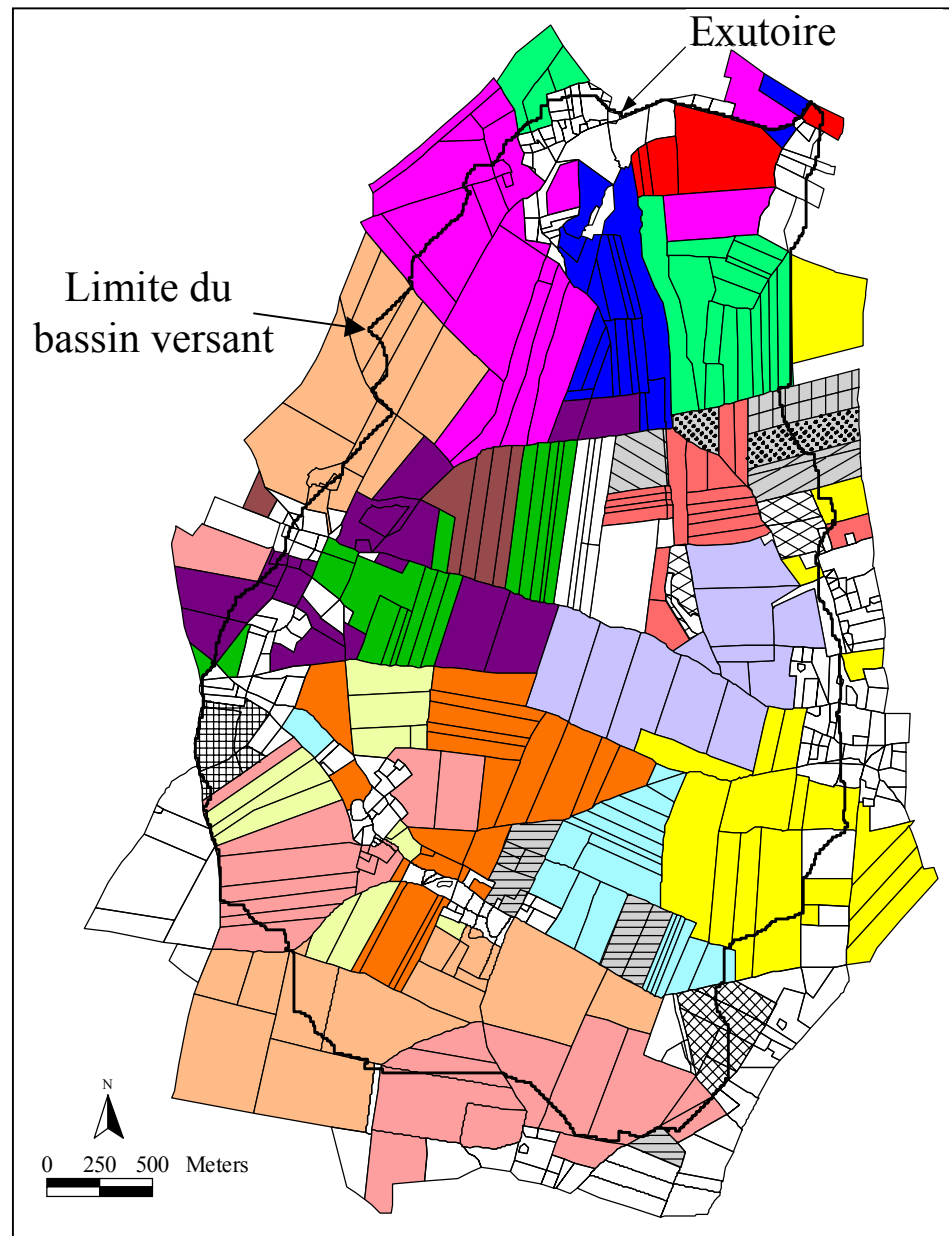
→ **STREAM**

Cas d'étude : le bassin versant de Bourville



Bassin versant de Bourville :

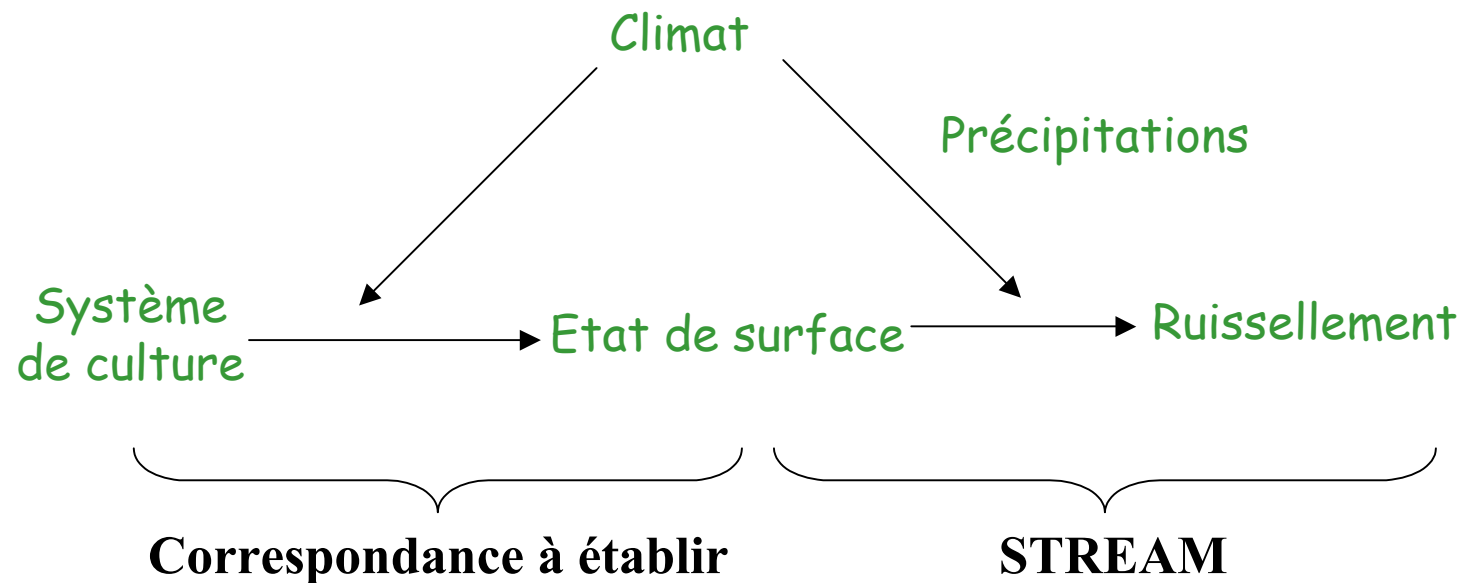
- 1 086 ha
- 75% de terres labourables
- 28 agriculteurs
- 15 agriculteurs exploitent 90% des terres labourables



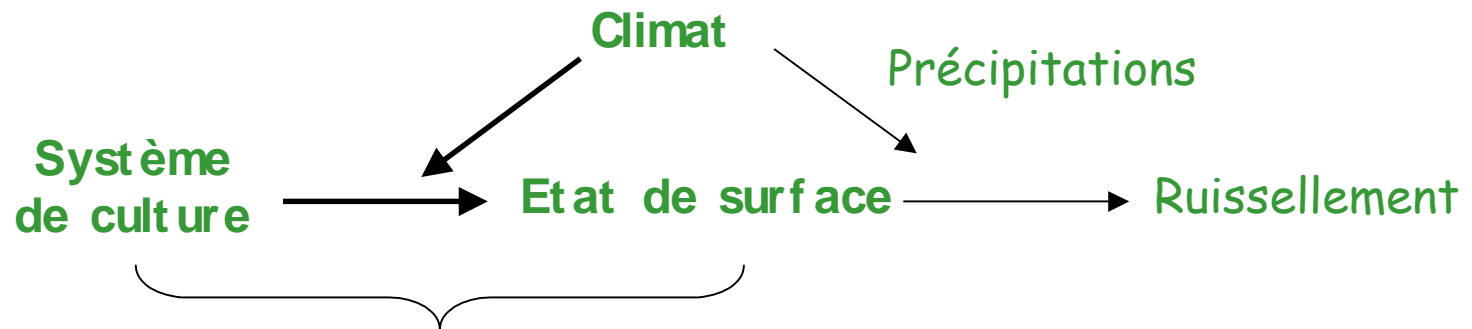
Plan de l'exposé

- Problématique et méthodologie générale
- **1. Analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement**
- 2. Analyse des règles de constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole
- 3. Conception de modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement
- Conclusion et perspectives

Mise au point d'une méthode de diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant



Correspondance systèmes de culture – états de surface



Relevés parcellaires d'états de surface à des dates variées :
- entre 1992 et 2000
- Pays de Caux

- STREAM : échelle de l'événement pluvieux, non dynamique
- Limiter le nombre de simulations



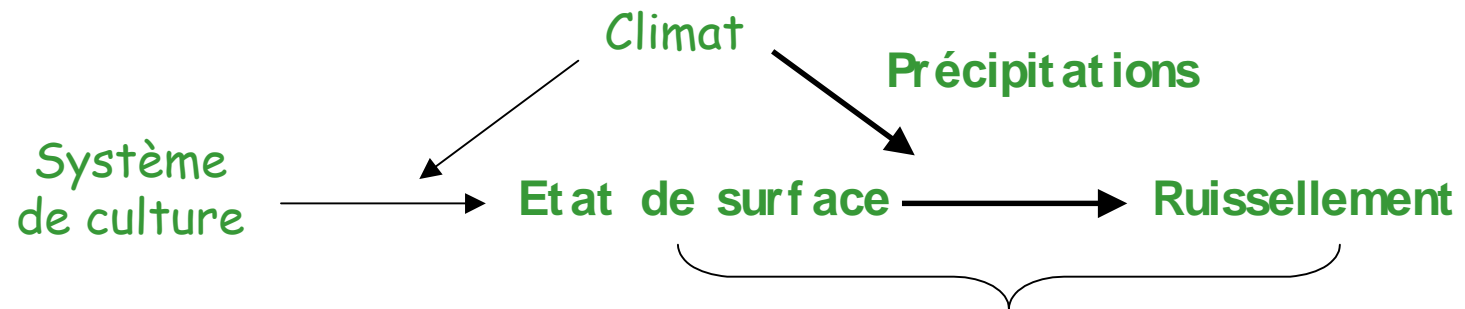
Recherche de périodes de stabilité des états de surface correspondant aux périodes de risques de ruissellement :

→ Hiver : 15 décembre / 15 février

Correspondance SDC - états de surface pour la période hivernale : 15/12 au 15/02

Occupation du sol / itinéraire technique	Infiltration potentielle (mm/h)
Colza et céréales d'hiver	2
Chantier de récolte	2
Déchaumage à socs, précédent céréales à paille	20
Déchaumage à socs, autre précédent	10
Déchaumage outils à dents ou disques	5
Moutarde, précédent pois / pomme de terre	5
Moutarde, autre précédent	10
Ray grass anglais, semé début septembre	10
Ray grass anglais, semé fin septembre	5
Trèfle, semé début septembre	5
Trèfle, semé fin septembre	2

Sélection d'événements pluvieux

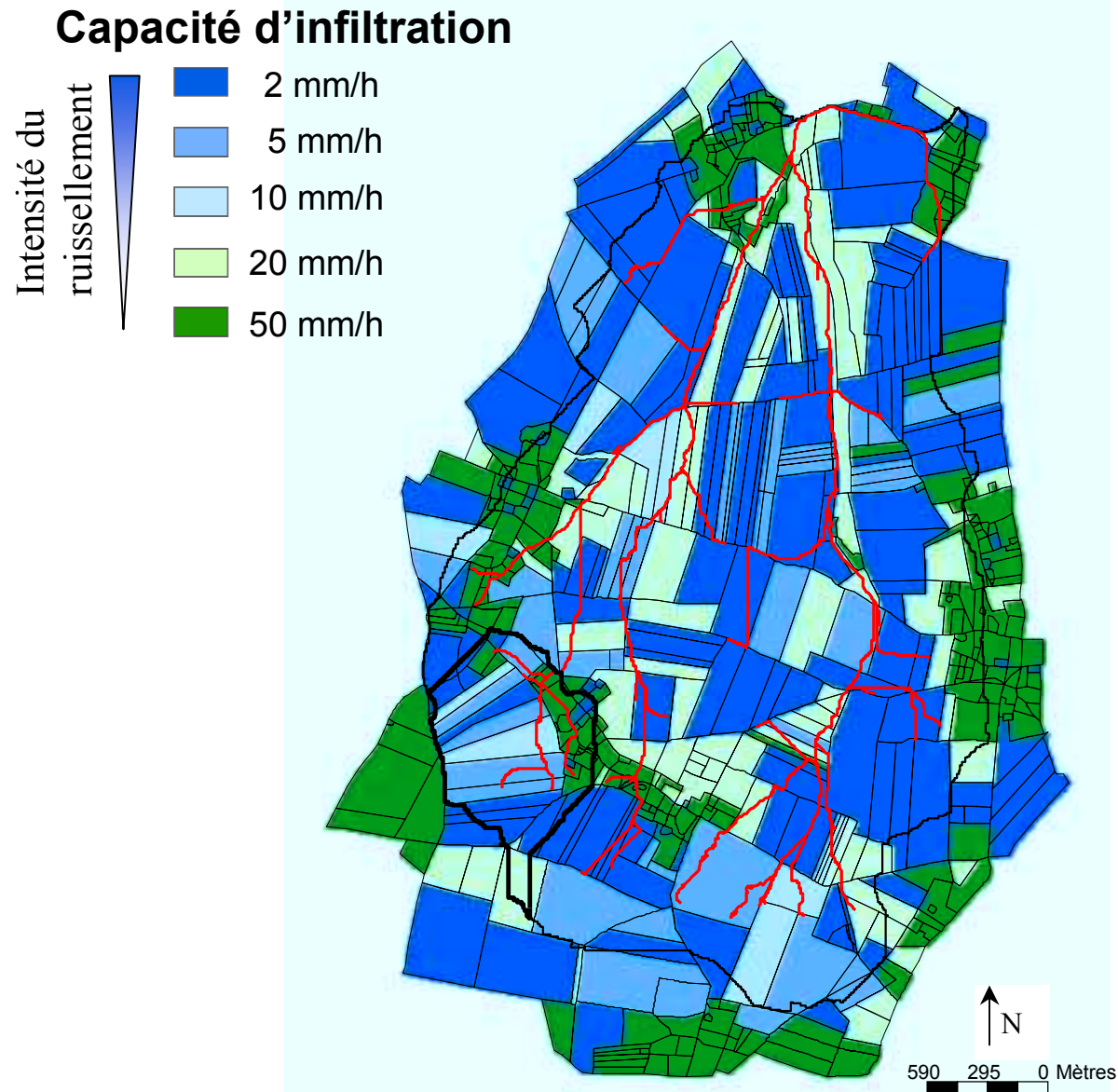


Enregistrements pluviométriques :

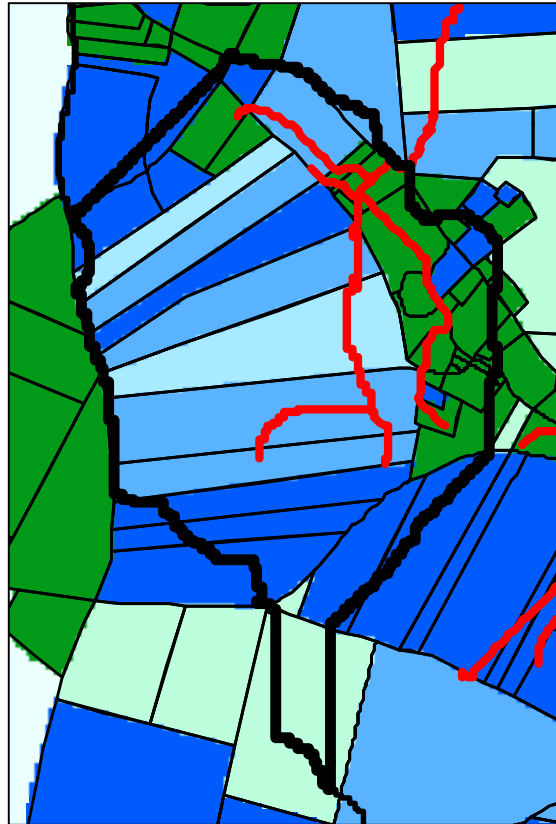
- entre 1992 et 2002
- Bourville et Blosseville
- 457 événements pluvieux

- Identification de deux événements pluvieux :
 - Intense : 22 mm en 2h19, sol humide (A)
 - Peu intense : 29,6 mm en 4h58, sol sec (B)
- 6 configurations du bassin versant reconstituées à partir de
→ assolements et itinéraires techniques de 1996 à 2001

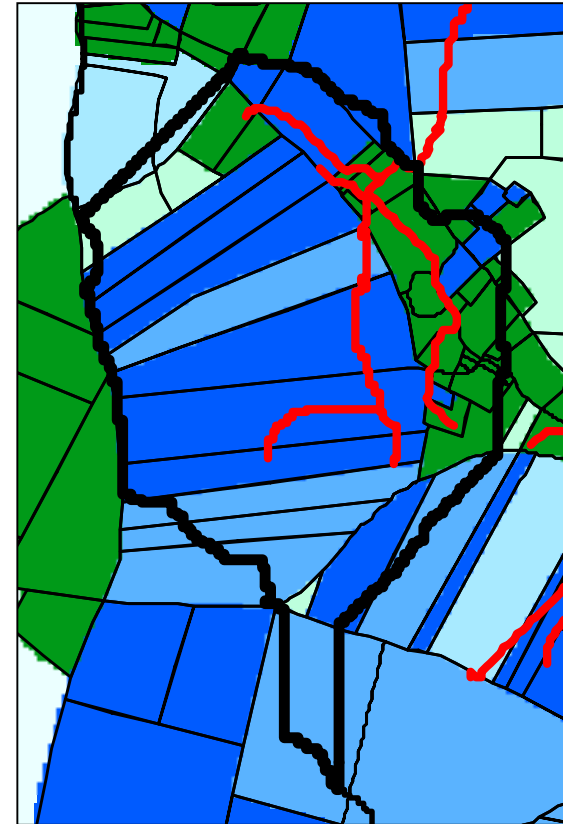
Exemple de configuration : Hiver 1997



Différentes configurations du bassin versant

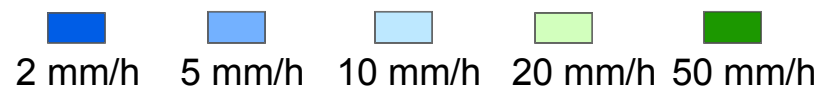


Hiver 1997



Hiver 1999

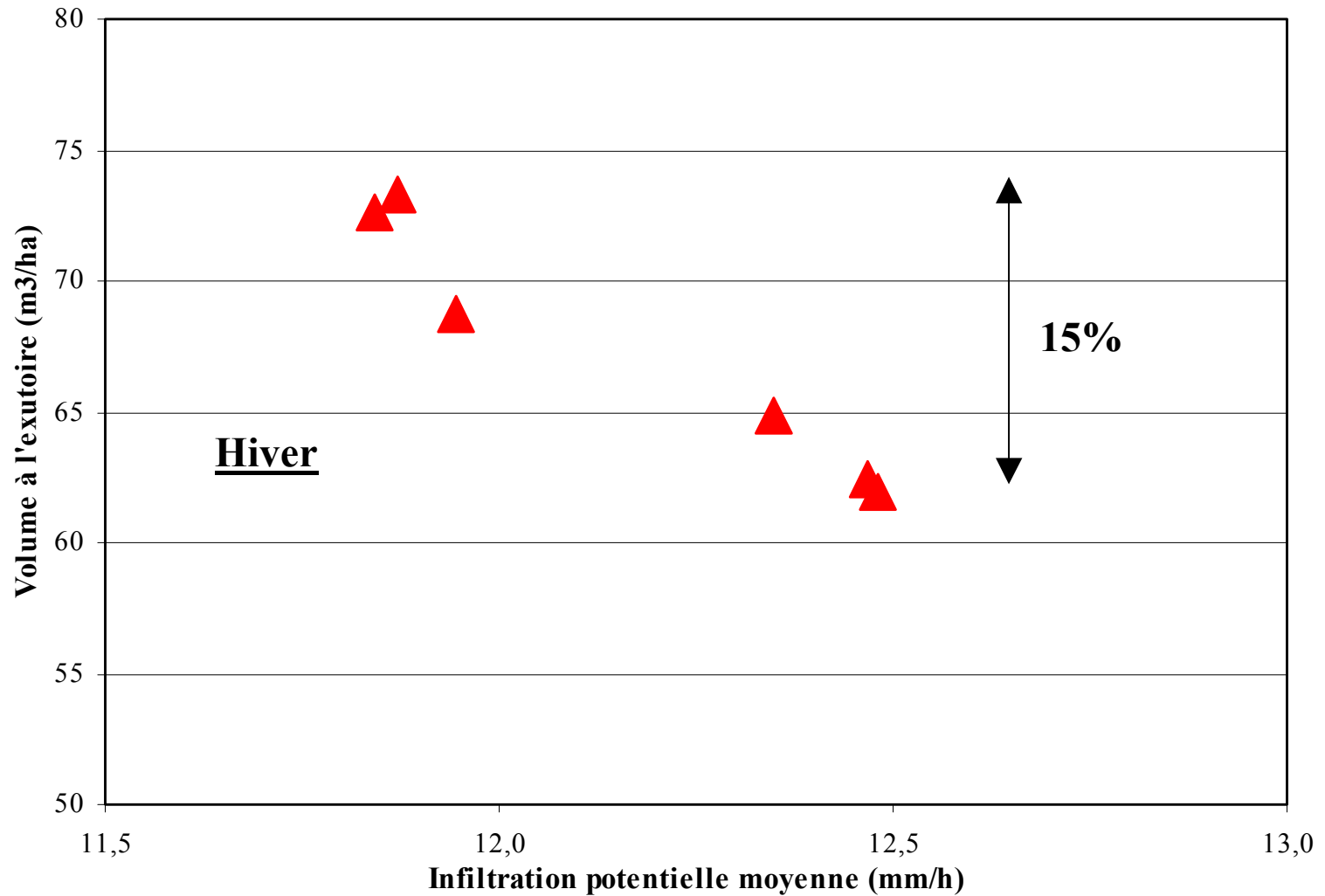
Capacité d'infiltration



Intensité du ruissellement

Mise en évidence de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant

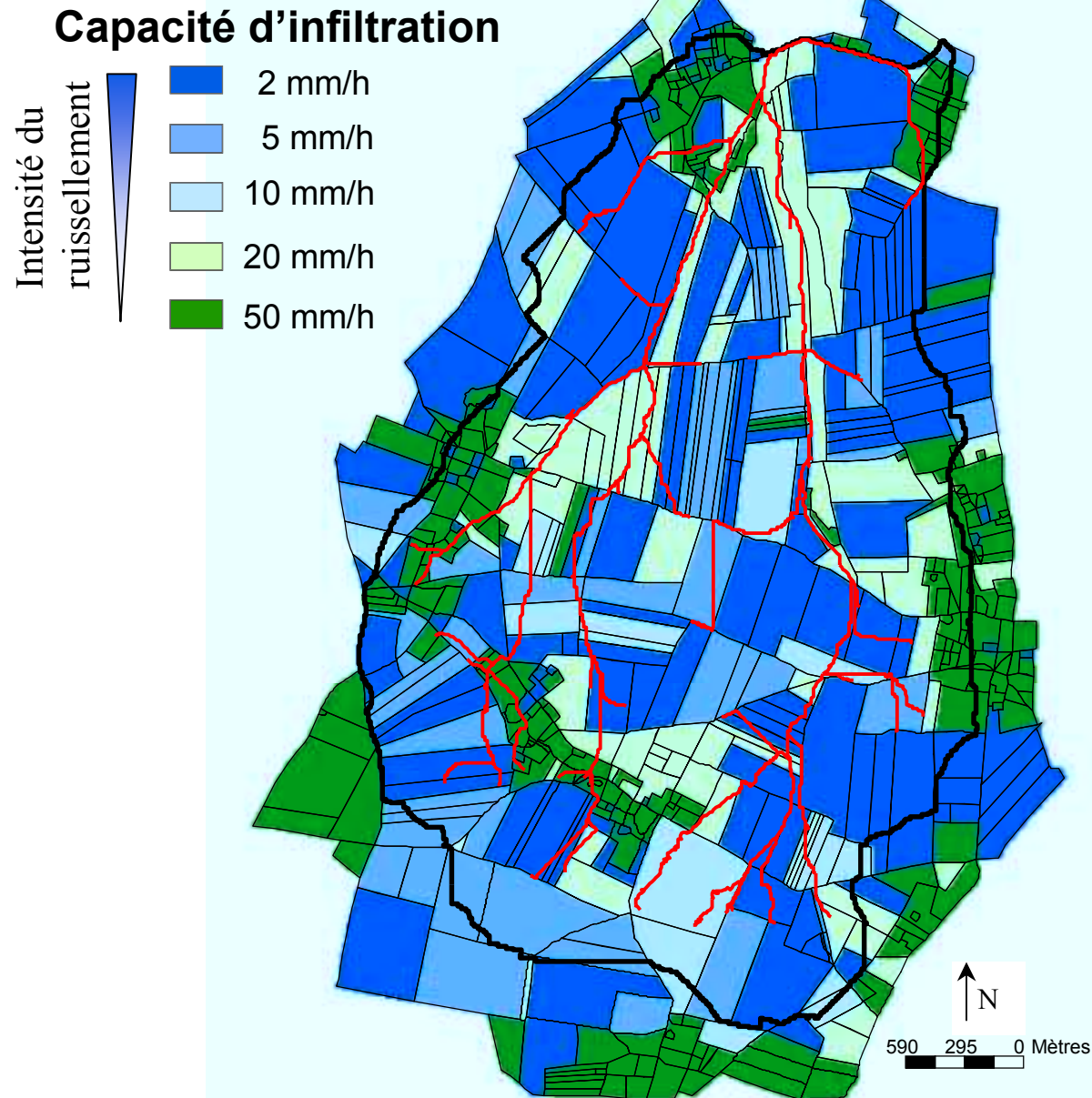
Événement pluvieux intense (A)



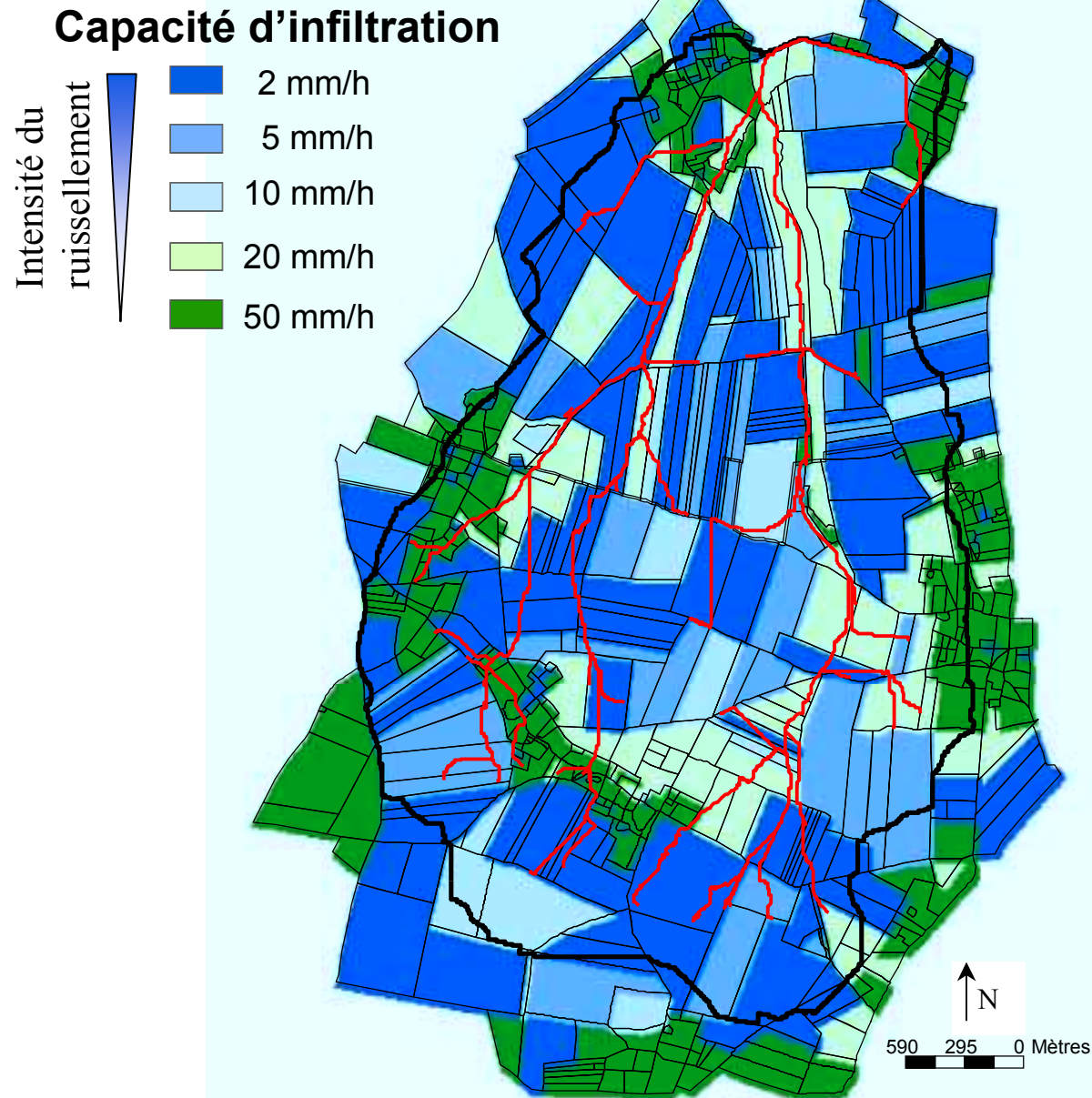
Mise en évidence de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant

Niveau d'infiltration	Fréquence des niveaux d'infiltration	
	Configuration Hiver 2002	Configuration Hiver 2001
2 mm	43 %	43 %
5 mm	18%	16 %
10 mm	7%	8 %
20 mm	20%	21 %
50 mm	12%	12 %

Configuration Hiver 2001



Configuration Hiver 2002



Mise en évidence de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant

Niveau d'infiltration	Fréquence des niveaux d'infiltration	
	Configuration Hiver 2002	Configuration Hiver 2001
2 mm	43 %	43 %
5 mm	18%	16 %
10 mm	7%	8 %
20 mm	20%	21 %
50 mm	12%	12 %
Ruissellement (evt B)	44 905 m ³	48 133 m ³
Ruissellement (evt A)	67 801 m ³	67 195 m ³

- Effet réel de l'organisation spatiale des systèmes de culture
- Interaction avec le type d'événement pluvieux

Plan de l'exposé

- Problématique et méthodologie générale
- 1. Analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement
- **2. Analyse des règles de constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole :**
 - Localisation des cultures sur le territoire d'exploitation
 - Organisation du travail
- 3. Conception de modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement
- Conclusion et perspectives

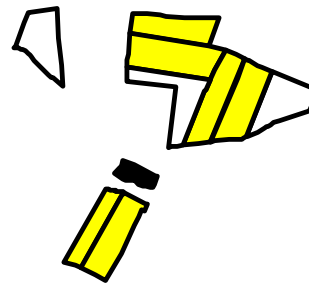
Analyse de la localisation des cultures sur le territoire de l'exploitation agricole

Objectif : évaluer les marges de manœuvre pour modifier la localisation des cultures une année donnée

→ Assolement non modifié

La localisation des cultures est alors fonction de deux types de règles agronomiques :

– zone cultivable



– délais de retour et précédents cultureux

Blé / Lin / Pois / Blé / Colza / ?
n-5 n-4 n-3 n-2 n-1 n

Zones cultivables

	BLE	ESC	COLZA	POIS	ME	BF	BS	PDT	LIN
Distance zone stockage					■	■			
Accès difficile agriculteur					■	■	■		
Accès difficile sucrerie							■		
Géométrie parcelle							■		■
Pente / Cailloux				■		■	■	■	■
Repousse dans la BS			■						
Désherbage difficile				■					
Excès d'azote dans le sol									■
Pression parasitaire				■					■

ESC : escourgeon / BS et BF : betteraves sucrières et fourragères

ME : maïs ensilage / PDT : pomme de terre



Critères d'exclusion d'une parcelle de la zone cultivable d'une culture donnée

Règles de successions culturales issues des enquêtes

	Délai de retour	Précédents culturaux
Blé	2-3	Tous sauf escourgeon
Escourgeon	3-6	Blé
Colza	3-6	Escourgeon, blé, lin pois
Pois	5-6	Escourgeon, blé, lin, BS/F
Maïs ensilage	Variable	Escourgeon, blé, lin, pois, BS/F, maïs
BS et BF	3-6	Escourgeon, blé, lin
Pomme de terre	5-6	Escourgeon, blé, lin, pois, BS/F
Lin	5-6	Blé, escourgeon

Différentes successions culturales

Motif blé de 3 ans :

Colza	/	Blé	/	Lin
Pois	/		/	Escourgeon
Maïs ensilage	/		/	
BS/F	/		/	

Colza	/	Blé	/	Lin
PDT	/		/	BS/F
Maïs ensilage (Pois)	/		/	Escourgeon (Pois)

Motif blé de 2 ans :

Colza	/	
Pois	/	
Maïs ensilage	/	Blé
BS/F	/	
Lin	/	
PDT	/	

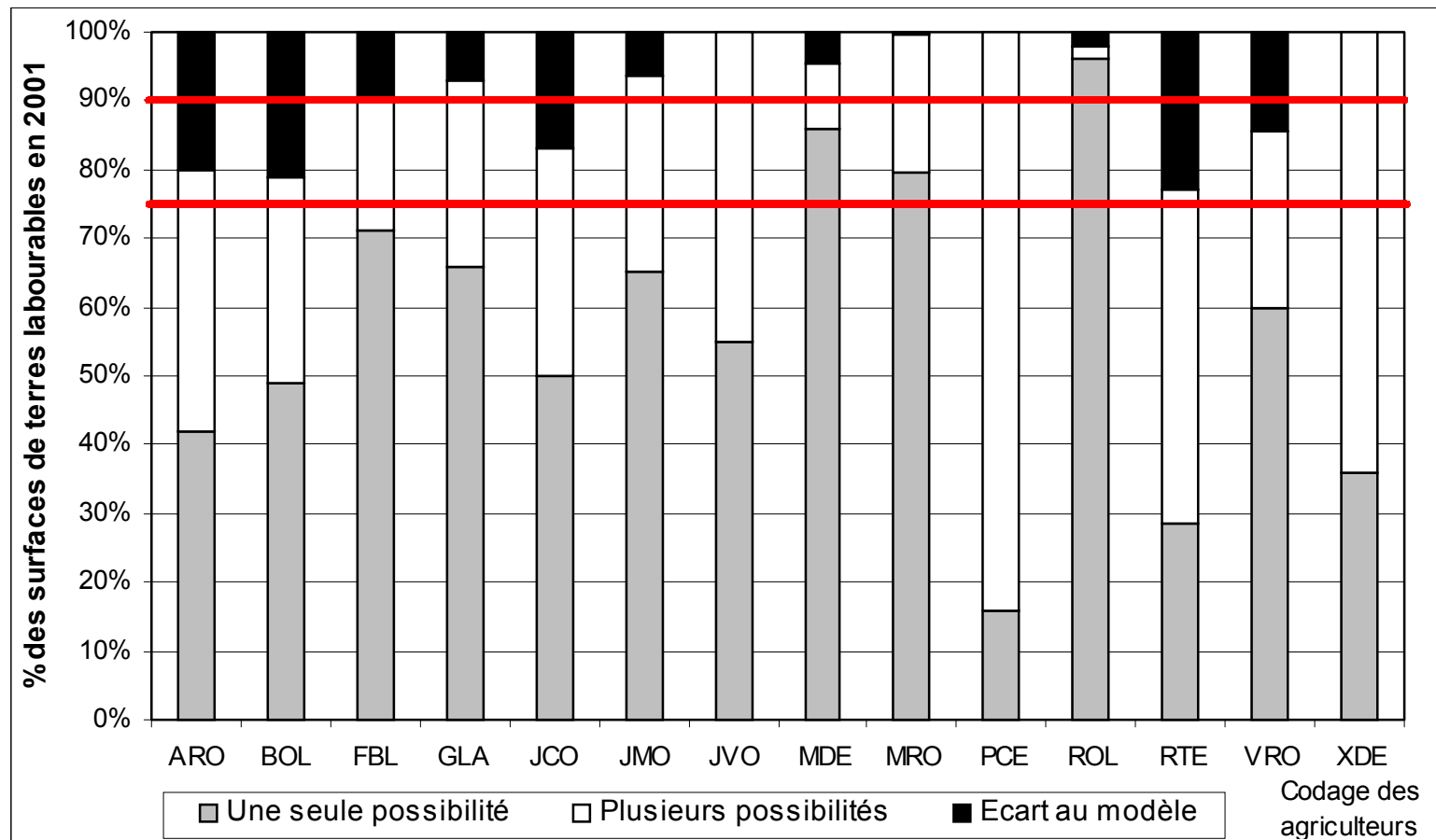
Combinaisons des différents motifs sur 5 ou 6 ans :

Sur 6 ans : BS – BLE – ESC – POIS – BLE – LIN
ou : BS – BLE – COL – BLE – LIN – BLE
ou : PDT – BLE – BS – POIS – BLE – LIN

Sur 5 ans : BS – BLE – COL – BLE – LIN

Test des règles issues des enquêtes

- Analyse des assolements de 1996 à 2001
- Simulation 2001 :



Différents facteurs influencent le niveau de marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures

- Contraintes du territoire d'exploitation : dispersion du parcellaire
- Contraintes des règles de successions culturales : flexibilité du délai de retour du blé
- Diversité des cultures de l'assolement :
 - Forte diversité : nombreuses successions culturales envisageables
 - Faible diversité : peu de successions culturales envisageables
- Deux types de mise en œuvre des successions culturales :
 - Définition de successions culturales à l'avance qui sont appliquées automatiquement chaque année
 - Pas de succession fixée à l'avance, mais application des règles élémentaires chaque année

Marges de manœuvre pour modifier l'organisation spatiale des cultures au sein de l'exploitation

Successions culturales fixées :
aucune marge de manœuvre
4 agriculteurs

				Diversité des cultures	
				Faible	Importante
Contraintes du territoire d'exploitation	Dispersion du parcellaire forte	Délai de retour du blé	Rigide (soit 2 soit 3 ans)	Aucune	Faible
			Souple (2 <u>et</u> 3 ans)	Faible	Intermédiaire <i>1 agriculteur</i>
	Dispersion du parcellaire faible		Rigide (soit 2 soit 3 ans)	Faible	Intermédiaire <i>1 agriculteur</i>
			Souple (2 <u>et</u> 3 ans)	Intermédiaire <i>2 agriculteurs</i>	Importante <i>6 agriculteurs</i>

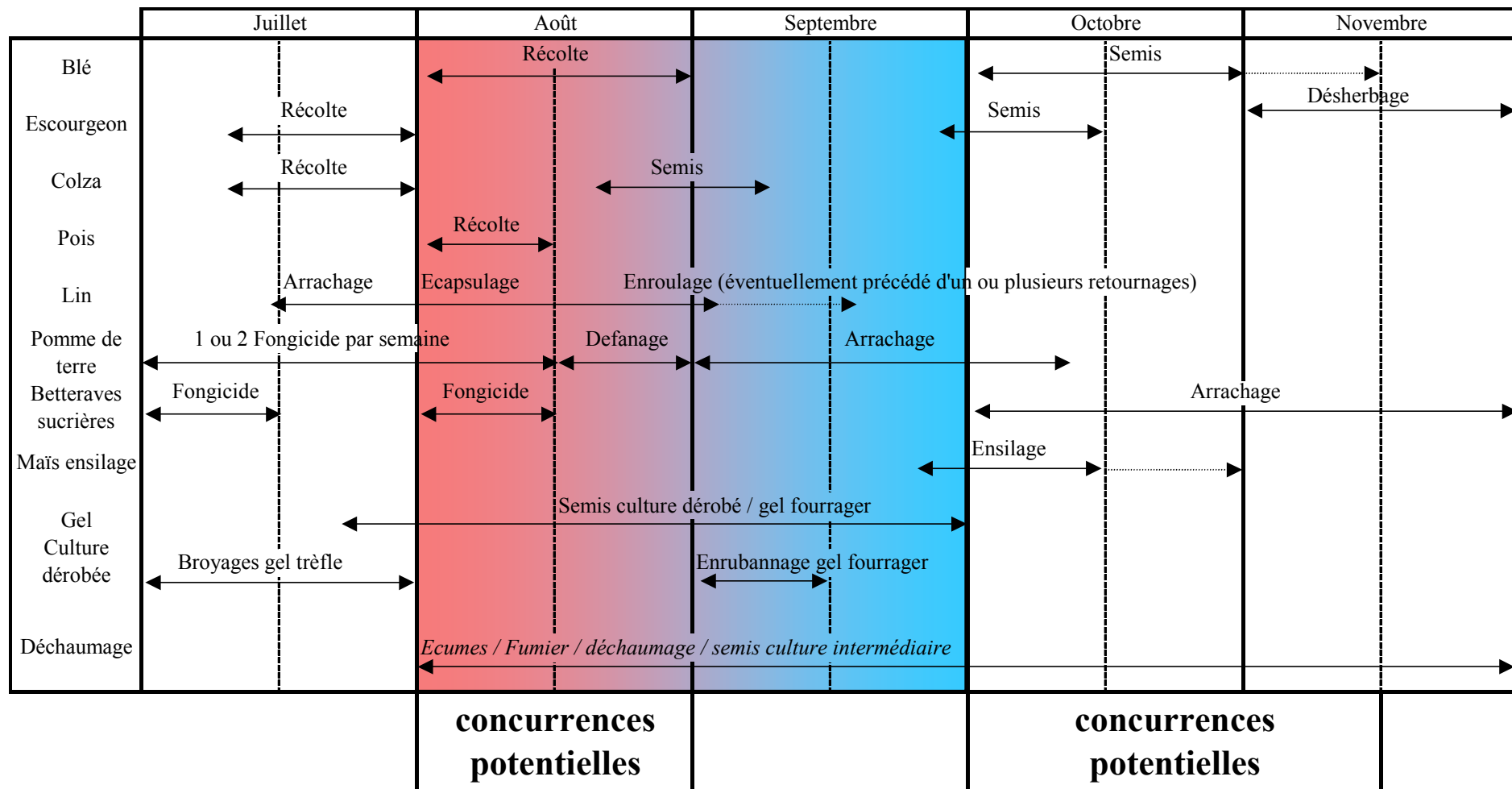
Analyse de l'organisation du travail

Objectif : évaluer les marges de manœuvre pour insérer des opérations culturales pour limiter le ruissellement

→ Opérations culturales liées à la production non modifiées

- Période d'analyse choisie : juillet – novembre
 - Période propice à la réalisation d'interventions culturales limitant le ruissellement
 - Fortes concurrences entre travaux de récoltes et de semis
 - Connaissances suffisamment précises sur l'effet des techniques culturales sur le ruissellement
- Simulation de l'organisation du travail pour évaluer les jours disponibles pour insérer des opérations culturales supplémentaires :
 - Déchaumage à socs
 - Semis de cultures intermédiaires

Calendrier des créneaux optimaux de réalisation des chantiers



Simulation de l'organisation du travail

- En complément du calendrier et des règles de priorité :
 - Inventaire main d'œuvre, matériel et vitesse de réalisation des chantiers
 - Règles de calcul des jours disponibles établies par His, 1996
- Logiciel OTELO : investissement trop lourd

⇒ Feuille de calcul Excel, moins complexe :

- Des règles de calcul des jours disponibles par chantier constantes
- Pas d'imbrication des chantiers



**Une simulation de l'organisation du travail
pessimiste qui ne surévalue pas les jours disponibles**

Vérification de la cohérence des simulations

- **Principe** : simulation dans des conditions climatiques extrêmes
 - 1990 : favorable
 - 1992 : défavorable
- Année favorable : aucun chantier non terminé et peu de jours de retard par rapport au planning prévisionnel
- Année défavorable, trois types d'agriculteurs :
 - Un peu de retard
 - Beaucoup de retard
 - Beaucoup de retard et plusieurs chantiers non terminés

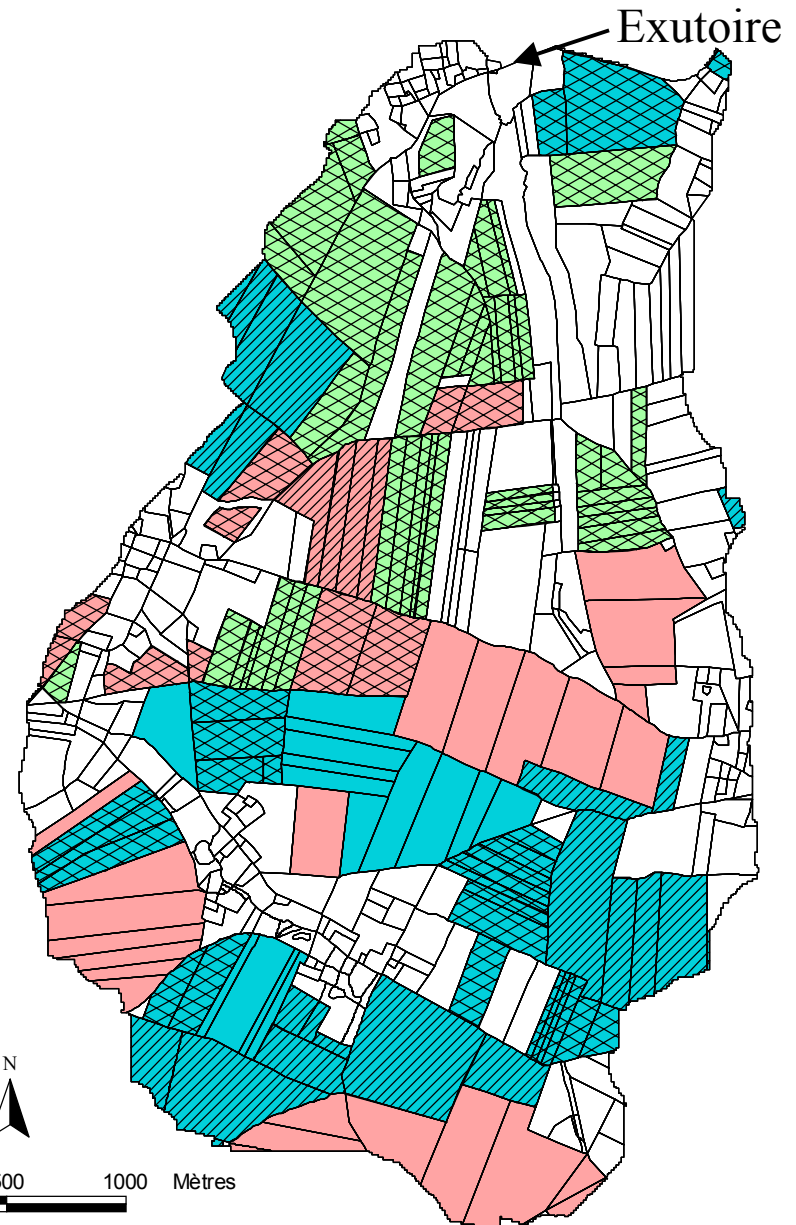
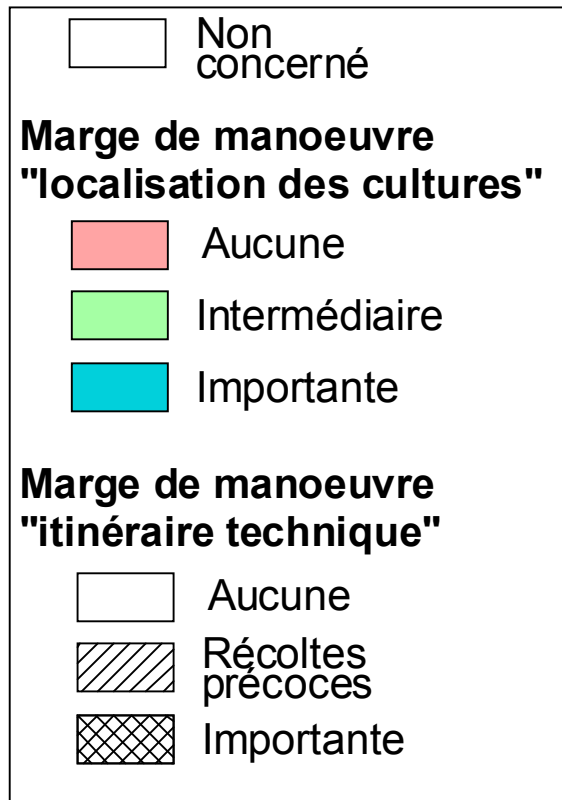


Malgré les simplifications, la cohérence est conservée

Marges de manœuvre pour modifier les itinéraires techniques en interculture

- Simulations
 - Limitées à la période critique : août – septembre
 - Année climatique médiane
- Marges de manœuvre itinéraire technique :
 - des jours disponibles pour intervenir
 - des récoltes terminées
- Trois niveaux de marges de manœuvre itinéraire technique :
 - aucune : aucun jour disponible
 - intermédiaires : des jours disponibles pour les récoltes précoces (escourgeon, pois, blé)
 - importantes : des jours disponibles pour les récoltes précoces et tardives (lin et pomme de terre)

Spatialisation des marges de manœuvre



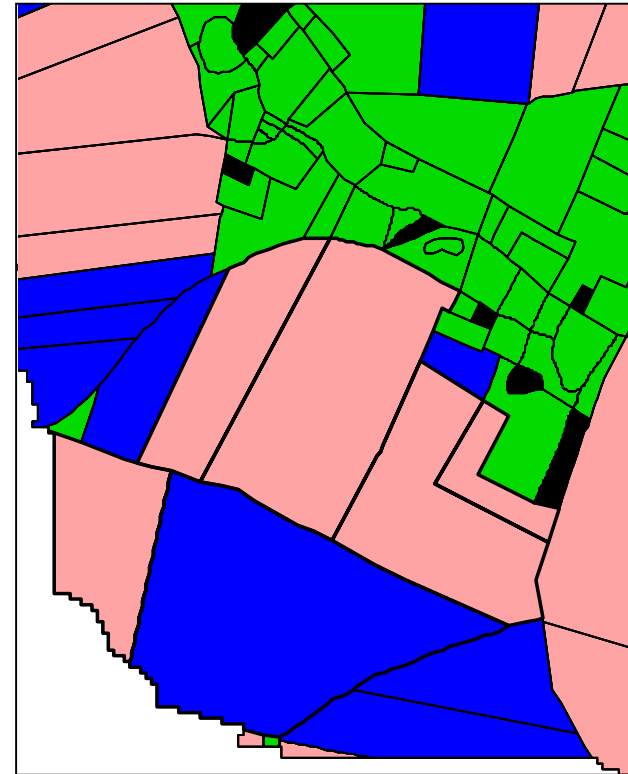
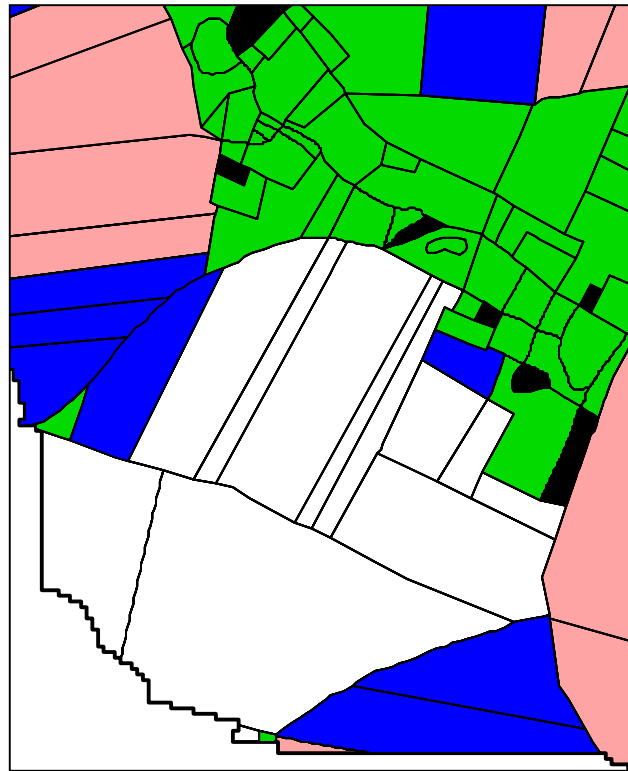
Plan de l'exposé


- Problématique et méthodologie générale
- 1. Analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement
- 2. Analyse des règles de constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole
- **3. Conception de modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement**
- Conclusion et perspectives


Modification des systèmes de culture sur l'ensemble du bassin versant

- **Objectif** :
 - réduire le ruissellement en hiver,
 - à l'exutoire,
 - en évaluant les conséquences au printemps et l'hiver suivant
- **Principe** : combiner les modifications possibles du fait des marges de manœuvre identifiées :
 - **Recherche des assolements de BV : favoriser l'infiltration**


Construction de l'assolement infiltrant




 Culture d'hiver : infiltration 2 mm/h

 Zone bâtie : infiltration 2 mm/h

 Culture de printemps : infiltration 2 à 20 mm/h

 Prairie et jardin : infiltration 20 à 50 mm/h

 Plusieurs cultures possibles



0 200 400 Meters

Modification des systèmes de culture sur l'ensemble du bassin versant

- **Objectif** :
 - réduire le ruissellement en hiver,
 - à l'exutoire,
 - en évaluant les conséquences au printemps et l'hiver suivant
- **Principe** : combiner les modifications possibles du fait des marges de manœuvre identifiées :
 - Recherche des assolements de BV : favoriser l'infiltration
 - **Recherches des itinéraires techniques : fonction des jours disponibles**

Modification des itinéraires techniques

	Jours nécessaires		Jours disponibles	
	Déchaumage à socs	Culture intermédiaire	Déchaumage à socs	Culture intermédiaire
FBL	1,5	0	+	NC
PCE	1,5	0	+	NC
JCO	3,5	0,5	+	+
MDE	4	2	+	+
XDE	3,5	0	+	NC
BOL	1,5	0,5	+	+
ROL	2,5	1	+	+
ARO	2,5	0,5	+	+
RTE	3,5	0,5	+	+
JMO	9	0,5	=	+
JVO	7	1,5	+	0
VRO	4	0,5	=	0
GLA	4,5	0	0	NC
MRO	6,5	1	0	0

NC : non concerné

+ : jours disponibles excédentaires

= : jours disponibles limités

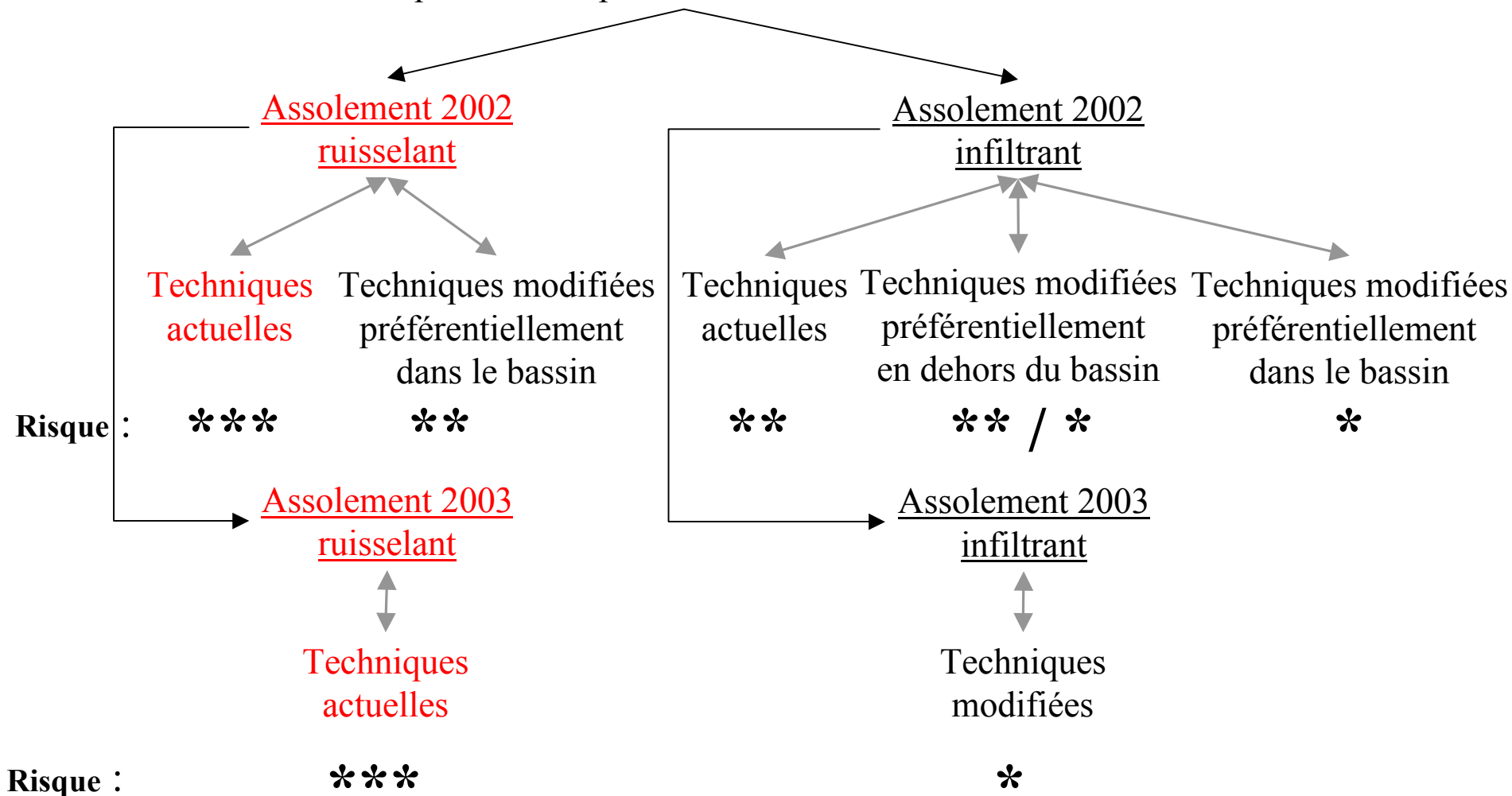
0 : aucun jour disponible

Modification des systèmes de culture sur l'ensemble du bassin versant

- **Objectif** :
 - réduire le ruissellement en hiver,
 - à l'exutoire,
 - en évaluant les conséquences au printemps et l'hiver suivant
- **Principe** : combiner les modifications possibles du fait des marges de manœuvre identifiées
 - Recherche des assolements de BV : favoriser l'infiltration
 - Recherches des itinéraires techniques : choix de l'interculture en fonction du précédent cultural
- Cela suppose une coordination intra-exploitation et inter-exploitation
- Test des configurations obtenues avec STREAM

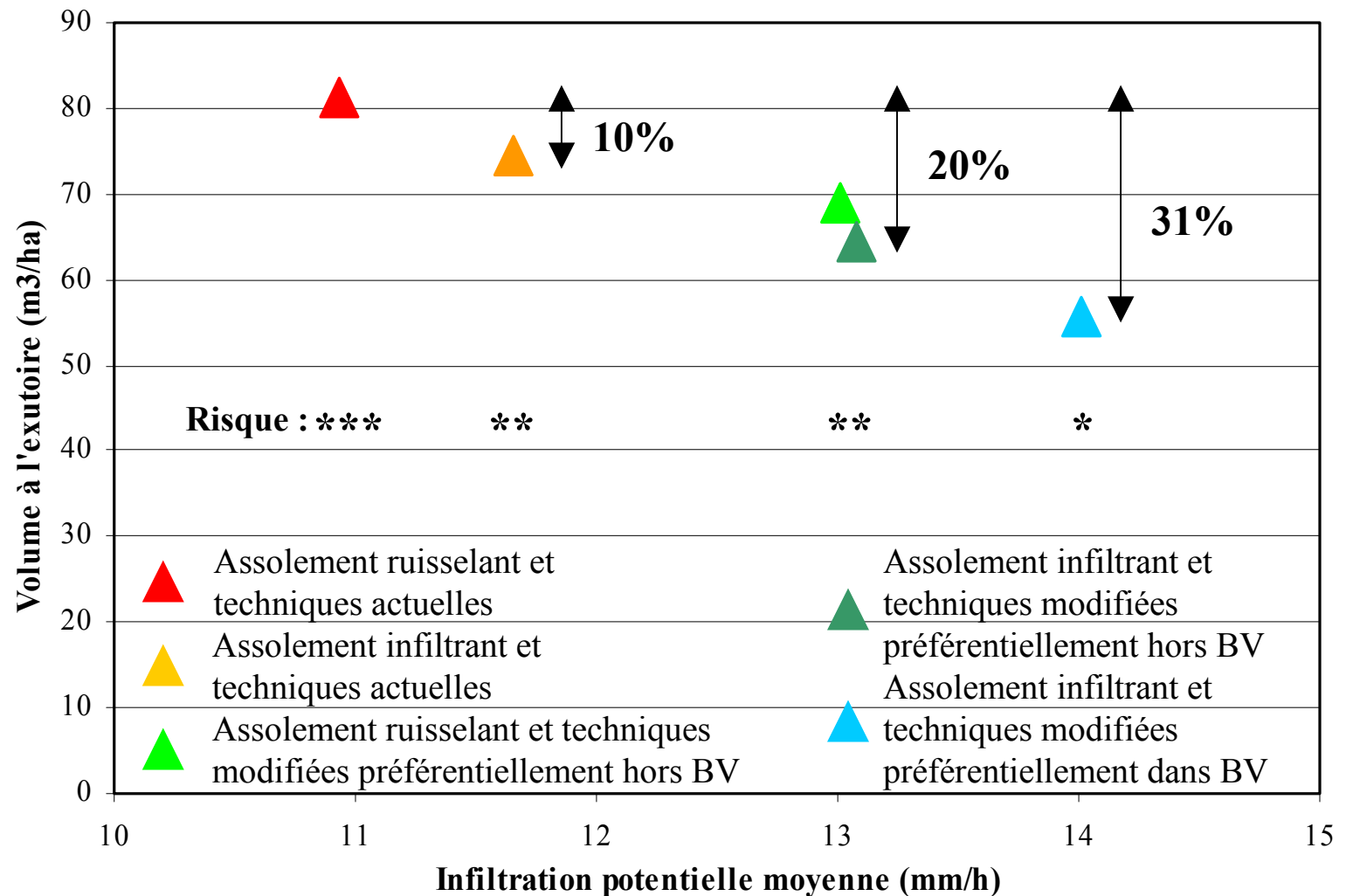
Construction de différentes configurations de bassin versant

Historique de l'occupation du sol entre 1996 et 2001



Simulations de ruissellement en hiver 2002

Evénement pluvieux intense (A)

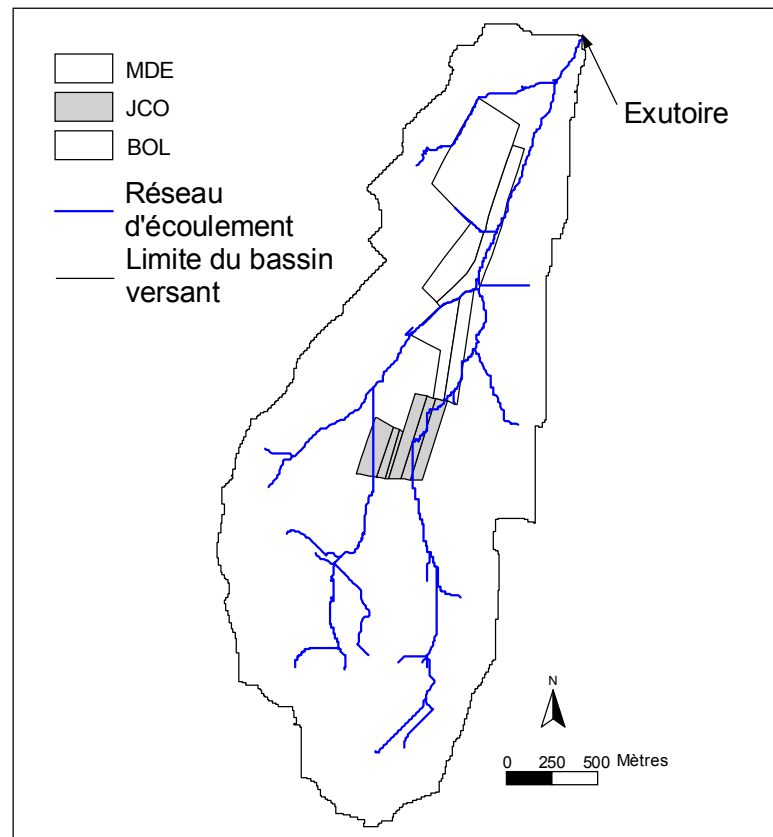


Plan de l'exposé

- Problématique et méthodologie générale
- 1. Analyse de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement
- 2. Analyse des règles de constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole
- 3. Conception de modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement
- **Conclusion et perspectives**

Limites à une modification de l'organisation spatiale des cultures

- Successions culturales basées sur des règles autres qu'agronomiques
- Parcelles contiguës implantées simultanément en blé

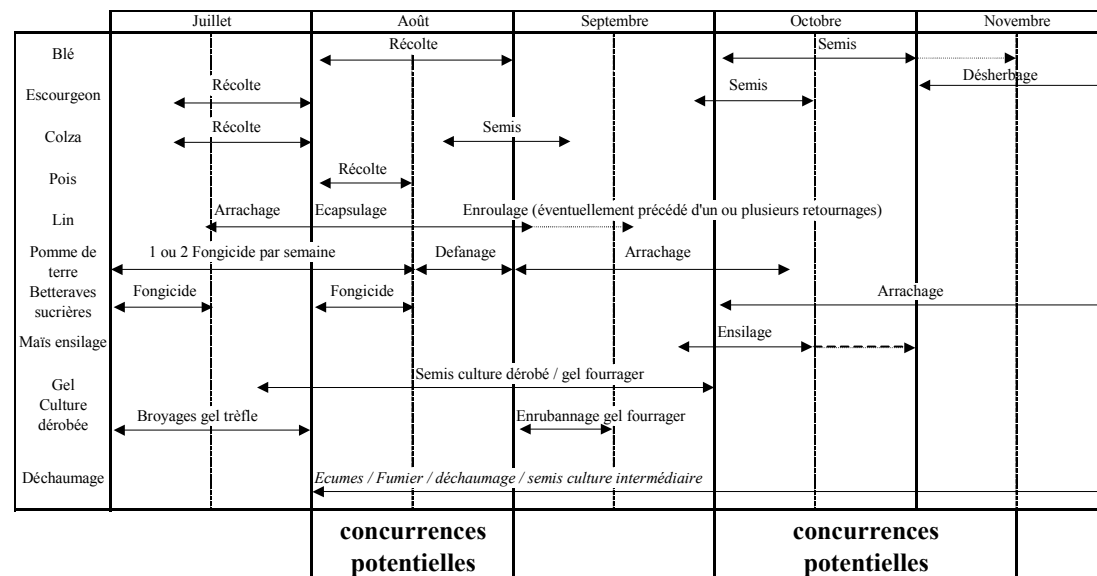
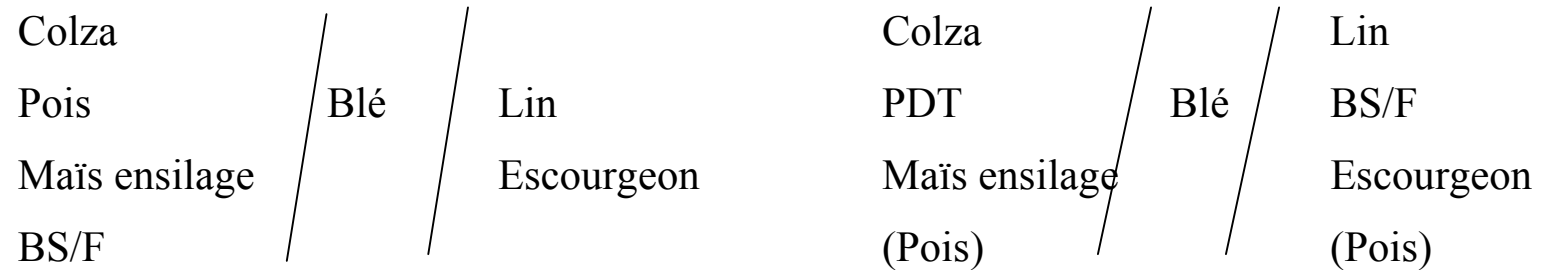


Conclusion : efficacité environnementale

- **Conditions particulières de l'étude :**
 - Un seul bassin versant en s'assurant de l'effet sur les parcelles extérieures a posteriori
 - Un seul processus écologique
 - ⇒ compromis nécessaires et proposition de modifications moins efficaces pour réduire le ruissellement
- **Cas du printemps :**
 - Variabilité climatique plus importante
 - Événements pluvieux orageux plus fréquents

Conclusion : caractère opérationnel

- Modèle des règles d'affectation des facteurs de production au sein de l'exploitation, mais nécessité de réaliser des enquêtes pour les ajuster à chaque exploitation



Conclusion : caractère opérationnel

- Proposition d'une démarche d'identification des marges de manœuvre

Localisation des cultures

Aucune	Faible
Faible	Intermédiaire
Faible	Intermédiaire
Intermédiaire	Importante

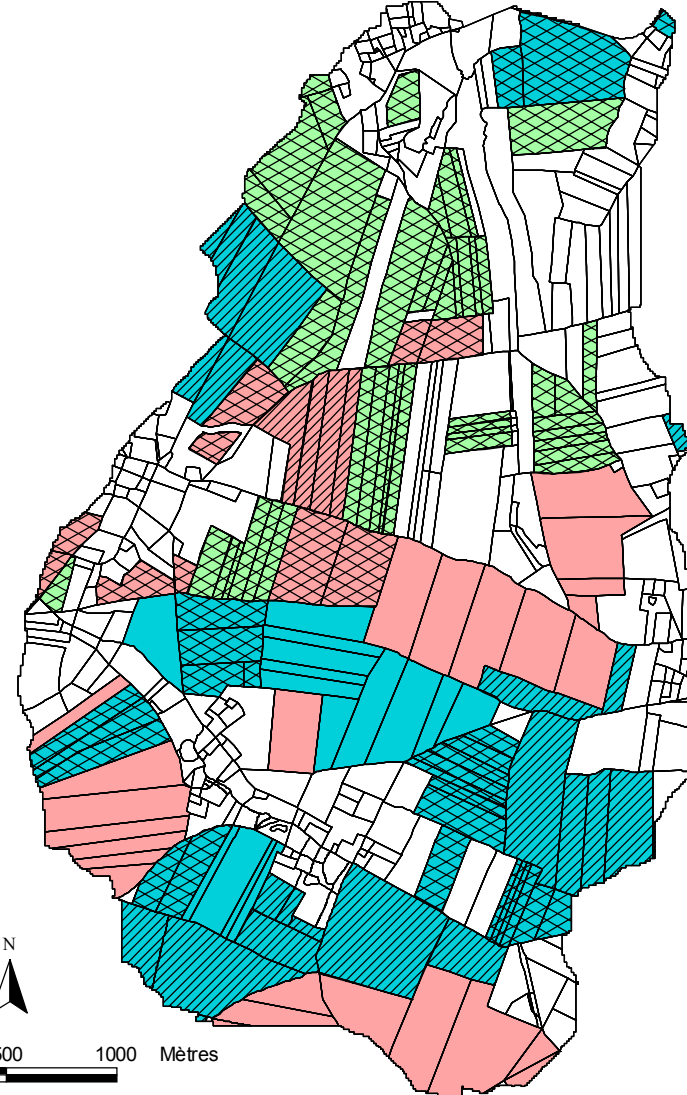
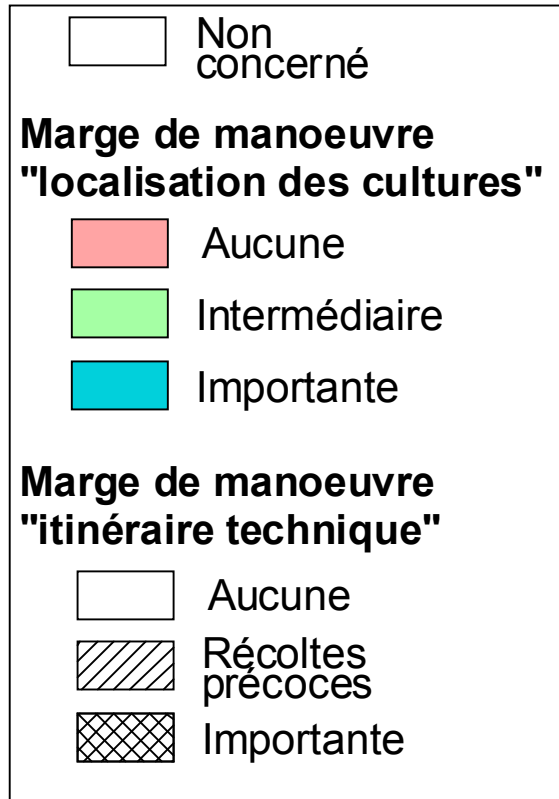
→ 3 critères

Itinéraire technique

Aucune
Intermédiaire
Importante

→ Simulations

Conclusion : caractère opérationnel



Perspectives

- Exploration plus complète des possibilités agronomiques de localisation des cultures :
 - Générateurs de successions culturales (ROTAT, Dogliotti et al, 2003)
- Développement / amélioration d'outils informatiques pour rendre la méthodologie plus opérationnelle :
 - **Niveau exploitation** : simulateurs des règles de décisions pour identifier les marges de manœuvre
 - Localisation des cultures
 - Itinéraires techniques
 - **Niveau bassin versant** : générateurs de scénarios sur la base des marges de manœuvre identifiées

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 : Maîtrise du ruissellement érosif à l'échelle d'un petit bassin versant agricole : problématique.....	5
1. Bilan des connaissances sur l'érosion hydrique des sols et des moyens de maîtrise dans les régions de grande culture du nord de l'Europe.....	6
1.1 Les systèmes érosifs : mécanismes et dégâts occasionnés.....	6
1.1.1 <i>Principes fondamentaux.....</i>	6
1.1.2 <i>Les différentes formes d'érosion.....</i>	8
1.1.3 <i>Les principaux déterminants de l'érosion des sols dans les plaines loessiques.....</i>	10
1.1.3.1 Une faible capacité d'infiltration et de stockage de l'eau.....	11
1.1.3.2 Un réseau de concentration du ruissellement.....	12
1.1.3.3 Sensibilité des sols à l'incision et force de cisaillement.....	12
1.1.4 <i>Problèmes posés par l'érosion des sols dans le bassin loessique du nord de l'Europe.....</i>	12
1.1.4.1 Les dégâts causés sur le territoire agricole.....	13
1.1.4.1 Les dégâts en dehors du territoire agricole.....	15
1.2 L'effet de l'activité agricole sur le processus d'érosion.....	16
1.2.1 <i>L'effet du choix des productions.....</i>	16
1.2.2 <i>L'effet de la structure du parcellaire et des éléments linéaires.....</i>	18
1.2.3 <i>Les effets des systèmes de culture.....</i>	19
1.2.3.1 Effet des systèmes de culture sur les états de surface en interaction avec le climat.....	20
1.2.3.2 Effet des différents états de surface sur le ruissellement et l'érosion.....	21
1.2.3.3 Effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture.....	22
1.3 Différentes possibilités de maîtrise du ruissellement érosif.....	23
1.3.1 <i>Aménager le territoire.....</i>	23
1.3.1.1 Protéger les zones vulnérables.....	23
1.3.1.2 Limiter l'apparition des coulées boueuses.....	24
1.3.2 <i>Réduire le ruissellement et l'érosion sur le territoire agricole par une modification des pratiques agricoles.....</i>	26
1.3.2.1 Modifier l'organisation spatiale des cultures.....	26
1.3.2.2 Modifier les techniques culturales.....	27

1.3.3	<i>Réduction de l'érosion par ruissellement concentré : nécessaire couplage entre aménagements et pratiques agricoles</i>	31
2.	Maîtrise du ruissellement érosif au sein de l'exploitation agricole	32
2.1	Les contraintes posées par une modification des pratiques au sein de l'exploitation agricole	32
2.1.1	<i>Des contraintes liées à une modification de l'occupation du sol</i>	33
2.1.2	<i>Des contraintes liées à une modification des techniques culturales</i>	34
2.2	Bilan des études traitant d'une modification des pratiques agricoles	35
2.2.1	<i>Echelle parcellaire</i>	35
2.2.2	<i>Echelle de l'exploitation agricole</i>	36
2.2.3	<i>Echelle du bassin versant</i>	36
2.2.4	<i>Echelle régionale</i>	37
3.	Problématique : quelles marges de manœuvre au sein des exploitations agricoles pour réduire le ruissellement à l'échelle d'un bassin versant ?	38
3.1	Synthèse	38
3.2	Démarche d'analyse	40

Chapitre 2 : Couplage de deux échelles d'étude, le bassin versant et l'exploitation agricole : méthodologie

	42	
1.	Démarche d'analyse	43
1.1	Diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif	43
1.1.1	<i>Diagnostic à l'échelle parcellaire</i>	43
1.1.2	<i>Choix d'un modèle de simulation pour le diagnostic à l'échelle bassin versant</i>	44
1.1.2.1	Caractéristiques attendues	45
1.1.2.2	Modèles disponibles	47
1.1.2.3	Assouplissement des critères de sélection et choix d'un modèle	48
1.1.3	<i>Fonctionnement du modèle STREAM (Cerdan et al., 2002c)</i>	50
1.1.3.1	Les paramètres d'entrée du modèle	50
1.1.3.2	Module infiltration	51
1.1.3.3	Module écoulement	52
1.1.4	<i>Conséquences du choix du modèle STREAM pour le diagnostic</i>	54
1.2	Analyse des marges de manœuvre techniques pour modifier les systèmes de culture	55
1.2.1	<i>Les systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole</i>	56
1.2.2	<i>Localisation spatiale des cultures</i>	57
1.2.3	<i>Les itinéraires techniques</i>	58
1.3	Modification des systèmes de culture en vue d'une réduction du ruissellement érosif	60
1.3.1	<i>Objectif des modifications des systèmes de culture</i>	60
1.3.2	<i>Principe de conception des modifications des systèmes de culture</i>	61
1.4	Synthèse de la démarche d'analyse	62
2.	Le dispositif d'étude	63
2.1	Choix du cas d'étude	63
2.1.1	<i>Le Pays de Caux en Haute-Normandie</i>	63
2.1.1.1	De nombreux problèmes	63
2.1.1.2	Un milieu naturel favorable au ruissellement érosif	64
2.1.1.3	Une évolution du paysage favorisant le ruissellement érosif	66
2.1.1.4	Des données disponibles issues d'études antérieures	67
2.1.2	<i>Le bassin versant de Bourville</i>	68
2.2	Le dispositif d'enquête	72

2.2.1	<i>Objectifs et structuration des enquêtes en exploitations agricoles</i>	72
2.2.2	<i>Enquêtes du groupe A</i>	72
2.2.3	<i>Enquête du groupe B</i>	74
2.3	Présentation des exploitations du bassin versant de Bourville.....	75
	Conclusion du chapitre.....	77

Chapitre 3 : Diagnostic de l'effet des systèmes de culture sur le ruissellement érosif..... 78

1.	Les états de surface : résultat d'une interaction, à un instant donné, entre climat et système de culture	79
1.1	Etude de la variabilité des états de surface à un instant donné et de leur évolution au cours du temps.....	79
1.1.1	<i>Variabilité des états de surface due aux techniques culturales</i>	79
1.1.2	<i>Variabilité des états de surface due au climat</i>	80
1.1.2.1	Données disponibles pour l'analyse.....	81
1.1.2.2	Principes d'analyse.....	83
1.1.2.3	Variabilité au cours de la saison culturale 2 (15/11 – 15/02).....	84
1.1.2.4	Variabilité au cours de la saison culturale 4 (01/05 – 15/07).....	86
1.1.3	<i>Définition du domaine de validité du diagnostic</i>	87
1.2	Choix des paramètres d'entrée du modèle STREAM	88
1.2.1	<i>L'infiltration potentielle</i>	89
1.2.1.1	Valeurs d'infiltration potentielle résultant de l'analyse des états de surface	89
1.2.1.2	Valeurs d'infiltration potentielle résultant de l'expertise locale et d'expérimentations	91
1.2.1.3	Cas des prairies et autre couverts végétaux herbacés permanents	93
1.2.1.4	Limite d'une classification des valeurs d'infiltration potentielle en cinq classes	93
1.2.2	<i>Le sens d'écoulement</i>	95
1.2.3	<i>Le réseau d'écoulement</i>	96
1.2.3.1	Objectif et dispositif d'analyse.....	96
1.2.3.2	Comparaison des réseaux d'écoulement obtenus par simulation.....	97
2.	Effet des états de surface sur le ruissellement érosif : interaction avec le type d'événement pluvieux	102
2.1	Base de donnée des événements pluvieux.....	102
2.1.1	<i>Calcul des événements pluvieux</i>	102
2.1.2	<i>Caractéristiques des événements pluvieux</i>	103
2.2	Effet des états de surface sur le ruissellement à l'échelle parcellaire	105
2.3	Effet des états de surface sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant.....	108
2.3.1	<i>Répartition spatiale des états de surface et type d'événement pluvieux</i>	109
2.3.2	<i>Evolution du ruissellement au cours de l'année culturale</i>	112
2.3.3	<i>Concentration du ruissellement à l'intérieur du bassin versant</i>	112
	Conclusion du chapitre.....	114

Chapitre 4 : Analyse de la constitution des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole 116

1.	Localisation des cultures au sein du territoire de l'exploitation agricole.....	117
1.1	Principe d'analyse	117
1.2	Formalisation des règles.....	117
1.2.1	<i>Cultures présentes dans les assolements</i>	118
1.2.2	<i>Analyse des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation</i>	119

1.2.2.1	Zone cultivable	120
1.2.2.2	Règles de succession des cultures	122
1.2.2.3	Regroupement de cultures sur des parcelles voisines	125
1.2.2.4	Conclusion : de faibles contraintes et des exigences agronomiques contrastées	125
1.3	Validation des règles de la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation	126
1.3.1	<i>Première étape : comparaison aux assolements de 1996 à 2001</i>	126
1.3.2	<i>Deuxième étape : simulation de l'assolement 2001</i>	128
2.	Organisation du travail	130
2.1	Principe d'analyse	130
2.2	Formalisation des règles	131
2.2.1	<i>Paramètres de l'organisation du travail</i>	131
2.2.1.1	Main d'œuvre et matériel	131
2.2.1.2	Calendrier des travaux et concurrences	132
2.2.1.3	Vitesse de réalisation des chantiers	136
2.2.2	<i>Modélisation et simulation de l'organisation du travail</i>	136
2.3	Validation des règles d'organisation du travail	139
2.3.1	<i>Choix de la méthode de validation</i>	139
2.3.2	<i>Résultats de la validation</i>	140
2.3.3	<i>Conclusion : une modélisation de l'organisation du travail « pessimiste »</i> ..	142
3.	Synthèse et discussion : quelles marges de manœuvre ?	142
3.1	Modification de la localisation spatiale des cultures	143
3.1.1	<i>Conditions d'existence de marges de manœuvre pour modifier la localisation spatiale des cultures</i>	143
3.1.1.1	Niveau de contraintes des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation	143
3.1.1.2	Contraintes découlant de choix de l'agriculteur	144
3.1.1.3	Proposition d'une classification	144
3.1.2	<i>Différentes possibilités d'augmenter les marges de manœuvre</i>	146
3.2	Modification des itinéraires techniques	147
3.2.1	<i>Evaluation des marges de manœuvre sur la base de paramètres simples</i> ..	147
3.2.2	<i>Evaluation des marges de manœuvre à partir d'une simulation</i>	149
3.3	Conclusion : des marges de manœuvre contrastées	151
	Conclusion du chapitre	153

Chapitre 5 : Réduire le ruissellement érosif en modifiant les systèmes de culture à l'échelle du bassin versant

1.	Principes de modifications des systèmes de culture	156
1.1	Modification de la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation	156
1.2	Modification des itinéraires techniques en interculture	159
1.2.1	<i>Techniques culturales testées</i>	159
1.2.1.1	Choix des techniques culturales	159
1.2.1.2	Vitesse de réalisation des chantiers	160
1.2.2	<i>Possibilités d'insertion des techniques dans le calendrier d'organisation du travail</i>	161
1.3	Elaboration du dispositif de simulations	161
1.3.1	<i>Réduction du ruissellement pour les configurations 2002 en hiver</i>	162
1.3.2	<i>Ruissellement des configurations 2002 au printemps et des configurations 2003 en hiver</i>	163
1.3.3	<i>Bilan des différentes configurations du bassin versant simulées</i>	163

2. Recherche des différentes configurations du bassin versant	165
2.1 Les assolements du bassin versant	165
2.1.1 Possibilités de modifier l'occupation du sol	165
2.1.2 Les différents assolements du bassin versant	165
2.1.3 Conséquences sur les parcelles extérieures au bassin versant de Bourville..	168
2.2 Les itinéraires techniques en interculture	170
2.2.1 Bilan des surfaces d'interculture	170
2.2.2 Insertion dans le calendrier d'organisation du travail	171
3. Effet des modifications des systèmes de culture sur le ruissellement	173
3.1 Effet de la modification des systèmes de culture pour l'année 2002 en hiver ...	173
3.1.1 Simulations avec l'événement pluvieux intense A	173
3.1.2 Simulations avec l'événement pluvieux peu intense B	176
3.2 Conséquences des modifications des configurations 2002	177
3.2.1 Simulations avec l'événement pluvieux intense A	177
3.2.2 Simulations avec l'événement pluvieux peu intense B	179
3.2.3 Effet des différentes organisations des cultures de printemps	179
3.3 Comparaison avec les valeurs du diagnostic	181
4. Synthèse et discussion : quelle efficacité des modifications des systèmes de culture pour réduire le ruissellement ?	182
4.1 Une réduction réelle du ruissellement	182
4.2 Augmenter les possibilités de réorganisation spatiale des cultures en décalant les successions culturales sur des parcelles voisines	184
4.3 Interaction événement pluvieux – niveau d'infiltration – organisation spatiale	185
Conclusion du chapitre	188
Chapitre 6 : Synthèse et perspectives	190
1. Efficacité environnementale de la méthodologie proposée	191
1.1 Liens entre bassins versants résultant de la structure des territoires d'exploitation.	191
1.2 Conséquences des événements pluvieux orageux	193
1.2.1 Orage dégradant les états de surface des semis des cultures de printemps	193
1.2.2 Événement pluvieux orageux	194
1.3 D'autres processus écologiques dont la maîtrise est antagoniste à celle du ruissellement	195
1.4 Conclusion	197
2. Caractère opérationnel de la méthodologie	198
2.1 Identification des marges de manœuvre	199
2.1.1 Règles de constitution des systèmes de culture	199
2.1.1.1 Localisation spatiale des cultures	199
2.1.1.2 Organisation du travail	199
2.1.1.3 Conclusion : une reconstitution des systèmes de culture facilitée mais nécessitant des enquêtes complémentaires	200
2.1.2 Des règles de constitution des systèmes de culture aux marges de manœuvre	200
2.2 Recherche de configurations de bassin versant limitant le ruissellement en combinant les marges de manœuvre individuelles	201
2.2.1 Des modifications des systèmes de culture ne permettant pas toujours de réduire le ruissellement érosif	201
2.2.2 Une mise en œuvre ne nécessitant pas toujours une coordination entre agriculteurs	203

2.3	Automatisation de la méthodologie par des outils informatiques	204
2.3.1	<i>Identification des marges de manœuvre</i>	204
2.3.2	<i>Recherche de configurations de bassin versant</i>	205
3.	Une méthodologie applicable à la maîtrise d'autres processus écologiques par les pratiques agricoles	206
3.1	Le problème environnemental posé	206
3.2	Des possibilités de maîtrise par les pratiques agricoles nécessitant d'en étudier la mise en œuvre au sein des exploitations agricoles.....	207
3.2.1	<i>Mesures nécessitant une analyse des successions culturales et de leur organisation spatiale</i>	207
3.2.2	<i>Mesures nécessitant une étude de l'organisation du travail</i>	207
3.3	Apport envisageable de la méthodologie développée pour le ruissellement érosif dans le cadre des recherches actuelles sur la maîtrise des flux de gènes	208
	Conclusion du chapitre	209
	CONCLUSION	211

Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques – Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie
Alexandre Joannon, 2004

Certains processus écologiques mettent en jeu des transferts latéraux entre parcelles voisines. La maîtrise, par les pratiques agricoles, des problèmes environnementaux qui en découlent impose de coordonner les systèmes de culture dans l'espace, à l'échelle de l'entité spatiale pertinente pour l'analyse du processus en cause. C'est le cas du ruissellement érosif dans les plaines loessiques du nord de l'Europe, dont l'échelle d'étude est le bassin versant. L'objectif de ce travail de thèse est de bâtir une méthodologie opérationnelle permettant de concevoir des modifications des systèmes de culture, au sein des exploitations, dans le but de réduire le ruissellement. Ces modifications doivent être compatibles avec les facteurs de production de l'exploitation et organisées spatialement au sein d'un bassin versant. Pour cela, à partir du cas d'étude du bassin versant de Bourville (Pays de Caux), nous : (i) analysons les déterminants des systèmes de culture au sein de l'exploitation agricole, afin d'en déduire les marges de manœuvre des agriculteurs pour les modifier ; notre analyse est centrée sur l'allocation des facteurs de production – terre et temps de travail – aux différentes cultures ; (ii) cherchons à réduire le ruissellement à l'échelle du bassin versant en combinant les modifications des systèmes de culture possibles dans chaque exploitation. L'efficacité des modifications est testée avec le modèle STREAM. Ces deux analyses requièrent que nous déterminions, au préalable, les modifications des systèmes de culture les plus efficaces pour réduire le ruissellement, dans les conditions locales du Pays de Caux. Dans cette étude, nous montrons que la combinaison, à l'échelle du bassin versant, des modifications des systèmes de culture au sein de chaque exploitation permet de réduire significativement le ruissellement en hiver, à l'exutoire du bassin. La méthode élaborée permet d'identifier les marges de manœuvre des agriculteurs pour modifier les systèmes de culture – organisation spatiale des cultures et itinéraires techniques – à partir d'une reconstitution des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation et d'organisation du travail. Nous proposons aussi une classification des situations qui permet, pour un bassin versant donné, de déterminer les types de modification des systèmes de culture efficaces pour réduire le ruissellement, et les zones nécessitant une coordination entre agriculteurs.

Mots clés : bassin versant, exploitation agricole, marge de manœuvre, ruissellement, système de culture

Some ecological processes implicate lateral transfers between neighbouring plots. The control of the resulting environmental problems by agricultural practices imposes to coordinate cropping systems spatially at the level of the relevant spatial entity to analyse the involved process. This is the case of runoff in the loam belt of northern Europe whose study level is the catchment. The objective of this PhD study is to elaborate an operational methodology which enables the conception of cropping system modifications within farms in order to reduce runoff. These modifications must be, on one hand, compatible with the production factors of the farm and, on the other hand, spatially organised within the catchment. To do so, from the case study of the Bourville catchment (Pays de Caux, France), we: (i) analyse the determining factors of cropping systems within farms in order to identify farmers' room for manoeuvre to modify them; our analysis focuses on the allocation of production factors – land and labour – applied to the different crops; (ii) seek to reduce runoff at the catchment level by combining the possible cropping system modifications in each farm. The efficiency of the modifications is tested with the STREAM model. Both of these analyses need a preliminary identification of the most efficient cropping system modifications in order to limit runoff in local conditions of Pays de Caux. In this study, we show that the combination at the catchment level of farmers' practice modifications in each farm can reduce significantly winter runoff, at the catchment outlet. The elaborated method enables to identify farmers' room for manoeuvre to modify cropping systems – the spatial organisation and the management sequences of crops – on the basis of the reconstitution of the crops localisation rules within the farms territory and of the rules of work planning. We also propose a classification of situations which enables to determine for one catchment the efficient types of cropping systems modifications to reduce runoff, and the areas which require farmers coordination.

Key words: catchment, farm, room for manoeuvre, runoff, cropping system