



Université Paris X
Nanterre



Centre International de Recherche
Agronomique et Développement.

Mémoire du Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de
l'Energie (EDDEE) – Université Paris X Nanterre.



Modélisation d'accompagnement et gestion des problèmes de ruissellement érosif en Haute Normandie

Javier Echeverria

Sous l'encadrement de: **Véronique Souchère, INRA.**
François Bousquet, CIRAD.

Paris. Octobre 2006.

REMERCIEMENTS

Je voudrais profiter de cette page pour montrer ma reconnaissance envers certaines personnes que j'ai eu la chance de croiser pendant ces six mois et grâce à qui j'ai pu finir ce travail.

Premièrement, je voudrais remercier ma femme et mon amie, Sylviane, pour avoir compris l'importance que ce projet avait pour mon évolution personnelle et pour avoir accepté d'être séparés pendant les trois mois de mon séjour à Montpellier. Merci pour ton aide inconditionnelle, pour avoir partagé le défi et pour t'intéresser à mon travail.

Un grand merci à mes deux encadrants, Véronique Souchère et François Bousquet, pour avoir cru en moi, pour avoir pris le risque de travailler avec un étudiant étranger venu d'un domaine académique un peu différent. Ma réussite passait par la confiance, celle qui m'a donnée la possibilité de montrer mes capacités et mes envies.

Merci Véronique, pour m'avoir appris beaucoup de choses sur la problématique, pour avoir pris en considération mon avis à chaque fois, pour avoir participé activement dans la réalisation de ce projet et surtout pour ton travail héroïque dans la lecture et la correction de mon français. Je te promets que le prochain texte que tu liras de moi aura un meilleur niveau.

Merci François, pour tes remarques sur la façon d'aborder le problème et la manière de réaliser le rapport, pour ta façon de transmettre tes connaissances, toujours empreintes d'un grand respect envers mon avis. J'ai appris beaucoup de toi.

Merci M. Jacques Weber, pour les concepts et les expériences transmises pendant les cours du Master, ceux qui ont renforcé ma posture scientifique et humaine.

Merci Michel Etienne, pour ton implication et pour nous avoir guidés tout au long de ce projet, notamment dans la réalisation de la démarche de construction collective du modèle. Tes conseils nous ont permis de mieux comprendre les objectifs de la démarche et notre posture dans celle-là.

Je ne voudrais pas laisser passer l'opportunité de manifester aussi ma reconnaissance à M. Bruno Bonté, avec qui j'ai eu la chance de partager mon séjour au CIRAD. Je voudrais le remercier pour sa disponibilité et son aide à tout moment même au détriment de son temps, et celui de MIMOSA aussi. Sans Bruno, je pense que je ne serais pas là en train de profiter de ma réussite.

Un remerciement spécial à Laurent, Delphine et Philippe pour m'avoir offert la possibilité de vivre avec eux pendant mon séjour à Montpellier et m'avoir permis de me sentir chez moi. Merci beaucoup mes amis.

Et finalement, j'adresse un merci collectif à tout le reste des personnes qui ont participé de manière directe ou indirecte dans cette réussite qui me permet de terminer une étape importante et de projeter un avenir.

A bientôt à tous.

Résumé

Depuis une trentaine d'années les régions limoneuses de Haute-Normandie, France, connaissent une recrudescence des phénomènes érosifs. Ces phénomènes se traduisent le plus souvent par des ravines au sein des parcelles agricoles, des inondations boueuses en aval des bassins versants et par la pollution des nappes en profondeur. Cette recrudescence est en grande partie liée à l'évolution de l'agriculture. Trois caractéristiques de cette évolution ont un effet manifeste: le retournement des prairies, la modification des systèmes de culture et l'agrandissement des parcelles, même quand il n'est pas accompagné de la suppression de haies ou de talus. Cette évolution fait de l'érosion des sols cultivés une question d'actualité.

Pour lutter contre ces phénomènes, une des possibilités consiste à limiter le ruissellement produit sur les parcelles agricoles par une réorganisation spatiale des cultures, par une réintroduction de prairies au sein des bassins versants et donc des exploitations agricoles, par la modification des pratiques agricoles et/ou l'implantation de petits aménagements hydrauliques. Au stade actuel des connaissances et des besoins, il a paru intéressant d'analyser dans cette étude, avec l'aide des systèmes multi-agents (SMA) et des jeux de rôles (JdR), l'application de l'approche de la modélisation d'accompagnement pour une gestion concertée des problèmes du ruissellement érosif.

Resumen

Desde hace aproximadamente treinta años las regiones limonosas de la Alta Normandia, Francia han visto aumentado los fenómenos erosivos. Estos fenómenos se revelan principalmente como surcos dentro de las parcelas agrícolas, como inundaciones de barro en la descarga de las cuencas o como contaminación de las napas freáticas profundas. Este recrudecimiento de la situación es en gran parte relacionado a la evolución que ha tenido la agricultura. Tres características de esta evolución tienen un efecto concreto: la eliminación de praderas, la modificación de sistemas de cultivos y el aumento del tamaño de las parcelas, aun cuando éste no esté acompañado de la eliminación de barreras o de taludes de protección. Esta evolución hace de la erosión de los suelos cultivables una cuestión de actualidad.

Para luchar contra este fenómeno, una de las posibilidades consiste en restringir la escorrentía producida en las parcelas agrícolas mediante la reintroducción de praderas dentro de la cuenca y por ende dentro de las propias parcelas, la modificación de las prácticas agrícolas y/o la implantación de pequeñas obras hidráulicas. De acuerdo al estado actual del conocimiento y de las necesidades, a parecido interesante analizar en este estudio, con la ayuda de juegos de roles (JdR) y de la simulación de sistemas multi-agentes (SMA), la aplicación del enfoque de la modelización de acompañamiento por una gestión concertada de los problemas de la escorrentía erosiva.

Abstract

For thirty years, the loamy soils in Upper Normandy, France, undergo an increase of erosion phenomena. These phenomena are characterized by gullies formation in farm's plots, muddy floods downstream the catchment and by water table pollution. This recent increase is linked to some extent to farm management evolution. Three characteristics of this evolution have an obvious effect: grassland reversal, agricultural practices modification and farm's plots increment, even when it is not accompanied with the suppression of rows and ramps. Erosion of cultivated soils becomes a burning issue given the recent agricultural practices changes.

In order to deal with these phenomena, one of the possibilities is to limit runoff on agricultural plots by a different crops spatial organization, by a reintroduction of grasslands within the catchments and therefore within the individual farms, by the modification of agricultural practices and/or the setting-up of small hydraulic installations. At the current stage of our knowledge and needs, it appears interesting to analyse in this study, with the help of Multi-agent systems (MAS) and Role-playing games, the application of the companion modelling approach for a concerted management of erosive runoff problems.

TABLE DES MATIERES

Introduction

Chapitre 1: Ruissellement Erosif: La problématique en Haute Normandie.	1-1
1.1 Le Processus de Ruissellement en Haute Normandie	1-1
1.2 Les Formes de l'Erosion Hydrique	1-2
1.2.1 L'érosion diffuse	1-3
1.2.2 L'érosion linéaire	1-4
1.3 Les Facteurs de l'Erosion	1-5
1.3.1 Facteurs climatiques	1-5
1.3.2 Facteurs géomorphologiques	1-6
1.3.3 Facteurs anthropiques	1-7
1.4 Les Moyens de Lutte	1-8
1.5 L'Analyse Biophysique et les Outils Utilisés	1-11
1.5.1 L'analyse de perte du sol USLE	1-11
1.5.2 Développement des modèles à base physique et ses limites	1-12
1.5.3 STREAM: Modèle pour l'analyse de l'érosion	1-13
Chapitre 2: Le ruissellement érosif comme un problème de concertation	2-1
2.1 L'Approche de la Théorie Economique	2-2
2.1.1 Les instruments économiques	2-2
2.1.2 Les limites de l'approche économique	2-3
2.2 L'Approche de la Gestion Patrimoniale	2-4
2.3 Quelle Place pour la Concertation ?	2-5
Chapitre 3: La modélisation d'accompagnement et ses méthodes. Vers une gestion concertée du ruissellement	3-1
3.1 Modélisation d'Accompagnement	3-1
3.1.1 Principes et objectifs de la modélisation d'accompagnement	3-2
3.1.2 Position de la démarche d'accompagnement	3-2
3.1.3 Position du chercheur	3-3
3.2 Les Méthodes de la Démarche d'Accompagnement	3-3
3.2.1 Les systèmes multi agents (SMA)	3-3
3.2.2 Le jeu de rôles (JdR)	3-5
3.2.3 Le couplage jeu de rôles (JdR) système multi agent SMA	3-6
Chapitre 4: Définition Conceptuelle du Modèle	4-1
4.1 Réunion préliminaire de sensibilisation	4-1
4.2 Convocation des acteurs	4-1
4.3 Déroulement des réunions	4-2
4.4 Résultats de la Co-construction	4-5
4.5 Incorporation dans le modèle conceptuel des éléments identifiés	4-8
4.5.1 A propos des acteurs	4-8
4.5.2 A propos de l'espace	4-11
Chapitre 5: L'implémentation du Modèle RuissellErosif	5-1
5.1 L'Outil : CORMAS	5-1
5.2 Les Etapes de Construction d'un Modèle avec CORMAS	5-2
5.3 Structure Statique du Modèle RuissellErosif	5-2
5.3.1 L'environnement et l'échelle spatiale de la zone d'étude	5-2

5.3.2 Définition des agents du modèle	5-10
5.3.3 Diagramme statique du modèle.....	5-11
5.4 Structure Dynamique du Modèle	5-13
5.4.1 Les échelles temporelles d'analyse	5-13
5.4.2 La coexistence des échelles temporelles.....	5-14
5.4.3 Initialisation du modèle.	5-14
5.4.4 Les séquences du modèle.....	5-15
5.4.5 Les scénarios.....	5-18
5.5 Visualisation de l'Information : Les Points de Vue.	5-18
Chapitre 6: Analyse des Résultats.....	6-1
6.1 Le Scénario Simulé.....	6-1
6.1.1 Sur le parcellaire, les parcelles et les agriculteurs	6-1
6.1.2 Les précédents culturels.....	6-2
6.1.3 La décision agricole	6-2
6.1.4 Les événements pluvieux	6-3
6.2 Les Résultats	6-4
6.2.1 Résultats sur le niveau de ruissellement.....	6-4
6.2.2 Résultats sur la trésorerie des agents	6-8
6.2.3 Perspectives de l'analyse.....	6-10
Chapitre 7: Vérification et Validation du Modèle.	7-1
7.1 Vérification Biophysique.....	7-1
7.2 Validation Sociale.....	7-4
7.2.1 Première phase: Réunion avec groupe de la construction collective du modèle	7-5
7.2.2 Deuxième phase: Jeu de Rôle	7-6
7.2.3 La Pre-Conception du Jeu	7-6

Perspectives et Conclusions

Bibliographie

Annexes

Introduction

Depuis une trentaine d'années les régions limoneuses de Haute-Normandie connaissent une recrudescence des phénomènes érosifs. En Seine Maritime et plus particulièrement dans le Pays de Caux, le ruissellement boueux est à l'origine de graves problèmes touchant de larges pans de la société: agriculteurs (ravines, recouvrement de cultures...), communes (routes coupées), privés (caves inondées), gestionnaires de l'eau (turbidité liée à des communications entre la surface et la nappe exploitée pour l'eau potable). Après une phase de traitement curatif du problème (aménagements hydrauliques) orchestrée et financée par le Conseil Général au niveau des collectivités locales, il est apparu nécessaire d'associer à ce volet curatif un volet préventif visant à réduire le ruissellement boueux en provenance du territoire agricole. En effet, différentes études ont montré que les pratiques agricoles ont une forte influence sur la structure hydrographique des bassins versants cultivés, en fixant la nature et la date des travaux agricoles (effet des systèmes de culture sur l'évolution au cours du temps de l'aptitude à ruisseler), en effectuant un travail du sol orienté (pouvant guider le ruissellement diffus), et en imprimant à la surface du sol un réseau de traces de roue.

Cependant, du fait que l'eau qui circule sur un versant ignore les limites de parcelles et d'exploitation, les actions à entreprendre tels que la réorganisation spatiale des cultures, la réintroduction de prairies au sein des bassins versants et donc des exploitations agricoles, la modification des pratiques agricoles et/ou l'implantation de petits aménagements hydrauliques, nécessitent une coopération entre agriculteurs sur des espaces voisins reliés entre eux par des fonctionnements hydrauliques. Or, le contexte économique conduit les agriculteurs à avoir des logiques productives et individuelles. Productives, elles conduisent à ne prendre en considération les dégâts que dans la mesure où ils affectent la production. Par exemple, il est difficile de faire adopter des pratiques qui limitent le ruissellement dans les cas fréquents, où ce dernier n'engendre pas d'érosion sur l'exploitation même. Individuelles, elles se traduisent par une gestion de l'espace, limitée au territoire de l'exploitation, et donc sans tenir compte de la continuité des phénomènes physiques en jeu. Imaginer un aménagement collectif de l'espace est donc un véritable défi d'autant plus que ce management environnemental, commandé, en quelque sorte, par les processus naturels à maîtriser, ne laisse pas aux acteurs la liberté du choix avec qui coopérer. Par ailleurs, en fonction du type d'action imaginé, le territoire sur lequel doivent s'envisager ces coopérations n'est pas le même. Le bassin versant constitue une délimitation spatiale pertinente pour concevoir des coordinations entre voisins sur des affectations de cultures aux parcelles et des techniques. Il peut l'être aussi pour des aménagements du parcellaire de faible ampleur. Mais au-delà, c'est au niveau de la commune que, par un remembrement hydraulique, on peut modifier plus en profondeur le parcellaire. Il importe d'étudier, en fonctions des situations, les possibilités de gestion collective du ruissellement érosif au sein des bassins versants.

Au stade actuel des connaissances et des besoins, il est apparu intéressant d'appliquer une démarche participative de modélisation d'accompagnement pour tenter avec l'aide des outils qu'elle propose (systèmes multi-agents et jeu de rôles) de tester les possibilités d'une mise en place concertées de ces actions pour limiter le ruissellement à différentes échelles d'investigation (les exploitations agricoles et le bassin versant). On espère en développant la communication entre les acteurs permettre une meilleure compréhension globale de la situation et initier un apprentissage mutuel, adaptatif et progressif qui devraient favoriser à terme la mise en place d'un processus de décision collective. L'étude, objet de mon stage qui s'est déroulé sur les 6 derniers mois au sein de l'UMR SADAPT de l'INRA de Grignon et de l'équipe GREEN du CIRAD à Montpellier, a donc consisté à initier les premières étapes de la mise en place d'une telle démarche. Elle s'inscrit dans le cadre d'un projet plus global intitulé « La modélisation d'accompagnement: une pratique de recherche en appui au développement durable » proposé en réponse au programme fédérateur « Agriculture et Développement Durable » (ADD) financé par l'ANR.

Ce mémoire qui présente les différentes étapes de la démarche que j'ai pu conduire au cours de mon stage est structuré en 7 chapitres. Le Chapitre N°1 est consacré à une analyse de la problématique du ruissellement érosif dans la région support de l'étude, c'est-à-dire, la Haute-Normandie. Y sont décrits entre autres les mécanismes et les facteurs explicatifs de l'apparition de ces problèmes ainsi que quelques solutions pour les maîtriser. Une réflexion sur les modèles biophysiques pour prédire le ruissellement érosif a également été intégrée ainsi qu'une présentation du modèle STREAM développé par l'INRA Science du sol d'Orléans et l'UMR SADAPT de Grignon puisque ce modèle a été utilisé ultérieurement.

Dans le Chapitre N°2, nous présentons une analyse théorique sur la manière dont a été effectuée la gestion jusqu'à présent, (l'approche curative versus préventive), puis nous analysons la situation du point de vu de l'approche de la théorie économique et de la gestion patrimoniale pour voir *in fine* comment le ruissellement peut être compris comme un problème de concertation entre différentes parties prenantes.

Le Chapitre N°3 présente de manière générale l'approche participative utilisée par la suite c'est-à-dire la Modélisation d'Accompagnement et les différents outils qu'elle propose d'utiliser, à savoir, les Système Multi-Agent et les Jeu de Rôles. A la fin de ce chapitre, nous discutons des possibilités offertes par ces outils pour réaliser un couplage enrichissant l'interprétation de problèmes environnementaux.

Le Chapitre N°4 est consacré à la présentation de la démarche de co-construction qui a été initiée avec les acteurs impliqués dans le cadre de deux ateliers de discussion. Ces ateliers ont permis de définir les bases d'un modèle informatique « RuissellErosif » implémenté dans la plateforme CORMAS et qui est présenté en détail dans le Chapitre N°5.

Dans le Chapitre N°6 nous avons réalisé une simulation théorique avec le modèle « RuissellErosif » pour mieux comprendre les potentialités visant une future application réelle.

Le Chapitre N°7 présente le processus de vérification et de validation du modèle élaboré. Dans une première partie, nous présentons la vérification biophysique du modèle destinée à tester le couplage réalisé entre le modèle Multi Agent RuissellErosif et le modèle biophysique STREAM. Puis, nous présentons la validation sociale du modèle, lié à la représentation faite et les dynamiques simulées.

Finalement, la dernière partie est consacré à la présentation des conclusions de mon travail et de quelques perspectives telles que les aspects perfectibles du modèle, les possibilités d'application et aussi au niveau plus général les possibilités de gestion concertée de ruissellement.

Chapitre 1: Ruissellement Erosif : La Problématique en Haute Normandie.

1.1 Le Processus de Ruissellement en Haute Normandie

Le ruissellement érosif dans la région de Haute Normandie a été étudié largement par les scientifiques de différentes disciplines (Agronomie, Science du sol, etc.) qui ont mis en évidence la nature complexe du problème de l'érosion hydrique comme étant la conjugaison des aspects physiques, biologiques et anthropiques.

Les expériences de terrain ou de laboratoire réalisées pour expliquer la dynamique physique montrent l'existence d'une relation étroite entre la texture des sols et la capacité d'infiltration des sols. Ainsi, sous l'action des pluies les sols limoneux de Haute Normandie se dégradent passant progressivement d'un état fragmentaire, relativement poreux et meuble, à un état plus continu et plus compact, appelé *croûte de battance*. Cet état dégradé de surface est caractérisé par une capacité d'infiltration réduite (voir Photos N°1.1) ce qui crée les conditions propices pour la génération du ruissellement.

Photos N°1.1
Les différents états de sols



Etat initial fragmentaire
poreux et meuble
après un travail du sol



Croûte structurale
(certains fragments
restent bien distincts)



**Croûte sédimentaire
de battance**
(lissage de la surface)

Infiltration élevée 30 - 60 mm/h	⇒	Infiltration moyenne 2 - 6 mm/h	⇒	Infiltration très faible 1 mm/h
--	---	---	---	---

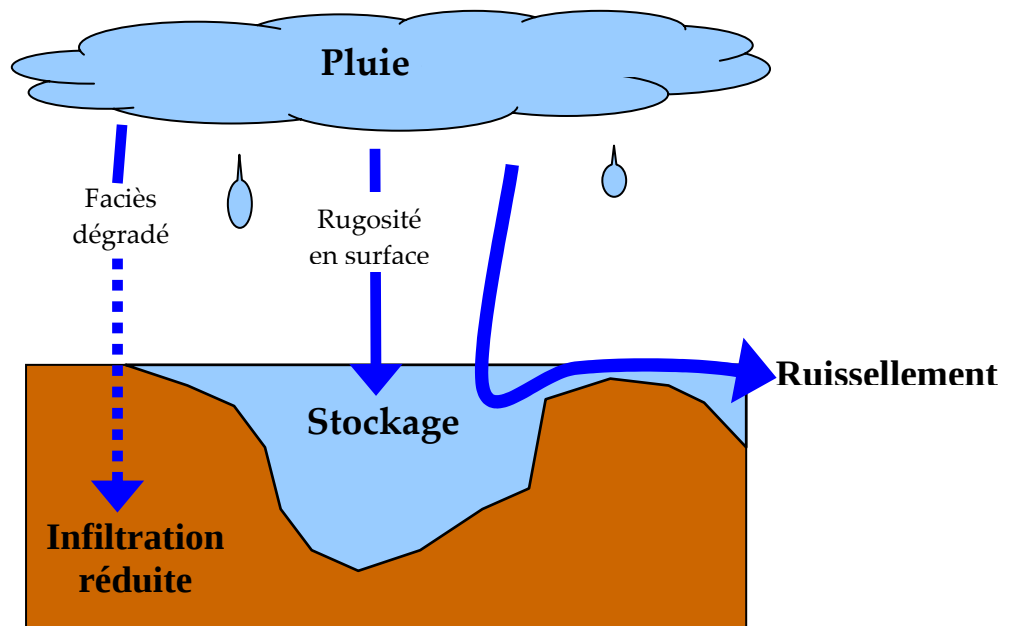
Le phénomène de ruissellement, dit hortonien, résulte de l'interaction entre les propriétés hydrauliques de la surface et les caractéristiques de l'événement pluvieux. Ainsi, les écoulements sont générés à partir le moment où la quantité d'eau reçue par les sols dépasse le seuil défini par sa capacité d'infiltration. Cette limite dépend principalement de deux caractéristiques des sols : *l'infiltrabilité du sol* et *la détention superficielle*. *L'infiltrabilité* s'agit d'une caractéristique physique du terrain qui peut être mesurée à partir d'expériences de laboratoire et qui varie autant dans l'espace en fonction de l'état de surface du sol que dans le temps en réduisant sa valeur au cours d'un événement pluvieux.

L'autre caractéristique importante dans la définition du ruissellement est *la détention superficielle* du sol, souvent évaluée à partir de la rugosité de surface et le faciès qui se dégradent avec la pluie. Elle représente la capacité de stockage de l'excès d'eau dans les microdépressions (Photo N°1.2) à la surface du sol. Plus elle est élevée, plus le ruissellement sera retardé et réduit (Figure N°1.1).

Photo N°1.2
Micro dépressions du sol



Figure N°1.1
Stockage de l'Eau d'accord à la rugosité du sol



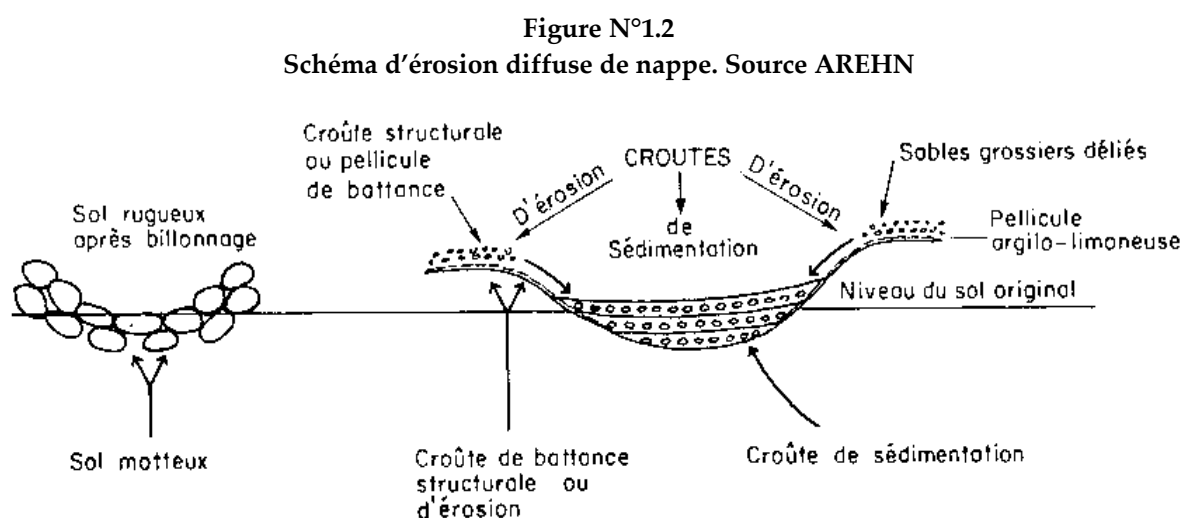
1.2 Les Formes de l'Erosion Hydrique

Le phénomène de l'érosion hydrique est le résultat de l'action combinée de plusieurs processus dont le détachement, le transport et le dépôt de particules, sous l'action de la pluie et du ruissellement. Ainsi, des rôles respectifs de la pluie et du ruissellement dépendent les formes de l'érosion.

1.2.1 L'érosion diffuse.

Ce phénomène est associé à l'impact des gouttes de pluie sur le sol provoquant un détachement des particules fines et l'éclatement des mottes par réhumectation, qui fondent et colmatent la surface du sol. Cette situation crée ce qu'on appelle une *croûte de battance* réduisant la capacité d'absorption du sol¹ et provoquant des ruissellements diffus qui s'écoulent comme une nappe.

Selon les études basées sur des expériences empiriques, la relation entre ruissellement et charge solide transportée caractérisant l'érosion, est en fait, dépendante du type de sol et des conditions hydriques initiales. Ainsi, à ruissellement égal, on peut obtenir des concentrations en sédiments très variables, avec de valeurs de ratio entre 1 et 12 (Le Bissonnais et al. 1995).



Normalement, l'érosion diffuse est peu visible et difficile à évaluer mais il est importante à considérer compte tenu de sa relation avec les captages d'eau potable, souvent turbides et pollués, même peu de temps après une séquence pluvieuse, par fertilisants et produits phytosanitaires épandus à la surface des parcelles cultivées (Lecomte V., 1999).

Photos N°1.3
Accumulation d'eau suite à de ruissellement diffus. Source (AREHN et Léchene, 2002)



¹ Selon des études, la capacité d'infiltration avec une croûte de battance peut descendre en dessous de 2 mm/h en période humide (voir Photos N°1.1).

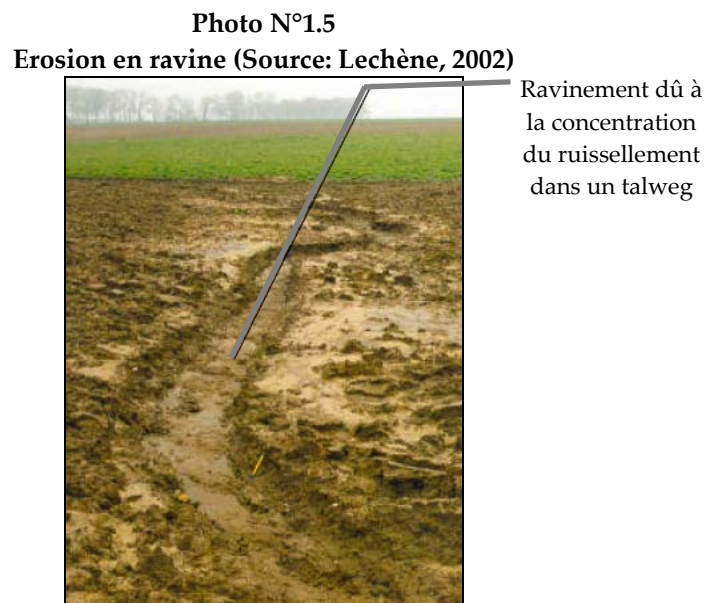
1.2.2 L'érosion linéaire.

Lorsque le ruissellement diffus se concentre, il acquiert une énergie cinétique. Lorsque la force de cisaillement du ruissellement est supérieure à la résistance du sol, le ruissellement peut mobiliser toutes les particules ou agrégats quelle que soit leur taille et entraîner la formation d'incisions. Ce type d'érosion appelée érosion linéaire, peut être divisée en deux groupes:

- Sur les versants, des rigoles parallèles peuvent se développer sur les fortes pentes en suivant les motifs agraires (lignes de semis et traces de roues). Cette forme d'érosion est appelée *érosion de versant*. Elle apparaît toujours après des épisodes pluvieux de forte intensité, c'est à dire plutôt au printemps en Haute Normandie. La surface de collecte du ruissellement nécessaire à l'incision est généralement réduite et située juste en amont des rigoles.



- D'autres incisions prennent naissance dans des dépressions topographiques plus ou moins marquées comme les fonds de vallon. Elles sont généralement uniques et la zone de collecte est nettement distincte du lieu d'apparition de la ravine. Cette forme d'érosion appelée érosion par ruissellement concentrée ou «*érosion de talweg*» peut se produire même dans des régions à faibles pentes et après des événements pluvieux qui ne sont pas forcément violent (Auzet et al., 1993). De telles ravines peuvent alors apparaître aussi bien en hiver qu'au printemps.



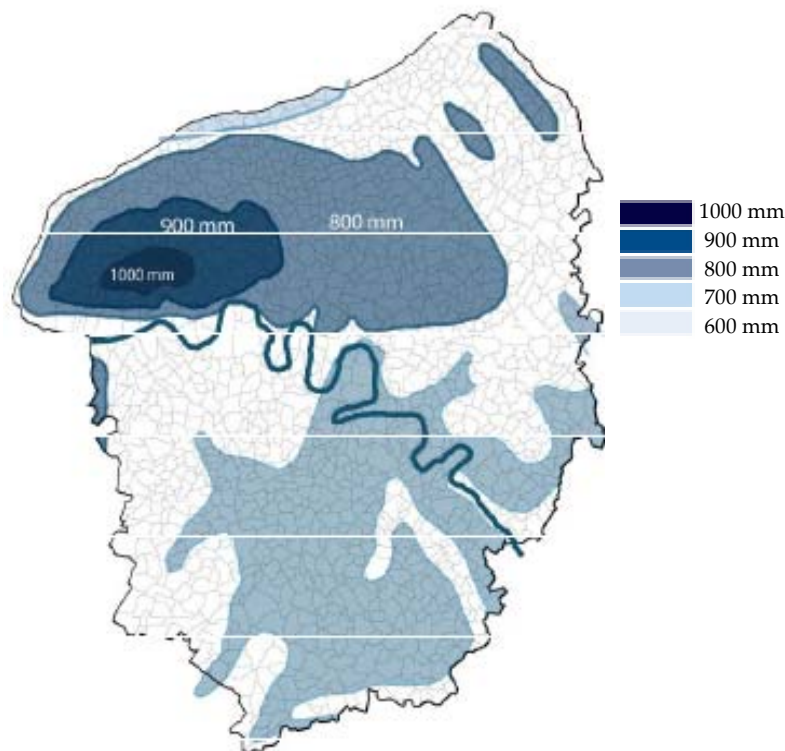
1.3 Les Facteurs de l'Erosion

1.3.1 Facteurs climatiques

Une des variables déterminantes du ruissellement érosif est le climat, et notamment, les caractéristiques des précipitations. Selon les données statistiques existantes, il existe d'importantes différences dans la distribution des pluies dans la région de Haute Normandie, autant au niveau spatial que temporel.

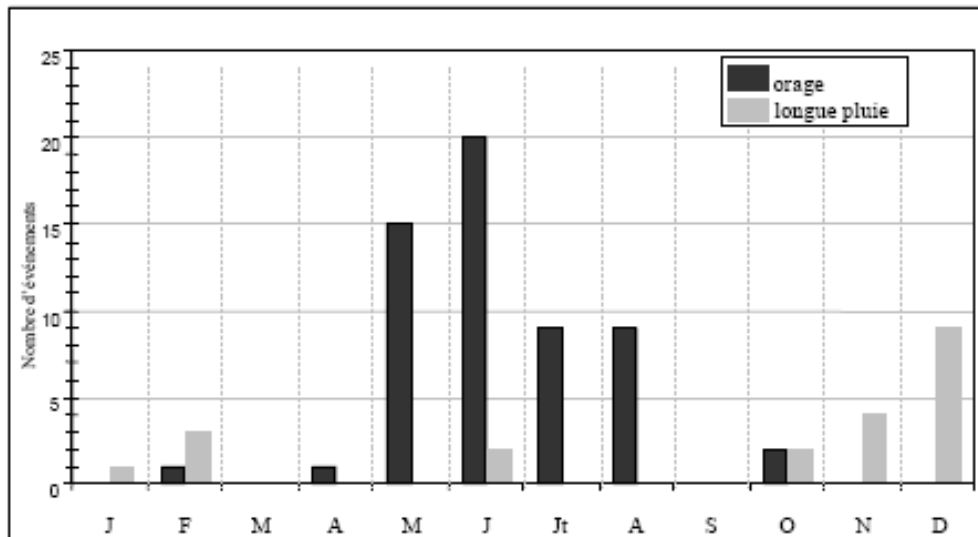
- Variabilité Spatiale: Dans les différents endroits de la région, il existe une différence considérable en termes de quantité cumulée d'eau tombée dans l'année. Les quantités les plus importantes tombent au Nord Ouest de la région. Avec la Figure N°1.3 ci-après, nous obtenons une définition des endroits potentiellement plus exposés aux phénomènes pluvieux, en sachant qu'un classement du risque climatique en termes de ruissellement devrait également inclure d'autres aspects comme par exemple, la distribution des événements orageux.

Figure N°1.3
Distribution spatiale des précipitations en Haute Normandie. Source DIREN



- Variabilité Temporelle : La distribution mensuelle de pluies constitue un aspect important qui nous permet de comprendre la variation des risques d'exposition aux événements pluvieux. Selon les données présentées ci-après dans la Figure N°1.4, nous constatons qu'ils existent de différences importantes en termes d'intensité et de durée des précipitations selon l'époque de l'année. Au printemps, notamment au mois de Mai et Juin, les événements pluvieux s'avèrent plutôt orageux, c'est-à-dire, de grande intensité et courte durée, tandis qu'entre la fin de la saison d'automne et le début de la saison d'hiver, c'est à dire, du mois de Octobre à Décembre, les événements ont une intensité moindre et une plus grande durée.

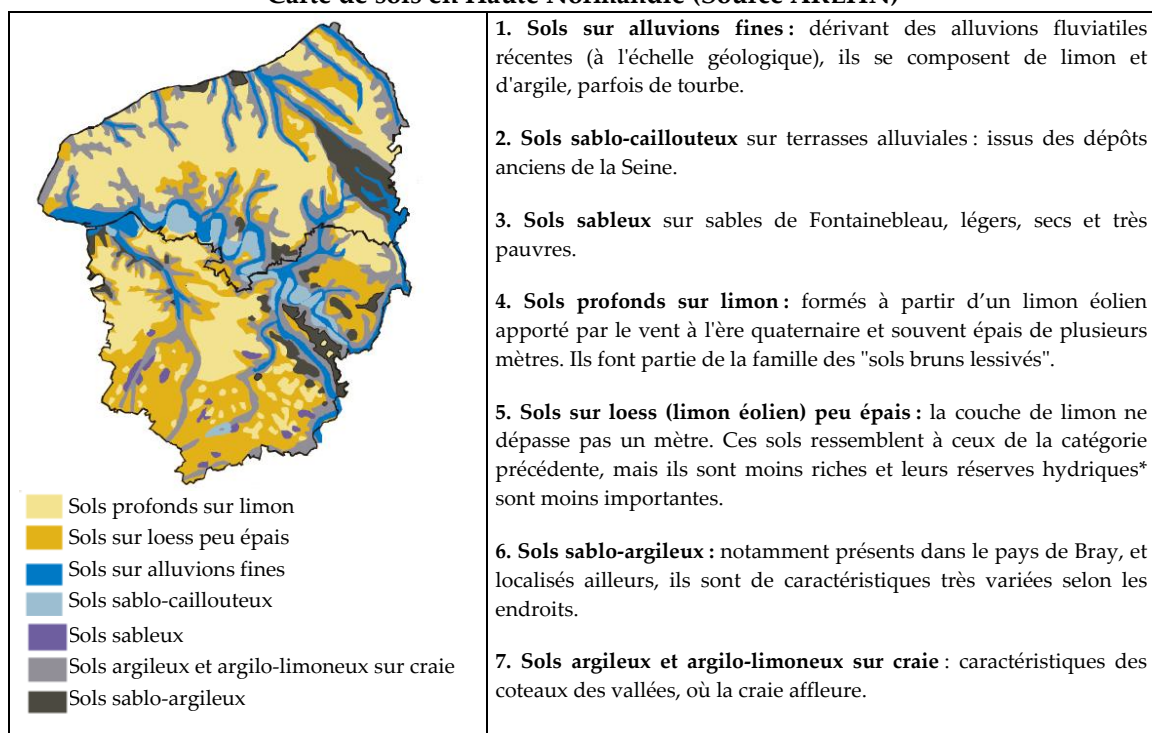
Figure N°1.4
Distribution temporelle de précipitations selon le type
au cours de la période 1960-2000 (Source: Gaillard D., 2004).



1.3.2 Facteurs géomorphologiques

Les sols résultent de l'action du climat et des activités biologiques et humaines sur les roches superficielles. Actifs sur le plan biologique, ils ont non seulement un rôle de support, de réservoir et d'alimentation en eau et en éléments minéraux pour les plantes mais aussi un rôle épurateur primordial pour les composés polluants et un rôle régulateur de crues à travers de sa capacité d'infiltration. Les sols les plus représentés en Haute-Normandie sont les sols profonds sur limon, très fertiles et donc très propices à l'agriculture. Cependant, nous avons vu que ces sols se dégradent aussi très vite sous l'action du climat.

Figure N°1.5
Carte de sols en Haute Normandie (Source AREHN)



1.3.3 Facteurs anthropiques

Il existe une relation importante entre les problèmes d'érosion hydrique et l'activité humaine réalisée au sein d'un bassin versant, telle que nous pouvons l'apercevoir dans certains domaines, notamment celui de l'agriculture et l'urbanisme. En ce qui concerne l'urbanisme, les activités de construction et d'aménagement d'infrastructures urbaines (maisons, routes etc.), induisent normalement une augmentation des surfaces imperméabilisées réduisant la capacité d'infiltration des sols du bassin versant et donc une augmentation des écoulements.

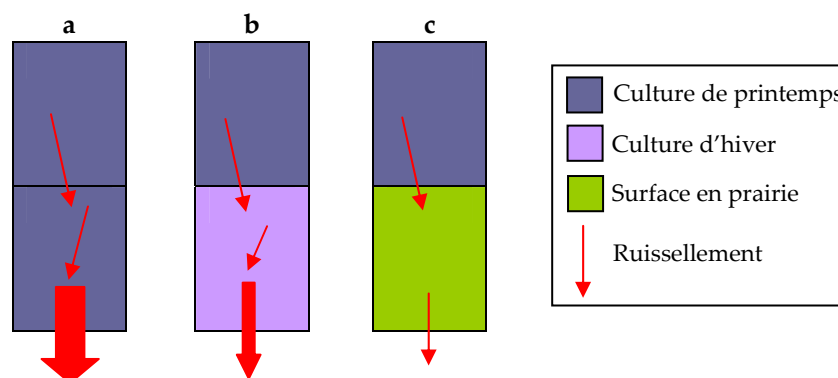
L'autre domaine lié de manière étroite au problème de ruissellement érosif et considéré le plus important dans le contexte de cette étude, est celui de l'agriculture. Au cours des trente dernières années, la forte évolution de ce secteur économique a eu une répercussion directe sur la dynamique d'érosion de sols. Il existe deux aspects concrets pour apprécier ses effets: le retournement des prairies et l'agrandissement des parcelles.

Le retournement des prairies est la conséquence d'une spécialisation des systèmes de production vers les cultures de vente à partir d'un type de «polyculture élevage» et d'une évolution des systèmes fourragers, dans lesquels le maïs prend partiellement la place de l'herbe (Ouvry J-F., 1992). Dans le deuxième cas, l'agrandissement des parcelles est la réponse naturelle des agriculteurs qui cherchent à accroître leur productivité et donc à améliorer leurs résultats économiques.

Ces types de décisions agricoles² prises par les agriculteurs, ainsi comme beaucoup d'autres, ont des répercussions directes sur le ruissellement, se manifestant autant dans la quantité d'eau ruisselée par les parcelles que dans la manière comme les écoulements sont conduits vers l'exutoire du bassin versant.

La quantité d'eau ruisselée est directement associée aux types de culture semés, aux itinéraires techniques mis en place et aussi à la distribution spatiale des cultures (Gaillard D., 2004). La disposition des cultures dans l'espace du bassin versant provoque une interdépendance en termes du ruissellement amenant des résultats différents. Ainsi, par exemple, quand deux cultures d'une capacité d'infiltration réduite (par exemple, deux cultures de printemps) sont semées sur des parcelles contiguës (cas a, Figure N°1.6), les résultats de ruissellement seront largement supérieurs à ceux liés à une disposition où il existe en aval une surface d'une capacité d'infiltration importante (comme les prairies, par exemple) qui retient les écoulements provoqués en amont (cas c, Figure N°1.6).

Figure N°1.6
Schématisation de combinaison de surfaces et cumul de ruissellement.



² Dans le contexte de cette étude le concept «décision agricole» est compris comme l'ensemble de choix réalisées par un agriculteur au sein de son exploitation agricole, incluant les choix des cultures, la distribution spatiale de ces cultures, la date de semis, le type de matériaux, etc.

Concernant l'orientation des écoulements, les décisions liées au travail du sol, prises conjoncturellement peuvent aussi laisser des traces visibles sur les parcelles telles que les dérayures (sillon apparent après le dernier passage de la charrue) et les sillons formés par certaines opérations culturales (butage des pommes de terre, récolte des betteraves). Ces traces peuvent orienter les écoulements dans un sens qui diffère de celui de la pente naturelle.

Photos N°1.6

Influence du travail de sol dans la direction des écoulements (Source: Gaillard D., 2004)



Analyser la relation entre le travail de sol et la direction d'écoulement permet de connaître un autre aspect de l'impact de la décision des agriculteurs sur le ruissellement, puisque les modifications de la direction des écoulements dues au sens de travail du sol vont entraîner des variations dans la localisation des points de concentration du ruissellement au sein du talweg.

Souchère et al. (1998) ont montré à partir d'un suivi effectué sur un échantillon de parcelles cultivées dans le Pays de Caux, Haute Normandie que la direction du ruissellement pouvait être déterminée sur les parcelles à faible rugosité par une fonction discriminante (D) qui tient compte de l'inclinaison de la pente (SLOPE) et de l'angle entre l'orientation de la pente et le sens du travail du sol (ANGLE) :

$$D = - 0,6646 \text{ ANGLE} - 0,6669 \text{ SLOPE} \quad (1)$$

Le résultat de l'application de la fonction discriminante permet ensuite de déterminer si l'écoulement suit la direction de la plus grande pente ou celui du travail de sol.

Les résultats de l'étude montrent que, pour la majorité des bassins versants (20 sur 23), le ruissellement produit circule sur plus de la moitié de la surface de ces bassins en suivant la direction imposée par le travail du sol, ce qui vérifie l'hypothèse de l'importance du sens du travail sur les directions d'écoulement et la modification des zones d'accumulation.

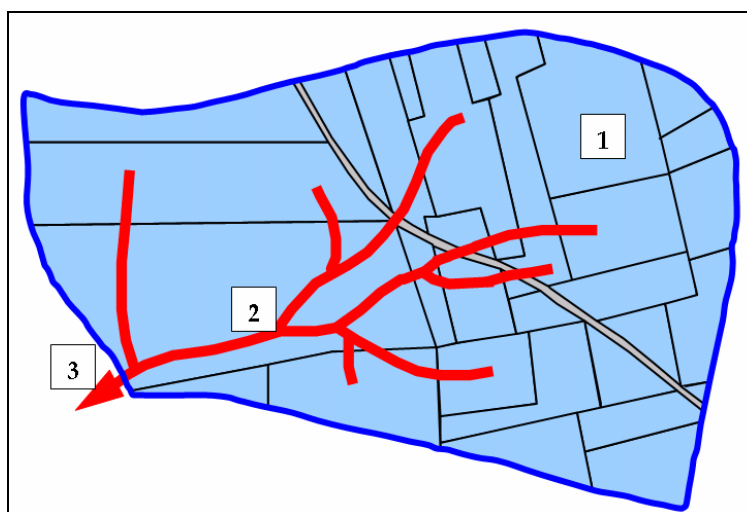
1.4 Les Moyens de Lutte

Une fois connus la dynamique et les différents facteurs de l'érosion hydrique, il résulte intéressant de connaître les différents types de solutions possibles à mettre en place directement au niveau de la parcelle, l'unité spatiale plus important au niveau de la décision agricole.

D'après les expériences et la connaissance scientifique, il existe différentes solutions possibles pour lutter contre les problèmes de ruissellement érosif qui diffèrent selon l'endroit du bassin versant où l'on se situe. Nous pouvons distinguer trois zones dans un bassin versant (Figure N°1.7) selon lesquelles nous définirons des groupes de solutions:

Figure N°1.7

Type de zones dans un bassin versant par rapport au problème de ruissellement.



1) *La Zone d'impluvium* correspond au secteur où les terrains reçoivent la pluie et génèrent des écoulements qui sont conduits vers l'aval. Elle est associée normalement à une érosion de type diffuse.

Dans ce cas, les solutions définies sont destinées à limiter la production du ruissellement dans les zones émettrices en adaptant les pratiques agricoles pour favoriser l'infiltration. L'expérience montre par exemple que l'état de la surface du sol est déterminant donc il faut éviter la terre fine et chercher à obtenir une surface plus « rugueuse » pour retarder l'apparition du ruissellement. Il est aussi important ne pas laisser le sol découvert et exposé directement à la pluie. Pour ce motif il est fortement recommandé l'incorporation des cultures intermédiaires. Cette interculture sera semée et détruite entre deux campagnes culturales seulement dans un but écologique car la production ne sera pas vendue. Pour encourager les agriculteurs dans la mise en œuvre de cette solution le Conseil Général et certains syndicats de bassins versants subventionnent les coûts de production, en distribuant de manière gratuite les semences.

Photos N°1.7

Exemple de pratiques possible au cours de l'interculture (Source: V. Souchère)



Travailler le sol sans
générer de terre fine



Couvrir le sol par
des résidus de récolte



Couvrir le sol par une
plante d'interculture semée

2) **La Zone de concentration**, correspond au secteur de réception de différents écoulements. Elle est associée à l'érosion linéaire.

Complémentairement aux concepts présentés pour la zone précédente étant applicables pour cette zone aussi, les solutions à privilégier pour les parcelles localisées dans ce type de zones consistent à limiter la concentration du ruissellement, à freiner ou à intercepter les excès d'eau dans les zones de départ de terre.

Les solutions consiste à valoriser la topographie naturelle en installant des dispositifs tels que des prairies temporairement inondables ou des mares (Photos N°1.8) afin de laminer les crues et de diminuer les longueurs de ruissellement. En augmentant les temps de circulation, ces aménagements permettent aussi à une partie de l'eau de s'infiltrer.

Photos N°1.8

Aménagement de rétention (Source : V. Souchère / INRA et C. Douyer / DRAF)



Préserver ou créer de nouvelles prairies inondables



Préserver ou créer de nouvelles mares tampons

Lorsque la concentration des flux est inévitable et que les surfaces drainées augmentent, le principe est d'augmenter la résistance à l'arrachement dans les zones potentielles de départ de terre. Concrètement, plusieurs solutions sont envisageables: limiter le travail du sol, réaliser des bandes tassées, réaliser des bandes enherbées (Photos N°1.9).

Photos N°1.9

Aménagement de rétention (Source: V. Souchère / INRA - DRAF Haute Normandie)



Bande enherbée :

Bande de quelques mètres de large implanté en herbe



Bande tassée :

Bande de terre tassée par un ou deux allers retours en tracteur et où il y a souvent Un double semis.

3) **La Zone de décharge** est l'endroit où est défini l'exutoire du bassin versant et où se concentrent tous les écoulements du bassin versant. Elle est associée à la position du village en aval.

Pour se protéger des inondations boueuses, les collectivités locales privilégient la construction d'infrastructures à l'interface entre le territoire agricole et les zones urbanisées telles que des bassins de rétention. D'autant plus qu'elles bénéficient de subventions pour les aider à les mettre en place. Cependant, de par leur localisation très en aval, ces aménagements n'ont aucun effet sur l'érosion elle-même et devant l'importance des frais occasionnés non seulement par leur implantation mais aussi par leur entretien, il est évident que ce type de protection en aval n'est pas suffisant. Il faut développer l'aménagement de l'espace agricole à l'origine des émissions d'eau et de terre.

1.5 L'Analyse Biophysique et les Outils Utilisés

Comme nous l'avons vu, les phénomènes d'érosion sont le résultat d'interactions complexes et variables dans le temps et l'espace. Depuis longtemps, les sciences liées à l'agronomie ont réalisé des études théoriques et des validations empiriques afin de pouvoir modéliser l'érosion dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagements pour la conservation des sols.

1.5.1 L'analyse de perte du sol USLE

Il existe, dans la littérature, un grand nombre de modèles dont la plupart sont de type empirique. Ils sont basés sur l'identification des relations statistiques significatives entre les pertes en terre et certains facteurs jouant un rôle important dans l'apparition des symptômes érosifs. Ainsi, après une série d'études réalisées par le Département Américain de l'Agriculture (USDA) afin d'estimer les paramètres qui favorisent l'érosion ainsi des les techniques susceptibles de la freiner, Wischmeier et Smith (1978) ont élaboré un modèle mathématique de l'érosion appelé « Equation Universelle de Perte de Sol » (USLE). Cette équation décrit la perte moyenne annuelle en sol sous la forme d'un produit dont les termes représentent les principaux facteurs de l'érosion:

$$A = RKLSCP \quad (2)$$

avec,

- A = Perte en terre estimée.
- R = Facteur pluie et ruissellement.
- K = Facteur d'érodibilité du sol.
- LS = Facteur intensité - longueur de pente.
- C = Facteur couvert végétal.
- P = Facteur pratique culturale.

Pour déterminer l'étendue des valeurs de chaque paramètre, il a fallu prendre une unité comme référence spatiale. Cette unité a été définie comme une parcelle avec un sol travaillé dans le sens de la plus grande pente d'une valeur uniforme de 9 %. Les observations majoritairement produites sous pluie naturelle couvrent une large gamme de situations (type de sol, pratique culturale et climat) représentative de l'est des Etats-Unis, où elle a été créée.

Après son définition originale, l'équation a connu plusieurs variantes. Par exemple, le modèle «Revised USLE» qui retient la structure de base de l'USLE mais qui modifie certains paramètres. Ainsi, le facteur *R* a été élargi à de nouveaux domaines, le terme représentant l'érodibilité des sols (*K*) a été défini comme dépendant de la saison et surtout le facteur *LS* a été modifié pour pouvoir rendre compte d'une topographie variable.

Cependant, cette équation et ses dérivés 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. Les études plus récentes sur les processus biophysiques de l'érosion hydrique ont notamment mis en avant la variabilité spatiale et temporelle des paramètres d'érodibilité. Pour pouvoir prendre en compte cette variabilité, les recherches en modélisation se sont tournées vers une approche plus déterministe basée sur la description des processus physiques au travers de modèles mathématiques (Cerdan O., 2001)

1.5.2 Développement des modèles à base physique et ses limites

Sur la base de l'équation USLE mais aussi sur les études d'Horton (1938) et Ellison (1947), qui ont fourni les principaux fondements de la modélisation biophysique, se sont élaborés des modèles pour prédire l'érosion basée sur des représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux.

Les processus pris en compte sont le détachement par les gouttes de pluie et/ou par le ruissellement, le transport par les gouttes de pluie, le transport par le ruissellement et le dépôt par le ruissellement. Ces processus sont modélisés de manière spatialisée et dynamique aussi bien dans les zones d'érosion linéaire ou d'érosion diffuse. La plupart des équations est dérivée des résultats de la modélisation des écoulements, à partir des équations de Saint-Venant ou de leur approximation, combinant les équations de conservation de la masse (eau ou sédiment) et de la quantité de mouvement.

L'analyse et l'application des modèles mathématiques ont permis de prendre connaissance des limites à leur utilisation. Nous pouvons signaler entre autres :

- L'incorporation de relations empiriques dans les modèles mathématiques implique la définition d'une procédure de calibrage rigoureuse pour atteindre avec précision l'objectif de prédire les résultats de l'érosion.
- Les caractéristiques des données, quant à leur variabilité spatiale et temporelle, imposent un control strict sur leurs valeurs, ce qui est autant plus difficile d'assurer avec la difficulté dans l'estimation des certains paramètres, notamment l'érodibilité du sol (K).
- et, finalement, la demande abondante des données incorporées révèle une faiblesse en termes de la facilité d'implémentation.

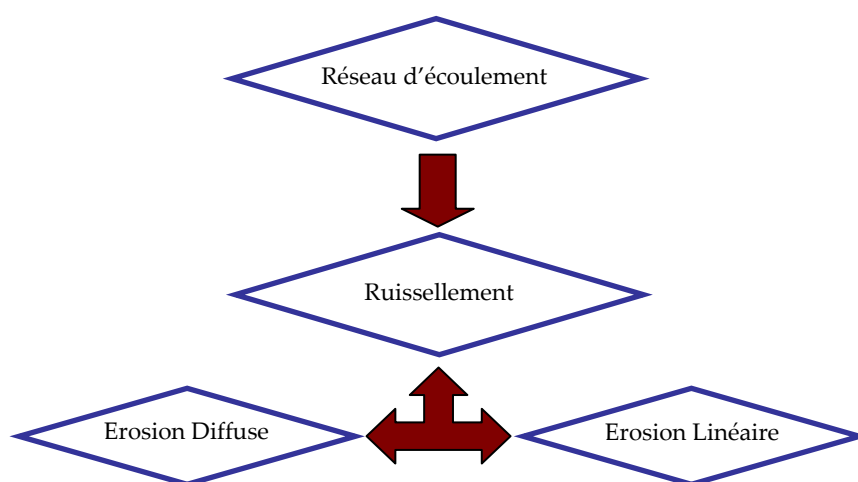
Avec la définition de ces limitations, les modèles basés sur les processus physiques permettent d'améliorer nos connaissances des mécanismes de l'érosion mais il n'est cependant peut être pas réaliste de vouloir les utiliser comme outil de prédiction de l'érosion.

Dans ce contexte, il y a un besoin de modèles simples, permettant de représenter les processus dominants au niveau du bassin versant, à partir des paramètres intégrateurs. De plus, les modèles doivent permettre de rendre compte du cheminement de l'eau dans le bassin versant, en ne considérant pas que la topographie comme facteur d'orientation des écoulements mais aussi le sens de travail du sol et les éléments linéaires. Ces modèles doivent également permettre de prendre en compte correctement l'effet des pratiques agricoles sur le ruissellement érosif. C'est le cas du modèle STREAM ce qui explique pourquoi nous avons décidé de nous servir de ce modèle comme base d'implémentation des processus biophysiques dans notre travail

1.5.3 STREAM: Modèle pour l'analyse de l'érosion

L'objectif recherché à travers le développement de STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management) par les équipes INRA de Science du Sol d'Orléans et de l'UMR SAD APT de Grignon, est l'élaboration d'un modèle de prédiction opérationnel en recherchant le compromis optimal entre la prise en compte des processus élémentaires de l'érosion, le nombre de variables nécessaires et leur disponibilité. Le modèle dont les échelles spatiales et temporelles sont le bassin versant et l'événement pluvieux est structuré en quatre modules interdépendants (Figure N°1.8) décrivant respectivement, le réseau d'écoulement (Souchère et al., 1998), le ruissellement (Cerdan et al., 2002c), l'érosion diffuse (Cerdan et al., 2002b) et l'érosion linéaire (Souchère et al., 2003). La démarche suivie pour l'élaboration de ces modules est identique: l'identification et la paramétrisation des facteurs dominants à l'échelle locale sur la base de résultats expérimentaux, puis, à l'échelle du bassin versant, en prenant en compte les paramètres propres à ce niveau d'investigation. Une telle démarche a été possible grâce à l'existence d'une importante base de données de références regroupant des expérimentations au laboratoire et au champ depuis l'échelle du $\frac{1}{4}$ de m² jusqu'à l'échelle du bassin versant (Cerdan et al., 2002a)

Figure N°1.8
Les Modules de STREAM



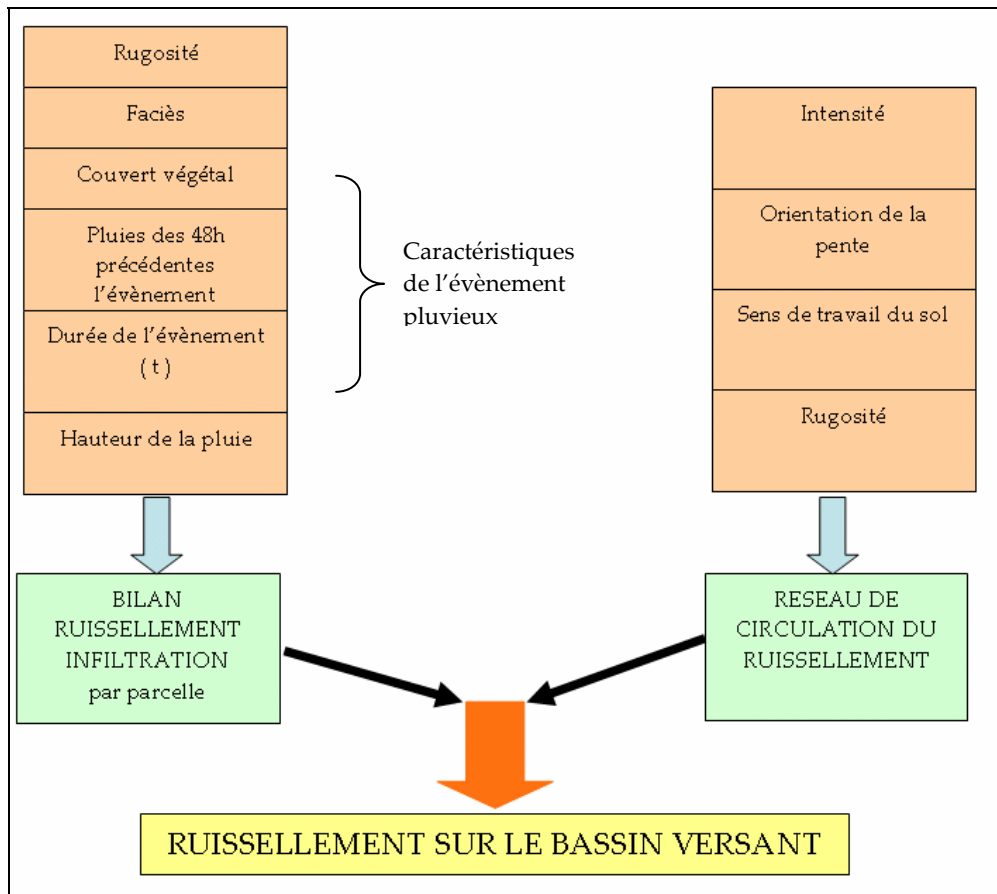
Ce modèle permet de quantifier le ruissellement et les pertes en terre, tout en localisant les zones où ces phénomènes se produisent. Il peut également être utilisé pour simuler les effets liés à la modification de la localisation des cultures, des façons culturales, de la disposition des parcelles, du sens de travail du sol ou pour tester l'impact d'aménagements destinés à lutter contre l'érosion (bandes enherbées, mares tampons, etc.). Il est intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG), sur l'interface ArcGis qui permet de générer et de visualiser directement des cartes avec les résultats de la simulation élaborée.

1.5.3.1 Paramètres généraux du modèle

Chaque paramètre utilisé par le modèle a une influence directe sur les résultats obtenus, en fonction des procédures définies par STREAM. Les paramètres correspondent aux couches d'informations qui seront couplés pour l'estimation des attributs du bassin versant analysé, comme par exemple, au cours

des deux modules servant au calcul du réseau d'écoulement et du bilan infiltration ruissellement (Figure N°1.9).

Figure N°1.9
Paramètres de STREAM déterminant le ruissellement.



a) Rugosité

Ce paramètre est calculé selon la dénivellation (D) entre les dépressions et les cols ; ce qui permet d'évaluer la rétention superficielle. Plusieurs états (Ri) ont été distingués par le modèle :

- R0: il représente le champ d'ensemencement fortement croûté, un champ de récolte avec un fort compactage ($D < 1$ cm)
- R1: il représente le champ d'ensemencement avec semis, modérément croûté ($1 < D < 2$ cm)
- R2: il représente le champ récemment ensemencé avec une surface motteuse ($2 < D < 5$ cm)
- R3: il représente le champ déchaumé et récemment ensemencé avec une surface très motteuse ($5 < D < 15$ cm)
- R4: il représente le champ labouré ($D > 15$ cm)

b) Faciès

Le faciès, dans STREAM, correspond à une notation morphologique qui va traduire le stade de développement des croûtes de battance. La croûte de battance se forme lors de ruissellement sur sol non saturé, et se caractérise par le passage d'un état initial de sol à une croûte structurale puis sédimentaire. Cela induit une capacité d'infiltration du sol qui est fortement réduite. Cette croûte de battance va favoriser le ruissellement en surface.

Pour l'application STREAM, l'INRA a créé un classement des états du sol (Tableau N°1.1) qui permet de définir le niveau de dégradation du sol pour le calcul du volume de ruissellement et du taux d'érosion.

Tableau N°1.1
Descriptif des faciès utilisé dans le modèle STREAM. (Source: INRA)

Classe de faciès	Description
F0	Etat fragmentaire initial : Chaque particule de terre visible en surface appartient à un agglomérat plus ou moins important mais parfaitement délimité et séparé de ses voisins.
F1	Faciès fragmentaire altéré: certains fragments sont bien distincts et leur forme est très peu modifiée par rapport à F0, alors que d'autres sont soudés, leurs contours restant reconnaissable.
F12	Faciès continu sans dispersion: les fragments sont intégrés dans des zones d'aspect continu, leurs contours ne sont plus reconnaissables mais il n'y a pas de signes de dispersion.
F2	Faciès continu avec croûte sédimentaire: on distingue alors des signes de départ de terre, et les micros dépressions sont recouvertes d'un manteau très lisse, plus ou moins épais.

c) Couvert végétal

Il définit le taux de couvert végétal dépendant de la culture en place et la proportion de résidus à la surface du sol capables de protéger le sol des dégradations dues à l'impact des gouttes de pluies. Dans le modèle, il existe trois catégories de couvert végétal exprimées en pourcentage :

- C1: < 20%.
- C2: de 21% à 60%.
- C3: > 61%.

d) Caractéristiques de l'évènement pluvieux

Les caractéristiques de la pluie utilisée sont essentielles pour la modélisation. En effet, le choix de travailler à l'échelle de l'évènement pluvieux, notamment à travers le cumul de pluie et sa durée effective, implique la nécessité de caractériser l'état hydrique du sol au début de l'évènement. Selon le modèle, la manière de refléter cet aspect est à travers la pluie précédente cumulée sur les 48 heures antérieure au début de l'évènement pluvieux. Pour sa part, la durée effective de la pluie est calculée à partir de la durée réelle de l'évènement pluvieux en supprimant les périodes où la pluie s'interrompt momentanément.

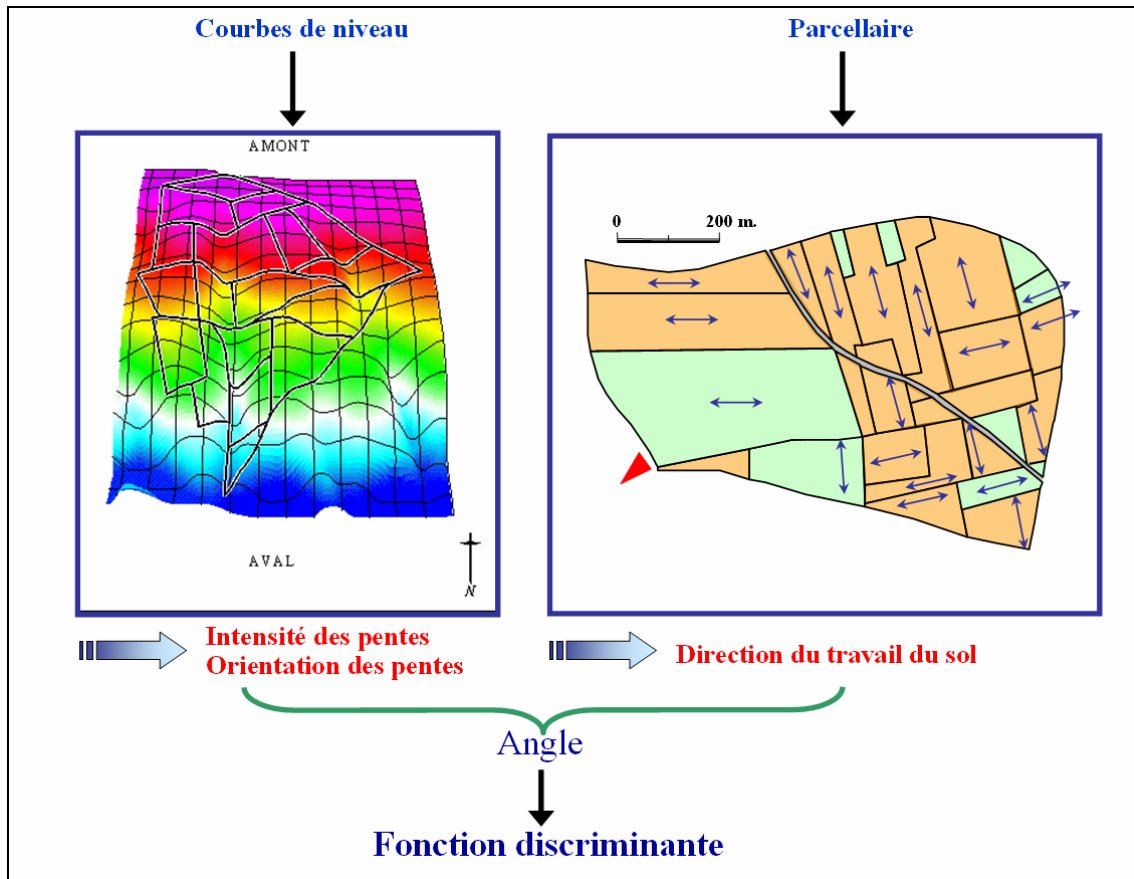
L'antécédent pluvieux et la capacité d'infiltration du sol vont déterminer un paramètre important dans le calcul du bilan d'infiltration, la pluie d'imbibition, qui correspond à la hauteur d'eau infiltrée avant d'atteindre le régime d'infiltration stationnaire.

1.5.3.2 Détermination du Réseau d'Ecoulement

Tel que cela a été décrit précédemment dans la description des facteurs qui définissent le ruissellement dans les terrains où la pente est moins prononcée il peut exister une forte relation entre la direction d'écoulement et une combinaison de paramètre, incluant, l'intensité de la pente, la rugosité du sol, l'angle entre la direction de plus grande pente et la direction du travail. A partir de ce constat, dans l'étude de référence (Souchère et al. 1998) a été estimée une fonction discriminante D

(voir équation N°1 précédente) qui permet de décider si la direction des flux d'eau est imposée par la pente ou par la direction du travail du sol (Figure N°1.10).

Figure N°1.10
Détermination sens d'écoulement selon STREAM



Le modèle STREAM, avec le but d'estimer le réseau d'écoulement effectif du bassin versant, reprend cette fonction en l'incorporant dans le Système d'Information Géographique (SIG), avec qui il est intégré et définit l'ordre de contribution au modèle d'écoulement des éléments de la grille spatiale qui représentent le bassin versant analysé.

1.5.3.3 Détermination de Bilan Infiltration Ruissellement

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

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

Tableau N°1.2
Capacité d'infiltration (mm/h) en fonction
des paramètres faciès, rugosité et couvert végétal.

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

La deuxième phase consiste à caractériser l'état hydrique initial. En effet, le choix de travailler au pas de temps de l'événement et non en continu implique la nécessité de caractériser l'état hydrique du sol au début de l'événement car il détermine la pluie d'imbibition, c'est-à-dire, la hauteur d'eau infiltrée avant d'atteindre le régime d'infiltration stationnaire. Cette hauteur de pluie d'imbibition est calculée à partir d'une combinaison entre la hauteur de pluie des 48 heures précédant l'événement modélisé et la classe d'aptitude relative au ruissellement (Tableau N°1.3).

Tableau N°1.3
Hauteurs de pluie d'imbibition (Pi en mm) en fonction
de la capacité d'infiltration (Inf) et de la pluie antécédente (P48)

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

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

éventuel ruissellement venu d'amont (cas où la valeur bilan est négative). Le calcul du bilan a été effectué selon la formule suivante:

$$\mathbf{BI = PC - P_i - (Inf * DE)} \quad (2)$$

En sachant que :

PC : Hauteur de la pluie cumulée (mm).

P_i : Pluie d'imbibition (mm).

Inf : Capacité d'infiltration (mm/h).

DE : Durée efficace de l'évènement pluvieux donné (h).

Ensuite, pour calculer les volumes ruisselés en tout point du bassin versant, le modèle a été implémenté pour réaliser le calcul à partir d'un algorithme dont la particularité est de pondérer l'accumulation de l'excès d'eau de surface provenant de l'amont par des zones potentielles d'infiltration, en considérant les caractéristiques particulières du réseau d'écoulement estimé.

Chapitre 2: Le Ruissellement Erosif comme un Problème de Concertation

Les différents aspects décrits précédemment nous permettent de percevoir la complexité du problème de ruissellement en Haute Normandie. Celle-ci se manifeste particulièrement dans l'interdépendance existante entre les différentes activités humaines se réalisant au sein d'un bassin versant et la relation que ces activités ont avec la vulnérabilité des terrains agricoles face à ce risque environnemental.

Mais ce constat scientifique n'a pas été compris de la même manière par l'ensemble des acteurs impliqués dans ce problème en Haute Normandie. Du moins, c'est ce que nous pouvons conclure vu le peu de coordination existant entre les individus et la manière dont a été abordée jusqu'à présent, la gestion de ce problème environnemental. L'approche de la gestion a été plutôt curative, offrant des réponses limitées qui visent principalement le contrôle des écoulements générés et non pas l'élimination de ses causes.

Pour expliquer la situation actuelle de la gestion du ruissellement, il existe une série d'aspects donnant des éléments de réponse. En ce qui concerne l'attitude des exploitants agricoles par rapport à la gestion de leur activité, nous nous apercevons de l'existence d'un individualisme marqué influencé fortement par la prise de décision agricole et donc la prise en charge du problème de ruissellement. Chaque acteur protège prioritairement ses intérêts (parfois antagonistes avec ceux des autres acteurs) dans la recherche d'une amélioration de ses conditions individuelles pas forcément liées aux objectifs environnementaux. Cette posture individualiste se manifeste concrètement dans la région par l'inexistence d'actions collectives censées apporter une réponse au problème et résultantes d'une motivation spontanée de la part des agriculteurs (Cartier S., 2002b).

De plus, ce comportement individuel est renforcé par d'autres éléments qualifiés comme « sociaux-spatiaux », parmi eux la composition spatiale des exploitations agricoles (disposition spatiale non contiguë des parcelles) qui entrave les rapports de voisinage entre les exploitants.

Un autre élément à considérer est le lieu de résidence des agriculteurs qui n'est plus obligatoirement le lieu de travail (Nivoit D., 1995), ce qui affaiblit leur sensibilité face au problème de ruissellement. Dans une étude réalisée sur la commune de Doudeville, (Cartier S., 2002b) qui incluait une enquête techno-économique, il est démontré que seulement une minorité d'agriculteurs vivait dans la commune et que quelques uns habitaient parfois à plusieurs dizaines de kilomètres de leur exploitation.

Quant au reste de la population locale, la situation n'est pas très différente à celle des agriculteurs. Bien qu'elle reconnaisse l'importance du problème de ruissellement érosif car elle est confrontée de manière permanente aux multiples conséquences nuisibles de ce phénomène hydrique, elle n'a pas assumé (non plus) un rôle actif dans la gestion des sols mais a préféré déléguer cette responsabilité aux différentes institutions et autorités publiques.

Ces autorités ont pris en charge le problème en privilégiant jusqu'à présent la construction d'aménagements hydrauliques, tels que les bassins de rétention. Localisés juste en amont des villes là où se concentre la majorité des écoulements au sein d'un bassin versant, ils ont pour objectif de protéger les infrastructures publiques et privés.

Les résultats de cette approche n'ont pas été satisfaisants puisque le problème continue à se poser. Cette approche curative, qui est plutôt technique, vise essentiellement la minimisation des conséquences dû au ruissellement déjà généré sur les parcelles et ne s'intéresse pas à éliminer les

causes. Il est donc nécessaire élargir l'analyse de la situation afin d'impliquer les acteurs directement dans la définition de la solution au problème, et inciter au changement de comportements et à l'acceptation des responsabilités individuelles dans la génération de la dynamique érosive.

2.1 L'Approche de la Théorie Economique

Dans le domaine de la gestion de la nature, il existe des approches qui peuvent donner une grille de lecture globale du problème permettant de positionner la gestion au sein de la société pour essayer de trouver une solution définitive. Une de ces approches théoriques est fondée sur la théorie économique selon laquelle les terrains agricoles sont considérés comme une ressource mobilisée par les agriculteurs pour la satisfaction de leurs besoins.

De la même manière, elle considère que les dommages provoqués par le ruissellement érosif sur les propriétés publiques et privés correspondent à une *externalité* des actions de certains acteurs, notamment les agriculteurs. Une externalité est définie comme un fait réalisé par quelqu'un qui compromet la situation d'un tiers. Dans le concept d'externalité, un aspect important est que l'acteur qui la génère n'assume pas le coût de son action, ce qui a comme conséquence économique que le coût marginal privé de ses actions est inférieur à son coût marginal social.

Pour résoudre cette anomalie, la théorie économique propose de s'appuyer sur le marché et sur les mécanismes correctifs dont il dispose. Il existe notamment une série d'instruments économiques qui permet d'internaliser les effets externes des actions réalisées sur les propriétés privés et publiques et ainsi d'inciter au changement des comportements conduisant à l'efficacité économique sociale et à la protection de l'environnement.

2.1.1 Les instruments économiques

Parmi les instruments économiques d'incitation applicables à ce cas d'analyse, nous pouvons en souligner principalement deux, la subvention et la taxe. La subvention, dans notre cas d'étude, pourrait être appliquée à travers des primes indirectes sur certains facteurs de production, comme les semences de cultures intermédiaires, certains équipements agricoles qui améliorent les conditions d'infiltration des sols, etc., ou des primes directes selon les résultats concrets de bonnes pratiques agricoles en termes de ruissellement, afin de motiver des comportements moins ruisselants.

La taxe, quant à elle, est liée à l'idée de faire du ruissellement un problème coûteux pour l'agriculteur. En mettant une taxe, dite Pigouvienne¹, avec un taux égal au dommage marginal provoqué, le système pourra trouver l'optimum économique social où les dommages sur l'infrastructure publique et privée sont assumés par l'acteur responsable.

En général, il existe un niveau d'acceptation différent de la part des agriculteurs de ces deux types d'instruments. Alors que la subvention, outil largement utilisé pour différents aspects de la politique agricole européenne, a toujours été assez bien perçue par les agriculteurs car elle permet de réduire les coûts de production, la taxe, même si elle vise au même objectif environnemental, a beaucoup plus de problèmes à être appliquée à cause de son effet contraire, c'est-à-dire, l'augmentation des coûts de production. La seule exception dans le cas de la taxe en terme d'acceptation correspond à celle où la taxe captée est réaffectée dans l'activité pour aider un autre aspect de l'activité agricole.

¹ En référence à Arthur B. Cecil Pigou, un économiste anglais qui a proposé cette idée en 1920 dans le livre « Economics of Welfare ».

2.1.2 Les limites de l'approche économique

L'approche de la théorie économique sur la gestion de ressources naturelles et son application, représentée par la mise en place d'instruments d'incitation aux comportements écologiques possède une série de limites qui compliquent sa définition comme solution exclusive dans la gestion du problème environnemental.

Une des premières limites de l'approche économique concerne la dimension temporelle d'analyse, peu prise en compte dans une pensée qui recherche l'équilibre entre deux parties, société et ressources, qui évoluent constamment.

Deuxièmement, la théorie économique suppose que les autorités responsables de l'application des mesures correctives aient une information complète sur la situation qui leur permette d'estimer la relation entre les dommages et les écoulements érosifs et, ensuite, de définir la taxe ou la subvention qui permet d'arriver à un optimum économique social. Dans la pratique, cette situation est difficile à mesurer et très coûteuse à implémenter.

Une autre limite de ce type d'approche est que l'application des mécanismes économiques n'assure pas forcément un résultat environnemental. La subvention comme la taxe a pour rôle d'inciter aux changements de comportements afin d'enclencher une gestion plus adéquate mais elles ne contrôlent pas la décision finale des acteurs.

Finalement, la théorie économique est d'autant plus limitée qu'elle considère l'individu comme un être rationnel et égoïste qui prend des décisions pour maximiser son bénéfice économique particulier. Même si nous nous apercevons de ce type de comportements dans l'activité agricole, il existe certaines formes d'interdépendance plus complexes qui échappent à cette approche et à la coordination par le marché, notamment tout ce qui a un rapport avec le système d'interactions entre les acteurs impliqués et l'évolution spatiale et temporelle de la dynamique biophysique.

Il est donc important de considérer des solutions différentes de celles qui sont basées uniquement dans les modifications de comportement selon le marché et ainsi de faire ressortir, par exemple, des comportements de solidarité, de réciprocité et de respect pour des règles transcendant l'intérêt individuel, qui peuvent jouer un rôle important dans la protection de l'environnement.

Pour cela, il s'avère nécessaire de définir une autre approche théorique qui favorise une analyse collective entre les acteurs impliqués et à partir de cela, d'aboutir à une vision commune de la situation dans laquelle chaque acteur s'engage personnellement pour atteindre un objectif commun sur la gestion de la ressource.

A la suite de ce processus collectif d'analyse, il sera important de pouvoir établir le rôle effectif de l'activité agricole dans la génération du ruissellement érosif et les marges de manœuvre du système d'action des agriculteurs en relation avec le contexte social, politique et économique. Ceci a été analysé par Bruno Locatelli (Locatelli B., 2000) dans le contexte de la démographie et la relation avec le paysage rural à Madagascar.

Dans le cas de la Haute Normandie, la décision des agriculteurs ne semble pas être indépendante de leur contexte. Quant au contexte social, il existe des aspects qui pourraient influencer le choix des agriculteurs pour lesquels il serait intéressant d'établir leurs « poids » réels dans la décision. En exemple, nous pouvons citer l'importance que les agriculteurs donnent à la tradition culturelle, le niveau d'aversion au changement qui pourrait conditionner la définition de pratiques culturelles.

De plus, comme nous l'avons déjà décrit, la concertation spontanée entre les agriculteurs avec des parcelles voisines s'avère rare dans la région. Les seuls types de rapports sociaux existant sont ceux fondés sur des échanges entre pairs qui appartiennent aux mêmes groupes socio-techniques (CUMA², par exemple) ou bien en raison d'un fort encadrement extérieur expert et neutre. Cet affaiblissement du concept du voisinage, qui forme partie du contexte social, pourrait avoir aussi une certaine influence sur la décision agricole individuelle.

Le contexte politique joue un rôle dans la décision agricole qu'il faudrait aussi évaluer. Il existe des réglementations (régionales, nationales et européennes) qui peuvent influencer les actions des acteurs impliqués, notamment la PAC et ses politiques sur les cultures, prairies et jachères (Souchère et al., 2003). Elles définissent des propositions à la production agricole (système de quotas, de subvention et d'aides) qui pourrait déclencher une décision différente à celle qui aurait été prise sans ces règlements.

Concernant le contexte économique, étroitement lié au contexte politique décrit précédemment, certaines réglementations agricoles en vigueur proposent des aides économiques destinées aux agriculteurs qui volontairement réalisent de bonnes pratiques culturales en terme de protection face au ruissellement. Ces aides constituent un élément économique qui sera à considérer dans la décision agricole car elles ont une conséquence directe sur les coûts de production et les bénéfices économiques potentiels des exploitations.

Dans ce même contexte, les fluctuations des prix du marché des cultures correspondent à une autre variable exogène aux agriculteurs qui peuvent influencer fortement leurs décisions dans la mesure où chaque agriculteur fonde son comportement sur une approche essentiellement économique orientée vers la maximisation de son profit.

En bref, il sera intéressant de connaître jusqu'à quel point les variables exogènes, celles qui ont été mentionnées ou d'autres, influencent la décision des agriculteurs et partir de cela, de définir une gestion qui prend en compte cette situation et d'essayer de trouver une solution au problème. Nous espérons évaluer l'application d'une approche collective d'analyse du problème qui considère les différents points de vue des acteurs et notamment celui des agriculteurs et les motivations de leur comportements.

2.2 L'Approche de la Gestion Patrimoniale

La gestion d'une ressource naturelle en particulier dépend, premièrement, des représentations que les acteurs se créent de manière individuelle sur la nature à partir de leur niveau de perception de la situation et de leur système de valeurs et, deuxièmement, de la représentation partagée par l'ensemble des acteurs.

Sur la base d'une représentation partagée de la nature, la gestion de ressources naturelles devient possible. Dans le cas du ruissellement érosif, sa gestion passe donc par le changement de la perception individuelle de ce problème à une vision plus globale d'un bien commun qu'il faut gérer de manière durable en assurant un certain niveau de qualité.

La réussite de tels objectifs demande la prise en charge et un engagement effectif des acteurs qui ne pourra se manifester qu'à partir de la création d'un sentiment d'appartenance commune ou un «sentiment patrimonial» comme cela a été défini par Henry Ollagnon (Ollagnon H., 1987). Selon lui, le patrimoine correspond à *«tous les éléments matériels et non matériels qui contribuent à maintenir et*

² Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole.

développer l'identité et l'autonomie de leur détenteurs dans le temps et l'espace, tout en s'adaptant dans un environnement changeant».

Dans cette approche « patrimoniale » de gestion des ressources naturelles et de l'environnement, les acteurs définissent à travers un processus de discussion intégrative, leur concept commun de patrimonialité sur la qualité globale de la ressource ou de l'environnement fondé sur une notion de durabilité. Compte tenu de la diversité des acteurs concernés par les problèmes environnementaux, il existe une quantité importante de perceptions de l'objectif en terme de qualité de l'environnement que le système devrait rechercher.

L'approche patrimoniale favorise fortement la création d'instances de rencontre entre les différents acteurs concernés afin de décider collectivement des objectifs environnementaux et des règles pour les atteindre. Il s'agit d'un processus complexe qui donnera suite à la négociation entre les acteurs dépassant les perceptions ou appropriations particulières pour la définition d'une gestion de caractère trans-appropriative de la ressource fondée sur l'affirmation de la patrimonialité individuelle. Cette gestion concertée impose aux acteurs un cadre de contraintes dans la définition de leur système d'actions sur l'environnement pour atteindre les objectifs communs fixés.

En termes comparatifs, nous pouvons signaler que ce type d'approche de gestion des ressources qui considère l'internalisation individuelle de la qualité environnementale et l'explicitation des appropriations à travers la coordination des acteurs impliqués, est différente de celui retenu habituellement par la théorie économique dominante, montrée précédemment. Notamment, la référence à un patrimoine naturel renvoie à l'idée d'une possible soustraction aux lois du marché, lesquelles ont tendance à privilégier le court terme et à enfermer la négociation dans un cadre particulier.

2.3 Quelle Place pour la Concertation ?

Après avoir identifié la complexité du problème de l'érosion hydrique, résultant des décisions de nombreux acteurs qui se manifestent de manière différenciée à l'échelle du bassin versant, nous avons montré les limitations de l'approche en vigueur sur la gestion du ruissellement en Haute Normandie comme étant basée sur un engagement impératif envers certaines règles, dans laquelle l'autorité responsable de la gestion du problème impose un cadre de gestion adopté par les acteurs concernés.

A partir de cela nous avons organisé une réflexion, autour d'une gestion plus adaptée et permettant de définir des solutions durables au problème de ruissellement au niveau d'un bassin versant. Nous considérons la nécessité d'unifier les représentations que les différents porteurs de connaissances ont de la problématique. Dans ce contexte, la concertation, comme approche de gestion, prend donc tout son sens en incitant la réalisation d'instances collectives de discussion dans lesquelles les acteurs étant reconnus interdépendants mais qui n'ayant pas forcément des intérêts similaires peuvent partager leurs représentations de la réalité afin de se mettre d'accord autour d'une problématique commune et de définir un plan d'action concerté vers une gestion durable de la ressource.

C'est dans ce contexte que nous considérons nécessaire de travailler pour améliorer la compréhension systémique du problème de ruissellement érosif, pour considérer l'interdépendance entre les différentes activités humaines et pour redéfinir les relations locales de solidarité sur le territoire, entre exploitants agricoles voisins, entre collectivités localisées en amont et en aval, entre utilisateurs du sol et utilisateurs de l'eau, etc., pour un engagement effectif de tous les acteurs dans une gestion durable des sols.

Afin d'aider à la gestion concertée de la ressource, nous avons considéré une posture scientifique, appelée *modélisation d'accompagnement*. Elle prend en compte les concepts théoriques de différentes disciplines scientifiques intéressées au problème de la gestion de ressources, notamment l'approche patrimoniale décrit précédemment, pour créer un cadre scientifique favorisant la création d'un processus de discussion et libre partage de connaissances entre les parties prenantes qui sert de base à une future gestion collective.

Chapitre 3: La modélisation d'accompagnement et ses méthodes. Vers une gestion concertée du ruissellement

3.1 Modélisation d'Accompagnement

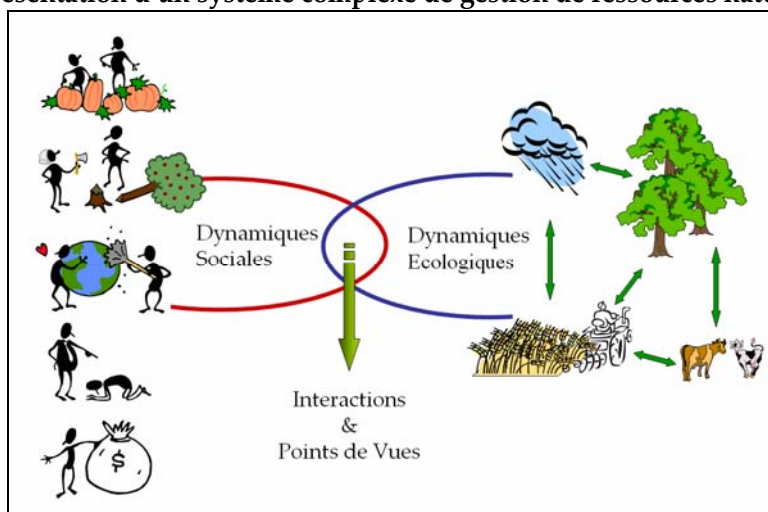
Depuis quelques années, un groupe de chercheurs intéressés par la gestion des ressources naturelles et de l'environnement et, notamment, par la compréhension des interactions entre les dynamiques écologiques et sociales a travaillé sur la définition d'une posture scientifique transdisciplinaire allant au-delà des approches scientifiques abordant les problèmes sous une perspective prédéfinie. Selon cette approche appelée *Modélisation d'Accompagnement*, il n'existe pas à priori d'hypothèse de subordination d'un type de dynamiques à l'autre, comme cela est montré dans les approches écologiques et économiques.

Selon l'analyse écologique, l'évolution naturelle des ressources est altérée par l'action humaine. Autrement dit, il est possible de représenter les dynamiques sociales selon la ressource qui est exploitée. De son côté, l'approche économique, comme nous l'avons analysée dans le chapitre précédent, considère les individus comme étant des agents économiques recherchant la maximisation de leurs bénéfices économiques individuels et, pour cela, ils exploitent des ressources naturelles limitées. Pour ces deux approches, l'usage collectif d'une ressource commune est donc compris à partir du concept de la compétition où les interactions se basent sur les hypothèses d'équilibre et d'optimisation (Collectif ComMod, 2006).

En réaction à cela, les chercheurs ComMod¹ se sont positionnés autrement. Selon eux, il s'agit d'intégrer les dynamiques sociales et écologiques ainsi que les interactions existantes entre les acteurs ayant des perceptions, objectifs, poids et niveaux d'informations différents dans un processus de négociation en se focalisant spécialement sur le processus de prise de décision résultant de ces interactions (Figure N°3.1).

Cette posture est différente de celle adoptée par les approches traditionnelles qui considèrent la prise de décision comme étant un calcul rationnel fait par chaque agent disposant d'informations plus ou moins limitées.

Figure N°3.1
Représentation d'un système complexe de gestion de ressources naturelles



¹ Abréviation venue de la traduction du concept de modélisation d'accompagnement en anglais.

3.1.1 Principes et objectifs de la modélisation d'accompagnement

La définition d'une démarche scientifique comme celle-là exige un cadre théorique précisant les principes et objectifs visés, son rôle dans le domaine de la gestion des ressources naturelles, le positionnement par rapport aux autres sciences et la posture du chercheur au sein des processus de gestion de ressources. C'est pour cela que les chercheurs créateurs de la démarche ComMod ont élaboré une charte de principes (Collectif ComMod, 2005), publiée dans deux revues scientifiques, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (JASSS) et *Natures, Sciences et Sociétés* (NSS). Parmi les principes qui définissent l'action sous la démarche ComMod, nous distinguons :

- La *gestion adaptative* est associée à la définition d'un dispositif flexible, capable de valider systématiquement les méthodes utilisées dans la gestion des ressources afin de donner de réponses ajustées à un système qui évolue. La capacité adaptative dépend du niveau de compréhension de la réalité, de la définition précise des objectifs de gestion et de l'éventail d'alternatives de gestion possibles.
- La *co-gestion* considère le rassemblement des parties prenantes, incluant les acteurs individuels privés mais aussi les autorités publiques, les institutions, etc. autour de la réalisation de la gestion collective de la ressource. Dans ce concept, les acteurs sont convoqués pour s'engager de manière effective et responsable dans la gestion de la ressource.
- La *gestion patrimoniale*, décrite dans le chapitre précédent, définit l'appropriation de la ressource comme patrimoine naturel associant l'action de gestionnaires passés, actuels et futurs. A travers un processus de discussion collective et de négociation cadrés par des objectifs à long terme, les acteurs responsables de la gestion de la ressource définissent le concept de qualité environnementale à atteindre sous l'approche d'une gestion durable et s'engagent à le respecter.

Tandis que les objectifs principaux de la démarche sont les suivants :

- Accroître les connaissances des acteurs impliqués sur des systèmes complexes et leurs dynamiques. La décision des acteurs face à un problème de gestion de l'environnement est réalisée à partir de sa perception subjective de la situation et fondée sur le niveau d'information partiel qu'ils possèdent. La démarche considère donc comme essentiel la récupération des différentes sources de connaissance et points de vue autour du problème, quelle soit scientifique ou locale, dans une approche intégratrice et transdisciplinaire afin d'améliorer le niveau de connaissances et définir une représentation partagée du système qui soit acceptée par tous les acteurs impliqués dans le problème analysé.
- Aider aux processus collectifs de prise de décision, entendu comme « *le processus d'interactions entre des acteurs individuels et/ou collectifs ayant des représentations et poids différents dans la négociation* » (Weber J., 1995) en proposant des méthodes pour favoriser la gestion concertée du système analysé.

3.1.2 Position de la démarche d'accompagnement

L'application de cette démarche vise l'amélioration des conditions pour aborder la nature complexe des systèmes ayant une diversité d'acteurs, d'interactions et d'enjeux en évolution constante. Dans ce contexte, il est important de considérer la position de l'approche d'accompagnement par rapport à cet enjeu, ce qui a été synthétisé dans un document réalisé par le collectif ComMod (Collectif ComMod, 2006), dans lequel il est dit que « *l'accompagnement se situe en amont de la décision technique pour appuyer*

la réflexion des différents acteurs concernés, en vue de parvenir à une représentation partagée et des voies possibles pour engager un processus social de prise en charge des problèmes identifiées ».

La démarche ComMod se concentre sur la qualité du processus collectif de décision, et pas forcément sur la solution trouvée. Il ne s'agit pas de trouver la meilleure solution, mais de donner les moyens aux acteurs de prendre en charge au mieux les incertitudes de la situation examinée en commun (Collectif ComMod, 2005).

3.1.3 Position du chercheur

Dans l'approche d'accompagnement, le chercheur est considéré comme un acteur du système, responsable de la définition d'un certain type de connaissance, le savoir scientifique, qui devra être présenté au reste des acteurs concernés, pour sa réfutation ou sa validation, afin de construire une représentation collective de la réalité. Le cadre déontologique du rôle du scientifique défini dans la Charte ComMod, qui définira la légitimité de la démarche est fondé sur quatre aspects:

1. La transparence des hypothèses et des procédures sous-jacentes.
2. L'affichage clair des domaines d'utilisation des modèles développés.
3. L'implication du chercheur dans le processus. Le chercheur qui adopte cette démarche est un porteur de connaissance parmi d'autres, bien qu'il ait le plus souvent un rôle singulier dans l'initialisation de processus.
4. La remise en cause continue de la démarche proposée, qui peut amener dans plusieurs cas le refus de l'application de la démarche d'accompagnement, car l'augmentation des connaissances et le contexte social analysé peut faire ressortir des risques non souhaitables pour les acteurs clés du processus.

3.2 Les Méthodes de la Démarche d'Accompagnement

Dans l'analyse d'un système écologique et social, l'approche ComMod considère les processus sociaux comme le résultat des interactions entre différents points de vue sur l'environnement. Pour comprendre la dynamique il faut définir les caractéristiques de l'environnement, les groupes sociaux impliqués et expliciter les perceptions des acteurs. Avec cet objectif, l'utilisation des outils de modélisation apparaît comme un élément important permettant de réaliser une représentation simplifiée du système avec un nombre important d'acteurs interagissant.

Dans le contexte de la démarche d'accompagnement, il existe la possibilité d'employer différents outils de modélisation. Les deux outils les plus utilisés sont les systèmes multi-agent et les jeux de rôles. Ces deux outils offrent la possibilité de pouvoir les utiliser de manière complémentaire et itérative dans les différentes étapes du processus de conception, d'évaluation et d'application du modèle.

3.2.1 Les systèmes multi agents (SMA)

Les simulations SMA sont des outils conçus pour étudier des phénomènes collectifs par la modélisation de comportements individuels. Initialement, le développement des SMA se situe dans la rencontre entre les sciences de l'informatique et celles de l'intelligence artificielle classique.

Les sciences de l'informatique et notamment la programmation d'objets ont offert une série de concepts, technologies et méthodologies permettant d'expliquer un SMA comme étant un ensemble d'entités autonomes « objets » qui interagissent à travers l'envoi de messages.

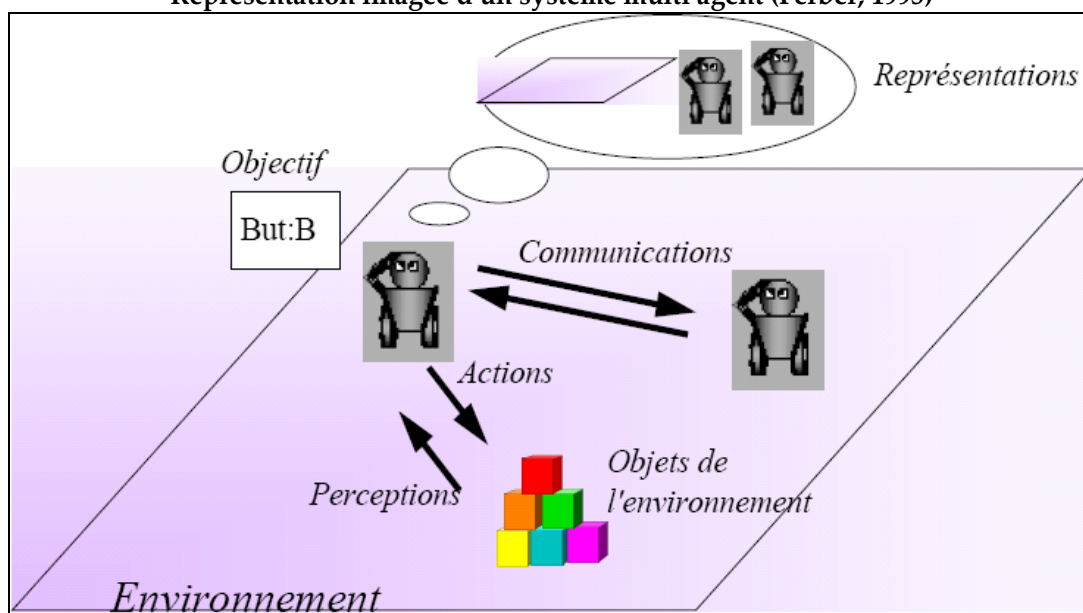
De leur côté, les sciences de l'intelligence artificielle classique ont évolué dans la définition du concept de systèmes multi-experts, entendu comme un système qui gère une base de connaissances de manière relativement coordonnées. A partir de cela, se développe le concept d'« agent » comme une manière de résoudre les limites de l'approche multi—expertise, notamment en ce qui concerne la définition des dynamiques d'interaction et de coopération entre entités pouvant éventuellement rechercher une solution collective.

Avec le développement de ces deux approches, il a été possible d'observer leur complémentarité. D'une part l'approche « agent » non seulement élargit certaines limites de l'approche « objet » comme le traitement de messages et l'autonomie des objets, mais elle incorpore également d'autres concepts comme la rationalité, la capacité cognitive des agents, la notion d'agent situé et celle de l'environnement. D'autre part, les méthodologies type « objet » ont beaucoup inspiré les méthodologies « agent », notamment dans la définition de formalisme de représentation comme UML (Unified Modelling Language) dans sa version adapté pour les agents AUML.

Ces approches ont créé un terrain fertile pour l'application des SMA dans le cadre général des sciences de la complexité ne trouvant pas de formalisation mathématique adaptée. En effet, les SMA offrent une méthode d'analyse, premièrement, dans le domaine des sciences du vivant, et deuxièmement, dans la reformulation de certaines questions dans les sciences humaines et sociales, permettant de définir des modélisations ascendantes, du niveau micro qui est associé au comportement individuel des agents au niveau macro lié à la compréhension des conduites organisationnelles.

Selon Ferber (Ferber J., 2006), un agent est « une entité informatique (un processus) située dans un environnement (réel ou virtuel), plongé dans une structure sociale qui est capable de percevoir et d'agir sur cet environnement et de communiquer avec les autres agents suivant un comportement autonome conséquence de ses perceptions, ses représentations, ses interactions et ses objectifs » (Figure N°3.2).

Figure N°3.2
Représentation imagée d'un système multi agent (Ferber, 1995)



En accord avec cette définition, un Système Multi Agent peut être compris comme un ensemble de processus informatiques opérant simultanément et représentant les comportements autonomes des agents dans un espace contraint qui définit la structure de la société dans laquelle ils évoluent.

Dans le cas du problème de ruissellement érosif en Haute Normandie, la représentation systémique de l'approche SMA présente les différents acteurs concernés par ce problème (agriculteurs, institutions, etc.) comme des agents autonomes ayant des comportements et objectifs différents et localisés sur un environnement avec lequel ils interagissent. Donc, il semble pertinent de réaliser la représentation du système à travers une simulation de système multi-agents, outil de la modélisation d'accompagnement. Cela permettra de déterminer les dynamiques liées au problème de ruissellement érosif et de simuler d'éventuels scénarios futurs.

3.2.2 Le jeu de rôles (JdR)

Malgré le bon niveau d'ajustement conceptuel entre l'outil SMA et le système d'étude, il existe une autre méthode considérée dans la modélisation des sociétés possible d'appliquer dans la procédure d'accompagnement, il s'agit du jeu de rôles (JdR), un outil utilisé dans différents domaines pour expliciter la représentation d'un système et mettre en évidence les comportements des acteurs impliqués (D'Aquino et al., 2001 ; D'Aquino et al., 2002 ; Etienne, 2004).

Son application prend du sens notamment dans le processus de validation du modèle cognitif élaboré et l'évaluation des scénarios futurs, comme une façon de résoudre le problème de lisibilité éventuelle de la part des acteurs impliqués sur le modèle auquel ils sont confrontés.

Le jeu de rôles constitue une manière simple pour mettre les acteurs en situation afin de comprendre leur perception personnelle du monde qui les entoure et d'évaluer le monde artificiel conçu. Il permet de savoir le rapport entre les éléments considérés par la représentation virtuelle et ceux qui sont mobilisés dans le processus de décision réel.

Parmi les avantages les plus importants de l'utilisation de cet outil dans le contexte de la démarche ComMod, nous trouvons:

1. Le JdR représente une manière efficace pour révéler quelques aspects des dynamiques sociales à travers l'observation directe des interactions entre les joueurs (Barreteau O., 2003)
2. L'aspect ludique du jeu favorise l'appropriation de la démarche, la compréhension du système et le partage des connaissances.
3. Il permet d'améliorer le niveau de connaissance individuel et systémique sur le processus représenté, aussi bien pour les acteurs connaisseurs et que pour ceux qui cherchent à savoir en stimulant les échanges.
4. Avec l'utilisation du JdR, il se crée un outil permettant d'aider la prise de décision collective, à travers la définition d'instances de discussion favorisant la concertation et à la négociation.
5. Il permet d'analyser différentes alternatives ou scénarios d'une gestion collective.

3.2.3 Le couplage jeu de rôles (JdR) système multi agent SMA

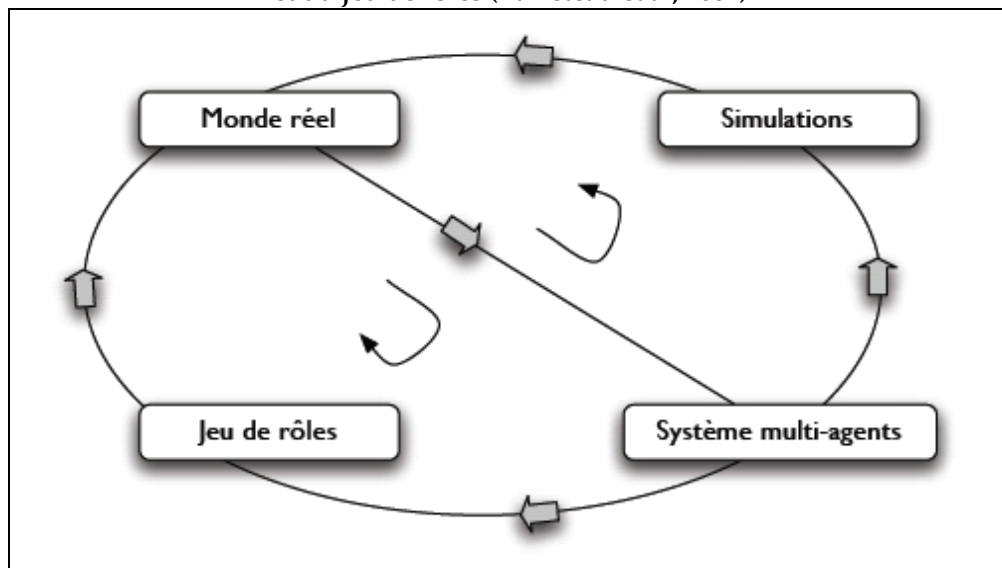
Les deux méthodes décrites précédemment peuvent être utilisés par la démarche d'accompagnement de manière distincte ou couplée, dans un processus itératif d'amélioration mutuelle. Cela permet alors d'établir collectivement les représentations du système pour mieux comprendre ses dynamiques et sa relation avec les comportements des acteurs (Bousquet F. et G. Trébuil., 2005 ; D'Aquino et al., 2002 ; D'Aquino et al., 2003).

L'utilisation des outils de simulation multi-agent et de jeu de rôle dans le contexte ComMod peut être réalisée en trois étapes (Collectif ComMod, 2006) :

1. *Acquisition de connaissances.* A travers le travail scientifique ou de terrain les chercheurs capturent les aspects les plus importants du domaine d'étude afin de pouvoir ultérieurement les traduire dans la construction d'une représentation simplifiée du système qui pourra ensuite être testé en utilisant le modèle SMA et le jeu de rôle.
2. *Modélisation.* Elle correspond à la formalisation des connaissances afin de créer un outil pour analyser la situation étudiée.
3. *Simulation.* L'objectif dans cette étape est de montrer la relation entre les comportements des acteurs et leurs interactions avec les résultats du système. Cela permettra d'améliorer le niveau de compréhension du système et d'identifier de nouvelles questions sur le fonctionnement du système pouvant changer le cours de la recherche.

Le couplage correspond à l'application itérative des deux méthodes, dans laquelle le modèle informatique SMA peut être utilisé pour simuler différents scénarios futurs tandis que le jeu de rôles permet de valider le modèle cognitif inclus dans le SMA et de tester s'il incorpore effectivement les éléments nécessaires pour la bonne conduite du processus de décision (Figure N°3.3).

Figure N°3.3
Schéma de la démarche itérative de construction d'un SMA
et du jeu de rôles (Barreteau et al, 2001)



Avec l'application d'un jeu de rôles en complément de la simulation SMA, il se présente aussi une opportunité d'ouvrir la «boîte noire» des hypothèses et des méthodes incluses dans l'outil

informatique et qui ne sont pas forcément compréhensibles par la totalité des acteurs (Barreteau et al., 2001). Le couplage permet aussi d'avoir un retour immédiat des comportements et des perceptions au travers de la discussion entre les acteurs concernés, et d'établir par exemple l'existence des actions stratégiques et l'influence des rapports de pouvoirs au sein de la discussion.

Finalement, en prenant en compte les antécédents déjà exposés nous considérons que le couplage SMA/JdR pourra s'avérer particulièrement efficace dans l'acquisition des connaissances sur les systèmes complexes, sociaux ou biologiques, ainsi que pour appuyer à travers des méthodologies pratiques le processus de décision. Il facilitera l'identification des entités, des actions stratégiques, permettra l'élaboration d'indicateurs d'évaluation partagés et l'émergence d'une vision commune sur le problème environnemental afin d'aboutir à la définition d'une gestion concertée avec des objectifs de long terme.

Chapitre 4: Définition Conceptuelle du Modèle.

La mise en œuvre de la démarche de modélisation d'accompagnement, telle que nous l'avons décrit précédemment, impose la définition d'une représentation partagée de la réalité par les acteurs impliqués. Dans le cas particulier de son application au problème de ruissellement, nous avons décidé de réaliser cette représentation à travers une construction collective avec les différentes parties prenantes en réalisant un atelier de discussion dans la région de Haute Normandie. Cette action a le double objectif de sensibiliser sur la démarche ComMod et ultérieurement de discuter et définir les éléments que le modèle informatique SMA doit considérer pour intégrer les points de vue de chaque acteur sur la situation et permettre la création d'une plate-forme d'apprentissage collectif pertinente.

En prévision des applications ultérieures des modèles élaborés, il est important pour la réussite de l'application de ce type de démarche participative de s'assurer que les porteurs de points de vue convoqués à ce type d'atelier de discussion représenteront effectivement la totalité de rôles susceptibles de se rencontrer au sein d'un bassin versant associé au problème de ruissellement érosif. Par ailleurs en tant que scientifiques appliquant les principes de la démarche ComMod, il est important d'éviter l'introduction d'un biais lié à une sélection arbitraire d'acteurs en fonction de leur niveau de connaissances acquis car elle pourrait être à l'origine d'une élimination injustifiée de quelques rôles.

4.1 Réunion Préliminaire de Sensibilisation

En considérant ces précautions, a été réalisé dans le mois de Janvier 2006, avant la réalisation de ce travail de recherche, une réunion de travail consistante en une rencontre préliminaire entre chercheurs de l'INRA qui mènent le projet ADD¹ dans lequel s'inscrit cette étude, Véronique Souchère et Michel Etienne, et les institutions liées au problème de ruissellement dans la région, c'est-à-dire, la Chambre d'Agriculture de Normandie, l'AREAS (Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols) et un des 22 Syndicats de bassin versant de Seine Normandie. Les objectifs centraux de cette rencontre étaient de sensibiliser à la démarche ComMod, d'identifier les questions de terrain sur lesquelles mettre en œuvre la démarche, ainsi que les lieux d'action où il serait possible de mettre en œuvre la démarche, de définir le type de problématique et de trouver des porteurs locaux du projet. Tout cela pour trouver une certaine légitimité face à la population et ensuite réaliser la convocation des participants à l'application de la démarche.

4.2 Convocation des Acteurs

Compte tenu de cette discussion, nous avons identifié les différents groupes d'acteurs représentatifs du problème de ruissellement susceptibles d'être convoqués par la suite. Il a été porté un soin particulier aux spécialisations existantes dans le rôle de certains d'acteurs, nous permettant de montrer les spécificités de réponses au problème d'érosion hydrique. Notamment dans le rôle de l'agriculteur, il a été considéré dans la représentation du système la distinction existante selon l'activité agricole réalisée. Ainsi, nous avons distingué les agriculteurs qui basent leur production agricole complètement dans les cultures de ventes de ceux qui réalisent une production de cultures permettant de nourrir leur bétail destiné à la production du lait ou viande.

Ensuite, en utilisant des listes des noms d'agriculteurs et de maires de communes fournies par les trois institutions locales ou régionales participant à la réunion de travail préliminaire, (Chambre d'Agriculture, AREAS, Syndicat de Bassin Versant), nous avons contacté (sans aucun type de

¹ ADD: Agriculture et Développement durable

conditionnement sauf l'intérêt d'avoir un spectre général de différents types d'agriculteurs), de manière écrite ou téléphonique les acteurs identifiés, en expliquant l'objectif général de la démarche et en les convoquant pour l'atelier de discussion. De manière parallèle, nous avons eu l'aide significative de l'AREAS, représentée par Mr. Jean-François Ouvry, qui a convoqué directement quelques maires de commune.

Institutions et personnes contactées pour initier la démarche:

- o Environ 40 Agriculteurs et Eleveurs de la région.
- o 12 Mairies de communes de la région.
- o Chambre d'Agriculture de Seine Maritime
 - Véronique Lecomte (Conseillère en charge de la problématique ruissellement érosion au sein de la Chambre)
- o Syndicat de Bassin Versant
 - Julien Figuepron (Animateur Agricole du syndicat de l'Austreberthe et du Saffimbec)
- o AREAS (Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols)
 - Jean-François Ouvry (Directeur de l'AREAS)
- o INRA
 - Véronique Souchère (Ingénieur de Recherche)
 - Javier Echeverria (Ingénieur Hydraulicien)
- o Agence de l'Eau de Seine Normandie.
- o Conseil Général.

Finalement, se sont présentés à l'atelier de discussion 6 agriculteurs, dont 3 étaient agriculteurs et maires de communes conjointement, un ancien maire de commune et les représentants de la Chambre d'Agriculture, de l'AREAS, du Syndicat de Bassin Versant et de l'INRA (voir liste en Annexe N°1). La présence réelle à l'atelier de l'ordre de 10% par rapport à l'ensemble des personnes convoquées révèle montre les difficultés de la démarche. Cette faible participation s'explique non seulement par la durée de l'atelier considérée excessive par les agriculteurs compte tenu de leurs obligations mais également du fait que cette démarche ne découle pas d'une demande locale. En effet, il n'existe pas une demande locale de la part des agriculteurs de mettre en place la démarche pour résoudre le problème, plus par méconnaissance de la situation que par désintérêt. Sont les institutions compétentes régionales qui se sont associées à l'INRA pour mettre en place l'approche ComMod afin de provoquer une discussion large entre toutes les parties prenantes.

4.3 Déroulement des Réunions

Nous avons finalement organisé deux réunions qui ont eu lieu dans la région Haute Normandie, en salle du conseil municipal de la mairie de Limésy, le 30 Mai et le 2 Juin 2006 entre 09:00 et 17:30. Le lieu a été choisi de manière stratégique afin de définir un endroit dans la région de Haute Normandie placé le plus centralement possible pour favoriser le déplacement des personnes invitées. De la même sorte, la date a été fixée de manière à trouver un bon compromis entre les besoins de la démarche et les possibilités réelles des agriculteurs. En ce qui concerne les besoins de la démarche, l'idéal aurait été de faire l'atelier en deux journées consécutives et conserver ainsi le fil de la discussion. Cependant, les agriculteurs ont préféré deux journées éloignées dans le temps, leur permettant d'absorber de meilleure manière les effets de leur absence au travail.

Photos N°4.1.
Acteurs convoqués aux réunions



Dans une première phase, en tant qu'animateurs de la réunion, nous avons fait une présentation générale sur les grands principes de ComMod et son application dans le cadre de la gestion des ressources naturelles. Ensuite, à travers quelques exemples d'applications réalisées au niveau national et à l'étranger, nous avons introduit d'une part l'utilisation des simulations de type systèmes multi agents (SMA) dans le contexte de la modélisation d'accompagnement. D'autre part, nous avons aussi présenté l'intérêt du jeu de rôle et de son couplage avec un SMA pour faire comprendre en quoi ces outils pouvaient être utiles pour aider à la prise de décision.

Photo N°4.2
Phase d'Introduction à la démarche.



Après cette phase d'introduction nous avons travaillé dans un deuxième temps sur la définition conceptuelle du modèle en appliquant la méthodologie définie par Michel Etienne et qui a été déjà utilisée au cours de différentes expériences participatives, notamment dans l'analyse de dynamiques spatio-temporelles du paysage dans le cas de Causse Méjean (Etienne M., 2004) et le cas du sylvopastoralisme et prévention des incendies en région méditerranéenne (Etienne M. et Le Page C., 2003). Elle consiste à reconstituer le système (acteurs, environnement et les interactions) à travers cinq questions qui sont posées directement aux participants:

- 1) A quels acteurs souhaitez-vous faire jouer un rôle dans la gestion du bassin versant ?
- 2) Quelles ressources souhaitez-vous visualiser et selon quels indicateurs ?
- 3) Quelles sont les principales dynamiques en jeu ?
- 4) Comment chaque acteur retenu utilise ces ressources et modifie ces dynamiques ?
- 5) Quelles sont les échelles d'espace et de temps à prendre en compte ?

Pour un bon déroulement des réunions et, principalement, pour atteindre les objectifs fixés pour une expérience participative de ce type, il faut établir un protocole de communication permettant d'obtenir une participation égalitaire de tous les acteurs en évitant la manifestation de rapports de forces existants dans la réalité. Pour prendre en compte cela, nous avons demandé successivement à chaque acteur et pour chacune des cinq questions de proposer une réponse (et seulement une) au cours de chaque tour de table. Nous avons ainsi fait plusieurs tour de table jusqu'au moment où les acteurs n'avaient plus de propositions à soumettre à l'ensemble des participants. Chaque proposition était ensuite discutée et justifiée par l'ensemble des acteurs et c'est seulement après avoir été acceptée par tous que son incorporation dans le modèle conceptuel a été validée.

4.4 Résultats de la Co-Construction

Dans la suite, nous donnons les résultats obtenus sur les cinq questions posées ayant été validés par l'ensemble des acteurs :

1) A quels acteurs souhaitez-vous faire jouer un rôle dans la gestion du bassin versant ?

Nous avons proposé aux participants d'identifier les acteurs considérés comme importants dans les dynamiques liées au problème de ruissellement, en les différenciant en deux types : les acteurs directement impliqués par le problème de ruissellement, c'est à dire, ceux qui, à travers leur comportements ou actions, peuvent modifier concrètement les écoulements et les acteurs indirects qui sont impliqués dans le problème seulement à travers la réalisation d'actions sur le comportement des autres acteurs et pas directement sur les terrains. Selon les propositions validées par les participants, la liste des acteurs est la suivante :

- Acteurs Directs

- Agriculteurs, divisés en trois types :
 - Agriculteurs Grands Cultures
 - Agriculteur Polyculteurs/Éleveur de bovins laitiers
 - Agriculteur Polyculteurs/Éleveur de bovins allaitants.
- Syndicat Bassin Versant.
- Syndicat de Rivières.
- Syndicat d'Eau Potable.
- Elus (Commune).
- Habitants / Lotisseur.
- Direction de Routes.
- Propriétaire Forestier.

- Acteurs Indirects

- Conseil Général.
- Conseil Régional.
- Agence de l'Eau.
- Etat / Europe.
- Fédération de Chasse.
- Urbaniste.
- Propriétaire Foncier.

2) Quelles ressources souhaitez-vous visualiser et selon quels indicateurs ?

Tableau N°4.1

Les différents types de ressources associées à la gestion de ruissellement et ses indicateurs

Ressources	Indicateurs
Sol agricole	Stabilité structurale, activité microbiologique, biodiversité, texture de sols

Tableau N°4.1 (Suite)

Les différents types de ressources associées à la gestion de ruissellement et ses indicateurs

Ressources	Indicateurs
Parcellaire	Pente, orientation, type d'utilisation du sol, taille, longueur
Culture	Assolement, pratique culturale, itinéraire technique, répartition spatiale, rendement, marge brut, rotation, aide PAC.
Culture Intermédiaire	
Jachère	
Prairie	
Aménagement Hydraulique douce	Nombre, Localisation.
Sol Bâti	Localisation, Nombre de ha.
Routes	Terres déposées.
Eau (ruisselé, nappe ou de rivière)	Ravinement, fréquence, quantité, turbidité, indice biologique

3) Quelles sont les principales dynamiques en jeu ?

Dans la réponse donnée par les participants, les dynamiques en jeu correspondent majoritairement à des dynamiques biophysiques, comme le montrent les propositions suivantes :

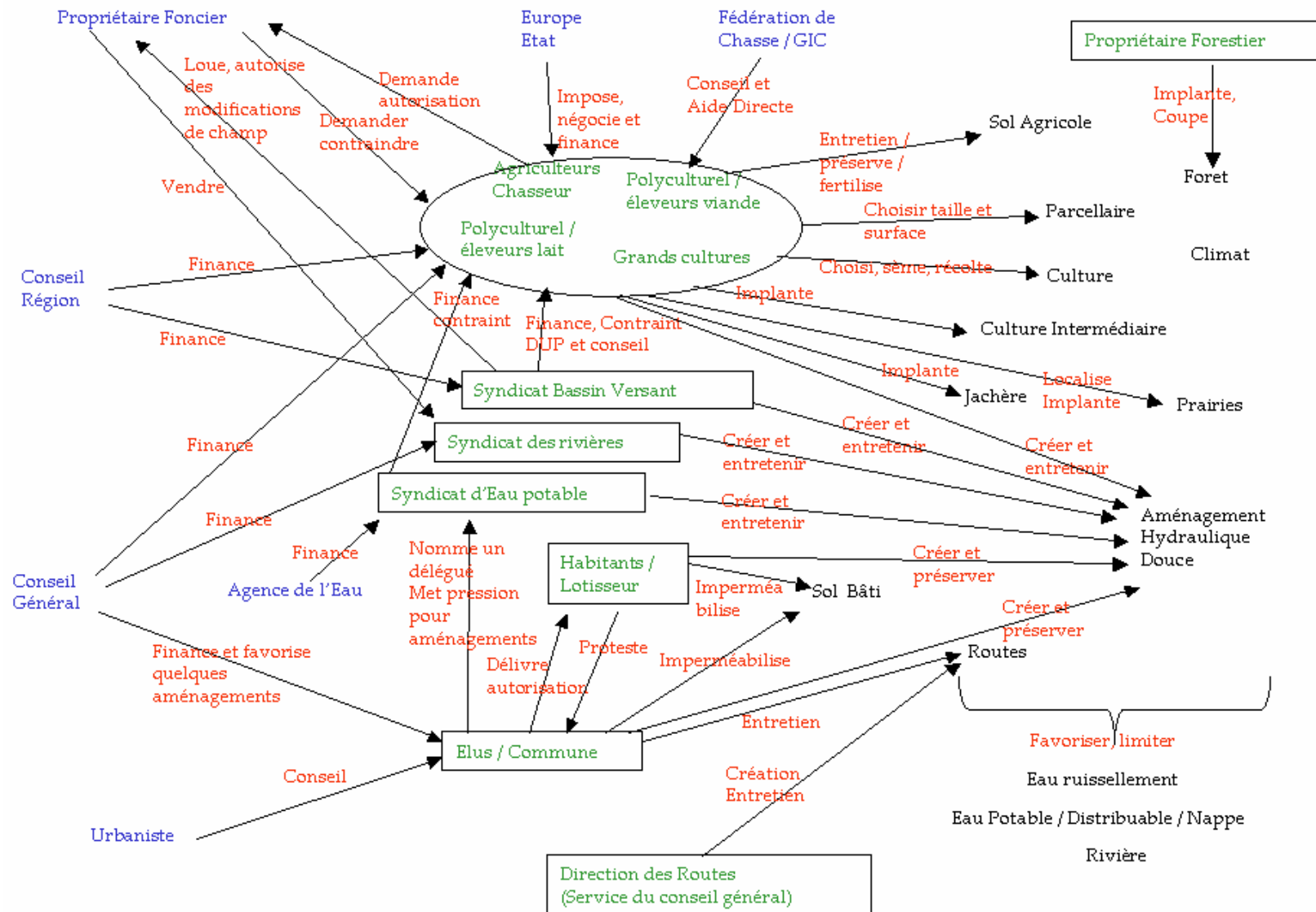
- Ruissellement et Erosion, qui se manifeste par le développement de ravines et par la perte ou l'accumulation de terres.
- Rétention des écoulements à travers l'implantation d'aménagements hydrauliques.
- Détermination de l'occupation du sol selon les cultures implantées (inclut les cultures intermédiaires).
- Conditions Climatiques.
- Organisation du Travail Agricole (sens du travail, itinéraire technique, définition de secteur labourable ou non labourable). Bien que cette dynamique ne corresponde pas directement à une dynamique biophysique, elle a été amenée dans la discussion suite à son influence sur les paramètres physiques du sol au moment d'un événement pluvieux

4) Comment chaque acteur retenu utilise ces ressources et modifie ces dynamiques ?

Ensuite, nous avons établi les interactions entre les acteurs eux-mêmes et les ressources, afin d'expliquer les dynamiques identifiées autour du problème de ruissellement érosif. Au cours de cette phase, les participants ont été confrontés à des problèmes de justification de leur choix d'affectation de certains acteurs dans les deux catégories proposées (direct ou indirect). Par exemple, l'Agence de l'Eau a été placée tout d'abord comme un acteur direct mais après avoir révisé ses comportements, des verbes qui ne sont pas associés à des actions directes sur le terrain comme « conseiller », « financer » ont été prononcés par les participants, ce qui a provoqué son transfert vers le groupe des acteurs indirects.

Après avoir réalisé une révision complète du modèle conceptuel, nous sommes arrivés à une formalisation du système à travers un diagramme (Figure N°4.1), où nous différencions les acteurs direct (en vert), les acteurs indirects (en bleu), les ressources (en noir) et les interactions (en rouge).

Figure N°4.1
Diagramme de Représentation du Système



5) Quelles sont les échelles d'espace et de temps à prendre en compte ?

Les participants ont manifesté explicitement la nécessité que l'outil, et donc ses échelles d'espace et de temps soient analysées en relation avec la décision culturale.

En ce qui concerne l'échelle spatiale, le premier aspect à considérer est que la décision des agriculteurs est prise au sein de l'exploitation agricole, ce qui a des conséquences directes au niveau de chaque parcelle. Le maire et le syndicat observent, quant à eux, les résultats au niveau du bassin versant. Cette situation induit la définition de deux échelles spatiales d'analyse du ruissellement, d'une part, la parcelle et, d'autre part, le bassin versant pour visualiser les problèmes à un niveau plus englobant.

Quant à l'échelle temporelle, les participants ont explicité le besoin de garder une relation entre l'échelle de temps défini dans la modélisation et le temps de la décision agricole de manière à faire coïncider l'évaluation des problèmes de ruissellement érosif avec les moments de décision (ou de révision de la décision) agricole afin de mieux respecter les conditions de réactivité des agriculteurs.

Mais il est considéré aussi important par les acteurs que la durée totale de la simulation permette d'analyser au moins une période de rotation culturale complète, définie sur 6 ans, ce qui permettra d'évaluer l'apprentissage acquis par les agriculteurs quand ils auront la possibilité de revenir une deuxième fois sur une décision déjà prise.

Un autre aspect significatif pour les acteurs est que le modèle SMA doit montrer des résultats « parlants » pour eux. Le défi est donc de trouver certains éléments (paramètres) parmi les facteurs qui motivent la prise de décision pour représenter les résultats individuels et collectifs au cours des années.

4.5 Incorporation dans le Modèle Conceptuel des Éléments Identifiés

Un des principes généraux de la démarche a été de promouvoir la participation active et large de tous les acteurs avec le but de réaliser une représentation unanimement partagée. Cela nous a amené à créer une définition assez large du système où il a été inclus un nombre important d'acteurs et d'interactions (Figure N°4.1).

Compte tenu de cette situation et de l'objectif de la modélisation d'accompagnement qui est de créer un outil simplifié permettant son appropriation de la part des acteurs, nous avons réalisé quelques simplifications pour la définition d'un prototype informatique. Elles pourront à tout moment être remises en cause en accord avec l'évolution du système, comme cela est signalé dans les préceptes de la démarche ComMod (Collectif ComMod, 2005).

4.5.1 A propos des acteurs

La première décision a été de considérer dans la modélisation uniquement les acteurs directement impliqués dans la génération du problème de flux érosifs, à partir de la co-construction réalisée. Néanmoins, les actions qui sont susceptibles d'être réalisées par les acteurs indirects peuvent être incorporées comme des contraintes aux comportements des acteurs directs.

Ensuite, dans cette première phase du processus d'apprentissage collectif, nous avons centré la discussion sur des dynamiques qui ont une signification importante dans la zone d'étude et qui mobilisent un nombre important d'acteurs directs identifiés précédemment. Le résultat a été le suivant:

- Les dynamiques liées à l'urbanisation et à la forêt, qui n'ont pas une grande présence dans les bassins versants agricoles que nous analysons, n'ont pas été considérées dans ce modèle.
- Compte tenu de l'objectif de fiscalisation d'infrastructure publique qui motive le comportement de la Direction de Routes présent aussi au niveau des autorités de commune, comme le maire, nous avons incorporé le rôle de la Direction de Route à celui du maire.

Avec ces considérations le modèle considère les acteurs directs suivants:

1) Agriculteurs

L'agriculteur est un acteur essentiel dans la dynamique de ruissellement car ses actions ont des conséquences directes sur le comportement hydrique des terres. D'après ce que nous avons perçu au cours de l'atelier de discussion, les agriculteurs ont une certaine conscience de leur rôle par rapport à ce problème écologique mais ils éprouvent de grandes difficultés à participer activement à la mise en œuvre des solutions pour maîtriser le ruissellement en raison des marges de manœuvre étroites qu'ils possèdent en termes de temps et d'investissement.

Il faut considérer que la motivation principale d'un agriculteur est la maximisation de son bénéfice économique à la fin de la saison, ce qui lui permettra de satisfaire ses besoins généraux. Cette rationalité économique marque ses comportements en l'amenant vers la recherche d'un choix cultural optimal qui ne correspond pas forcément à la meilleure décision en termes de contrôle de ruissellement.

Selon les informations récupérées au cours de la réunion et dans la littérature spécialisée, les choix culturaux en Haute Normandie sont assez diversifiés avec un important développement des cultures d'hiver (blé, colza, escourgeon) et des cultures de printemps (pois, lin, pommes de terre, betteraves) destinées à la vente mais aussi des cultures fourragères comme le maïs, le ray-grass, la prairie qui servent à l'alimentation des animaux d'élevage pour la production du lait et de la viande.

Etant donné que chaque activité productive implique une gestion spécifique et différente des terres, il a été considéré comme nécessaire par les participants à la réunion de différencier l'acteur «Agriculteur» selon le type d'activité économique, tel comme il est montré ci-après:

- *Les agriculteurs de Grande Culture (AGC)*: Dans ce groupe, nous avons inclus tous les exploitants des terres qui basent l'essentiel de leur revenu sur les cultures de vente.
- *Les agriculteurs polyculteurs / éleveurs de bovins laitiers (APEL)*: Un deuxième type d'agriculteur existante dans la région est représenté par ceux qui élèvent un troupeau de vaches laitières et qui simultanément cultivent leur terre avec des productions végétales destinées à la vente et/ou à l'alimentation du troupeau.
- *Les agriculteurs polyculteurs / éleveurs de bovins viandes (APEV)*: Finalement, le troisième type correspond à une variation du type précédent, il s'agit d'exploitants qui distribuent leur temps entre les polycultures et l'élevage de bovins, mais dans ce cas là, le troupeau est destiné à la production de viande.

Dans cette différenciation, il a été important de séparer les agriculteurs/éleveurs en deux types (APEL et APEV) pour refléter dans la modélisation deux comportements différents par rapport à la gestion d'une exploitation agricole et notamment de la prairie. Dans le cas des APEL par exemple, le troupeau destiné à la production laitière doit être nourri à proximité de la ferme pour que la traite puisse être réalisée aisément, ce qui définit l'emplacement des prairies pâturées sur les parcelles à proximité des

bâtiments d'élevage. Pour les troupeaux des APEV, cette contrainte n'existe pas ce qui laisse une plus grande liberté dans la prise de décision sur l'assignation des cultures aux parcelles.

Par ailleurs et par rapport aux types d'élevage identifiés, dans la réunion nous n'avons pas considéré d'autres activités d'élevage existante dans la région, par exemple porcine et avicole, parce qu'elles réalisent des travaux hors sol agricole, ce qui n'a pas d'influence sur le résultat global de ruissellement.

2) Syndicat de Bassin Versant (SBV):

Le quatrième type d'acteurs considéré dans le système est une institution intercommunale, appelée Syndicat de Bassin Versant, créée en 2000 pour organiser la lutte contre les ruissellements et les inondations. Cette création a été ordonnée par le préfet suite aux inondations catastrophiques de l'année 1997 ayant entraîné trois morts dans le département de la Seine Maritime.

Lors de la réunion, nous avons repéré la série d'actions liées au problème du ruissellement qui peuvent être effectuées par un syndicat de bassin versant. Entre autres, il détermine les problèmes de ruissellement, identifie les zones les plus exposées au risque d'érosion en faisant réaliser une étude hydraulique du bassin versant par un bureau d'étude. Compte tenu de ces données, le SBV essaiera de sensibiliser les agriculteurs sur les conséquences que leurs décisions et actions ont sur la génération de flux érosif et, dans certains cas, recommande la mise en œuvre d'aménagements hydrauliques. Dans ce dernier cas, il peut être amené à acquérir les terres nécessaires à l'implantation des ouvrages (achat, vente ou expropriation).

Dépendant du bassin versant, ce type de syndicat peut coexister avec d'autres types de syndicat aussi identifiés dans la représentation élaborée, comme le syndicat de rivière et le syndicat d'assainissement.

Dans le contexte de simplification du modèle, nous avons rassemblé les différents types de syndicats cités en une seule catégorie «Syndicat de Bassin Versant» comme une manière de représenter un ensemble de ces institutions (soit-il de rivière, d'assainissement, ou de bassin versant) à travers celle qui est la plus englobante. Bien qu'il s'agisse d'institutions différentes s'occupant d'objets différents (la gestion de l'eau potable, de la rivière ou la gestion intégrale du bassin versant, selon le cas) les types d'action qu'elles mènent (identifier, conseiller, financer et construire d'aménagements) et les sources de financements sont assez similaires, ce qui justifie notre décision. Néanmoins, selon le cas d'application il est possible d'adapter le rôle de syndicat, en faisant une spécialisation dans les différents types signalés pour préciser certains comportements spécifiques.

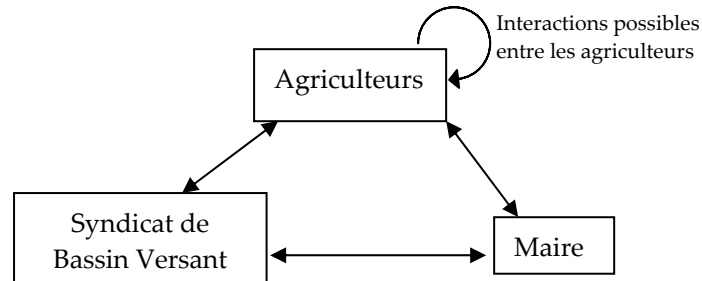
3) Maire:

Enfin, le cinquième type d'acteurs identifié correspond à l'autorité communale qui a parmi ces responsabilités celle d'assurer la sécurité de la population face au problème des inondations et de réaliser une gestion économique optimale pendant le temps de son exercice. Ce but économique concerne aussi le problème de ruissellement érosif car le maire de commune est fortement intéressé par la réduction des coûts de nettoyage des infrastructures publiques à cause d'écoulements boueux.

Concrètement, ses actions sont portées plutôt sur la réglementation et le contrôle. En regardant les résultats de l'activité agricole sur le bassin versant, le maire peut obliger les agriculteurs à garder les aménagements existants, par exemple les haies. Mais il peut aussi avoir un comportement plus actif en prenant la décision d'acheter avec des fonds communaux certains terrains critiques pour construire des ouvrages de protection.

En résumé nous avons cinq types des acteurs qui interagissent entre eux (Figure N°4.2) selon des règles de comportements qui seront détaillées dans le chapitre suivant.

Figure N°4.2
Schéma Général des Interactions entre les acteurs.

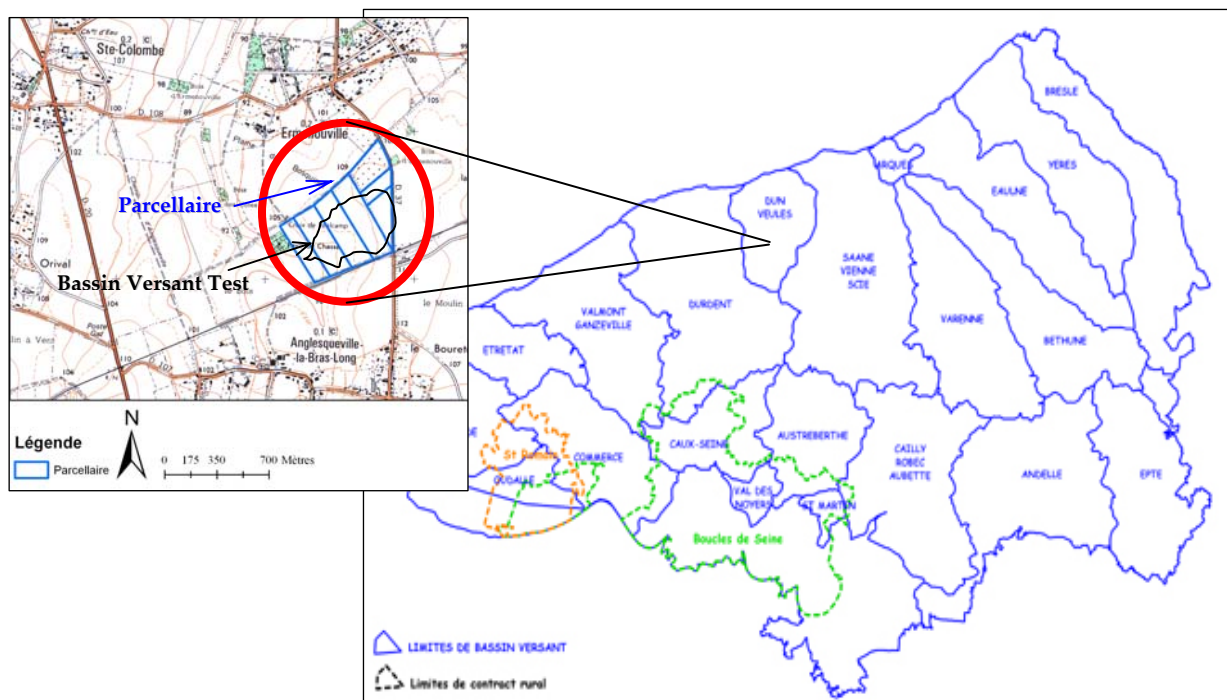


4.5.2 A propos de l'espace

En prenant en compte les deux échelles spatiales identifiées précédemment, le bassin versant et la parcelle, nous avons décidé de réaliser une première application du modèle sur un sous bassin versant réel ayant une surface de 20 ha situé au sein du grand bassin versant de Dun, Haute Normandie, (voir Figure N°4.3), déjà utilisé dans d'autres analyses antérieures (Souchère V., 1995). Cela nous permet d'avoir les données nécessaires pour la réalisation du modèle, sa calibration et la validation de ses résultats.

Ce bassin versant test est inclus dans la surface décrite par sept parcelles agricoles regroupées dans un parcellaire. Il faut rappeler qu'un bassin versant est une unité hydrographique qui identifie un système hydrologiquement clos en termes d'écoulements et ne correspond pas forcément à la même délimitation qu'un parcellaire résultant d'une définition administrative établissant les unités d'exploitation agricole (Figure N°4.3), tel que cela s'avère dans notre cas d'étude.

Figure N°4.3
Parcellaire et Bassin Versant Test utilisés pour la modélisation.



Chapitre 5: L'implémentation du Modèle RuissellErosif.

5.1 L'Outil : CORMAS.

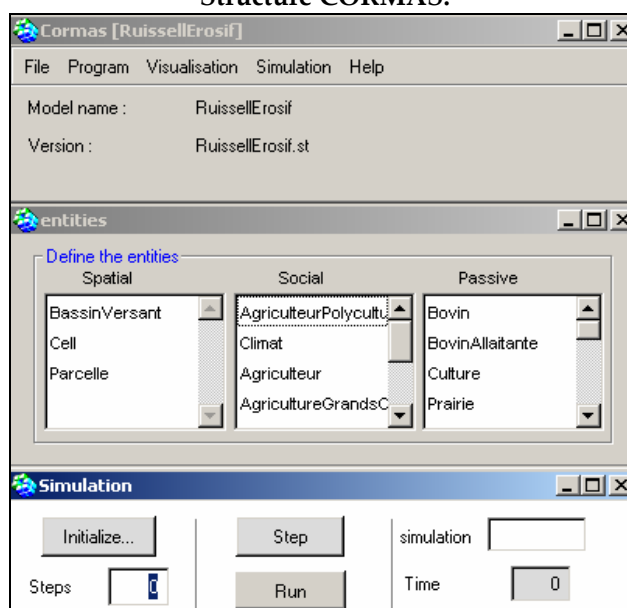
Pour l'implémentation de la problématique d'érosion nous avons décidé d'utiliser la plate-forme CORMAS¹ (Common-pool resources and multi agents system). Cet environnement de programmation a été créé par l'équipe du CIRAD-GREEN pour la construction de modèles de simulation multi-agents, et notamment pour modéliser la gestion des ressources renouvelables [Bousquet et al., 1998]. Après dix ans d'existence, CORMAS possède une nombreuse communauté d'utilisateurs qui assurent sa maintenance et son développement.

Les modèles élaborés sous CORMAS permettent, à l'instar d'un automate cellulaire de décrire et simuler les comportements des agents, l'environnement dans lequel ils évoluent et sur lequel ils agissent et les interactions existantes entre eux quand ils exploitent des ressources communes.

L'environnement de développement de CORMAS est VisualWorks et la programmation est écrite sous le langage SmallTalk, un des premiers langages de programmation orientée-objet (object-oriented programming, OOP). Dans ce langage tout est considéré comme des objets communiquant entre eux à travers de l'envoi de messages.

Cette structure simple est un des plus grands avantages de ce langage, ce qui fait de lui un outil facile à apprendre pour des personnes n'ayant pas de solides connaissances en programmation. En tant qu'autres avantages, nous pouvons citer l'accessibilité et la flexibilité, deux caractéristiques directement liées au fait que CORMAS peut être considéré comme un logiciel type *open source*², c'est à dire, qui a une libre redistribution, un code source disponible et des travaux dérivés possibles. Au sein de CORMAS, il existe déjà une architecture et des protocoles prédéfinis (Figure N°5.1) qui ont été conçus pour être utilisés comme structure de base par les modélisateurs. Cependant, elle peut être adaptée selon les caractéristiques des interactions et des dynamiques du cas à traiter.

Figure N°5.1
Structure CORMAS.



¹ <http://CORMAS.cirad.fr>

² http://fr.wikipedia.org/wiki/Open_source

5.2 Les Etapes de Construction d'un Modèle avec CORMAS.

Dans la définition d'un modèle CORMAS, il faut d'abord définir les entités qui vont constituer le modèle, ce qu'on appelle *Structure Statique du Modèle*. Elle permet de représenter les différents agents, les ressources et autres éléments du système modélisé. Il s'agit d'entités informatiques hiérarchisées et caractérisées par un état interne, capables de faire évoluer cet état en activant des méthodes et pouvant communiquer par l'envoi de messages.

La seconde étape, appelée *Structure Dynamique du Modèle*, concerne la définition d'un contrôle et d'un ordonnancement des activités de ces entités (Scheduler, en anglais). En fait, lors d'une simulation classique sous CORMAS, il existe une méthode de contrôle global, automatiquement exécutée à chaque pas de temps³, qui revient à décrire un ordre hiérarchique d'exécution de toutes les méthodes d'évolution de chacune des entités du modèle au cours d'un certain temps.

Enfin, la dernière étape consiste à définir la *Visualisation de l'Information*, à travers la définition de ce que la plate-forme appelle "points de vue" sur les entités permettant d'observer le déroulement et les résultats des simulations. On peut ainsi obtenir l'affichage d'une grille spatiale colorée, d'un ensemble de graphiques ou bien d'une représentation des envois de messages réalisés par les agents pendant la simulation.

Après avoir considéré ces antécédents, nous avons procédé à l'implémentation d'un modèle nommé « *RuissellErosif* » inscrit dans la démarche d'accompagnement qui a comme but d'aider au processus de décision collective, en permettant aux usagers de percevoir et comprendre autrement le système socioécologique auquel ils appartiennent. Or, le modèle ne se présente pas comme un outil pour la prédiction de futurs résultats de gestion, il se centre plutôt dans le processus de décision.

5.3 Structure Statique du Modèle RuissellErosif.

Suivant la représentation imagée d'un système multi agents qui considère des agents situés sur un environnement agissant avec lui et ses objets (Figure N°3.2), nous pouvons distinguer les types d'entités du système suivants:

5.3.1 L'environnement et l'échelle spatiale de la zone d'étude.

Comme environnement nous considérons l'espace physique ayant une série de caractéristiques qui donnent le cadre aux actions des agents. La représentation élaborée de cet espace en tant qu'un automate cellulaire permet d'estimer l'évolution de son état selon les résultats de ses comportements à des stimuli précis.

Dans l'analyse du problème particulier d'érosion hydrique et des différentes dynamiques associées, nous avons défini précédemment deux différentes échelles spatiales qui permettront de travailler sur différents niveaux d'analyse, le bassin versant et la parcelle. Cependant, il existe certains phénomènes qui imposent une définition plus rigoureuse permettant de mieux estimer les différents états du système. Avec cet approfondissement dans la structure spatiale nous arrivons finalement à une définition d'espace modélisé composé de la manière suivante :

³ Un pas de temps correspond à la plus petite unité de temps durant laquelle toutes les entités sont susceptibles d'évoluer.

5.3.1.1 Composition de l'espace

Au niveau global, l'échelle d'analyse du problème des flux érosifs est le bassin versant. Au sein de cette unité hydrographique, considérée comme *l'unité spatiale d'évaluation*, il est possible de trouver de diverses parcelles agricoles. La parcelle de son côté, correspond à l'échelle sur laquelle les agriculteurs mettent en pratique sa décision culturale à chaque saison, constituant ce que nous appelons *l'unité spatiale de décision*. Dans ce cas d'étude, l'ensemble des parcelles appartenant à un agriculteur constitue ce qu'on appelle l'exploitation agricole et ensuite l'ensemble de ces exploitations agricoles forme le parcellaire d'analyse (Figure N°5.1), qui se transforme en la plus grande unité de surface.

Dans le contexte spatial il n'existe pas forcément une coïncidence en termes de surface entre les unités «bassin versant» et «parcellaire» dû à la nature différente, dans un cas hydrographique et dans l'autre administrative-foncière. Concrètement, dans notre cas d'étude le bassin versant test utilisé dans la modélisation est compris complètement dans le parcellaire d'étude (Figures N°5.2).

Un troisième et dernier niveau dans l'échelle spatiale a été défini en vue de préciser l'analyse de la dynamique de ruissellement. L'unité parcelle a été divisée en des unités plus petites, la cellule, considérée elle comme *l'unité spatiale élémentaire* où nous calculerons les résultats du processus.

Figure N°5.1
Structure Spatiale du Modèle.

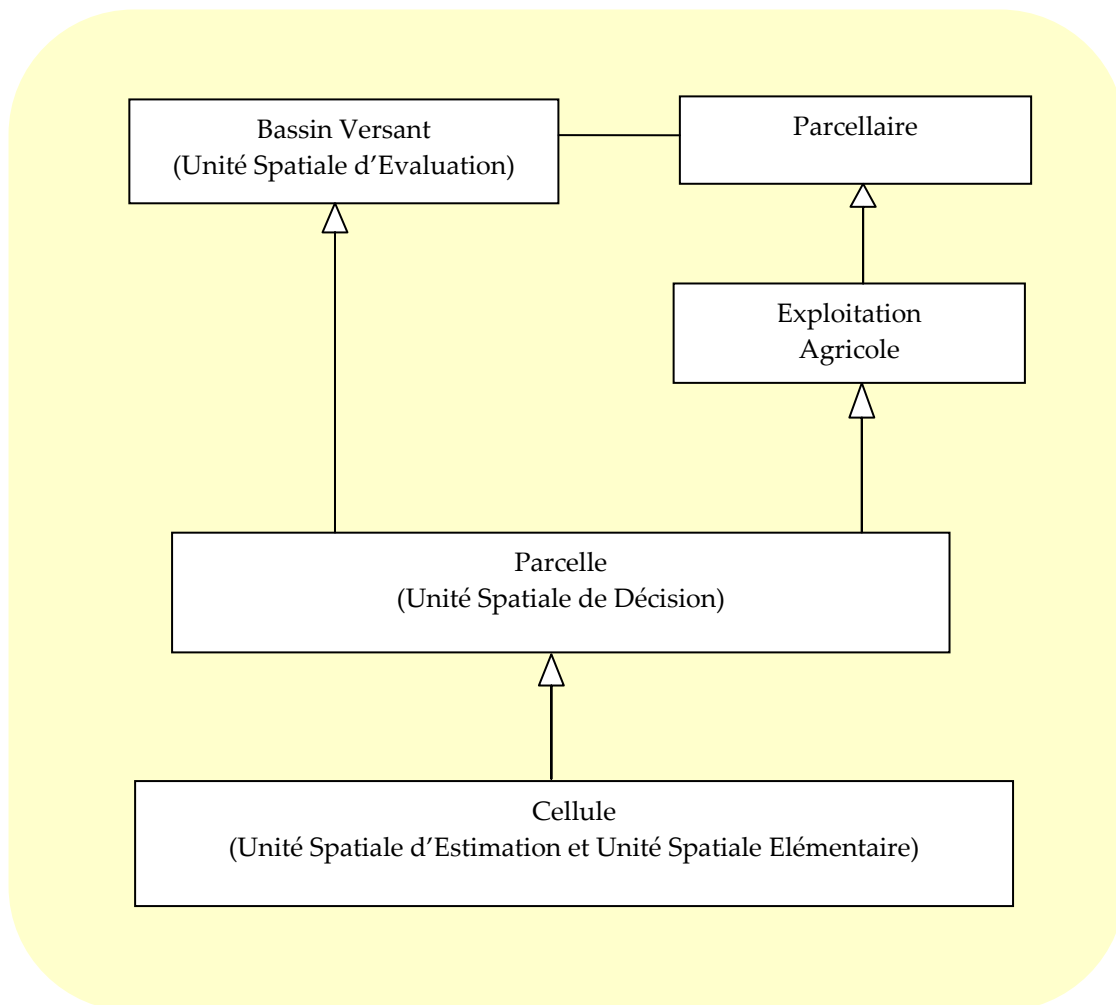
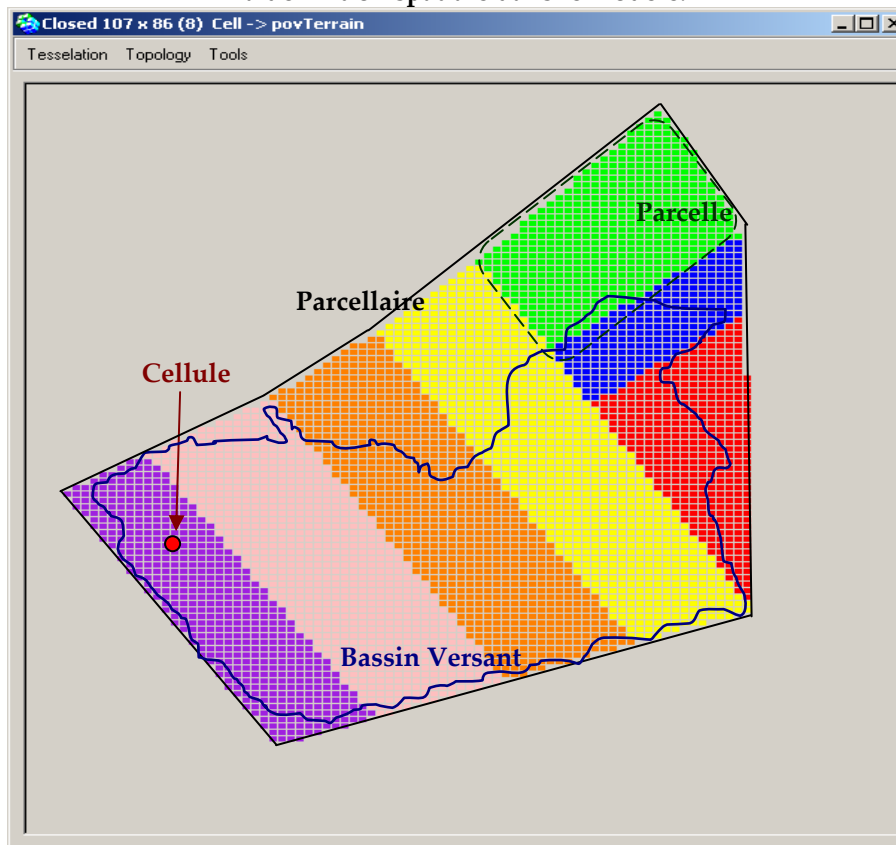


Figure N°5.2
La définition spatiale dans le modèle.



Cette définition de l'espace du modèle est partie des deux hypothèses. La première consiste à dire que toutes les parcelles constituant l'exploitation agricole de chaque agriculteur sont incluses au moins de manière partielle dans le bassin versant analysé, ce qui nous permettra dans tous les cas d'influencer la dynamique de ruissellement dans le bassin versant.

La deuxième hypothèse de la modélisation considère que la totalité de l'espace d'analyse appartient exclusivement aux acteurs représentés dans le problème, cela implique qu'il n'existe pas des secteurs interstitiels sans propriété définie ou avec un propriétaire absent dans la discussion. Cela permettra de renforcer le concept d'une discussion « fermée », poursuivi aussi avec la première hypothèse décrite, qui propose de créer des interactions exclusivement entre les acteurs du système modélisé.

- a) Bassin Versant: L'intérêt de la définition de cette unité spatiale a été l'évaluation globale de résultats de ruissellement calculés dans de niveaux inférieurs de l'échelle spatiale, ceux des parcelles et de cellules.
- b) Parcelles: Nous avons défini différents attributs et comportements qui expliquent l'évolution de son état. Parmi les attributs considérés nous pouvons distinguer: le numéro identificateur de la parcelle, le propriétaire de la parcelle, la culture cultivée dans la saison précédente, l'occupation du sol qui est défini à partir des cultures, du travail du sol ou de la destination possible comme chantier de récolte.

En termes de comportements, nous avons établi des méthodes liées à la détermination de l'occupation du sol, le calcul cumulé de ruissellement selon l'état de la surface au moment de l'événement pluvieux et l'estimation de la production agricole à la fin de la saison.

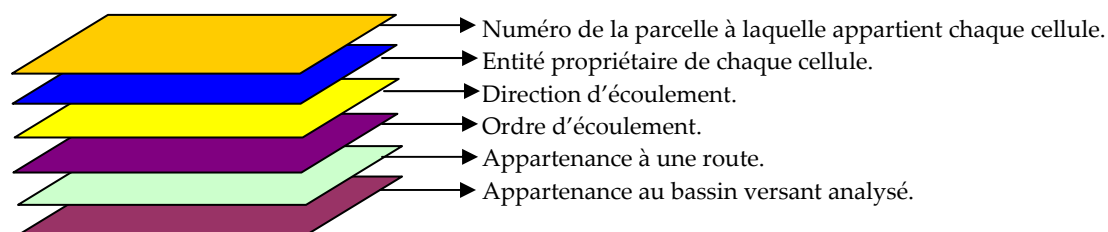
c) Cellules: Dans le modèle chaque cellule possède une série de méthodes (ou fonctions) qui caractérisent ses comportements réalisés pendant une saison culturale. Parmi elles, nous distinguons l'évaluation de la production agricole et la détermination du ruissellement érosif. Ce dernier a été calculé à partir de la définition du réseau d'écoulement et le calcul du bilan entre l'infiltration et le ruissellement.

Pour la réalisation de ses actions, le modèle évalue d'abord l'état dans lequel l'entité « cellule » se trouve au moment de sa réalisation. Cette évaluation est faite à partir des valeurs des différents attributs caractérisant l'entité. Parmi eux, nous distinguons la taille de la cellule, qui a été le résultat de la définition de la grille spatiale du modèle (surface égale à 100 m² (10m x 10m)). Un autre groupe des attributs a été défini permettant de caractériser les ruissellements: la direction d'écoulement de la cellule, l'ordre dans lequel la cellule s'écoule par rapport aux autres, la définition de la cellule voisine qui reçoit les écoulements versés, l'occupation du sol, la capacité d'infiltration, la pluie d'imbibition, le bilan entre l'infiltration et le ruissellement. Certains parmi ces paramètres ont été définis à partir d'un couplage avec le modèle biophysique STREAM.

5.3.1.2 Le couplage avec l'outil biophysique STREAM

Pour la définition de la carte physique qui représente l'environnement, nous avons utilisé l'information résultante de la construction du modèle STREAM sur le bassin versant analysé. Ainsi, nous avons fusionné les différentes couches d'informations qui proviennent de l'analyse réalisée dans le système d'information géographique sur lequel a été implémenté STREAM afin de créer un fichier environnemental, appelée «ParcellaireTest.env» qui sera ultérieurement pris en compte par le modèle SMA. Les différentes couches d'informations considérées dans le couplage qui représentent certains attributs des cellules sont:

Figure N°5.3
Les couches d'information



5.3.1.3 Les objets de l'environnement

En élargissant la définition d'environnement dans la modélisation de système multi agents, il existe des entités du système représenté appelées «les objets de l'environnement». Il s'agit d'entités passives véhiculant de l'information qui seront intégrées par les autres entités, notamment les agents.

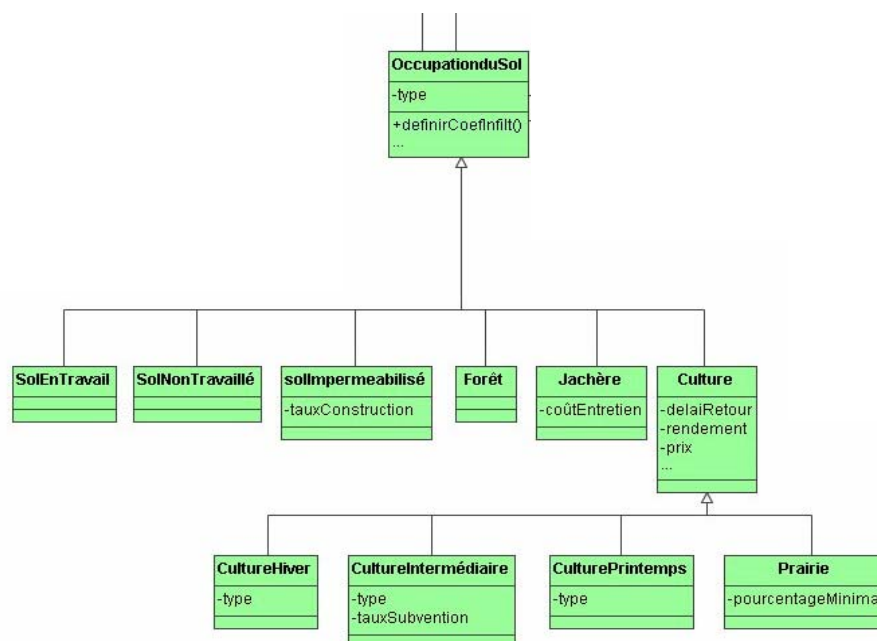
Au sein de ces entités, nous pouvons différencier parmi d'autres, l'occupation du sol, les cultures, les bovins, les aménagements hydrauliques. Chacun de ces objets a ses propres attributs et méthodes qui ont été incorporés directement au modèle en considérant les données réelles obtenues auprès des institutions compétentes, notamment la Chambre d'Agriculture de Seine Normandie.

- Occupation de Sol: Selon les caractéristiques de la parcelle et les activités réalisées sur celle-ci, il peut exister différents types d'occupation du sol imposant des conditions variées d'infiltration des terrains au moment de l'événement pluvieux (Figure N°5.4). Les caractéristiques d'une

parcelle font référence au concept de « fonctionnalité » au sein du bassin versant définissant si la parcelle correspond à un terrain agricole (cultivée ou laissée comme jachère), un terrain avec le sol imperméabilisé, ou même une forêt.

Dans le cas où la parcelle a été destinée à la production agricole, l'occupation du sol est définie selon les activités réalisées. Par exemple si la parcelle est cultivée, il existe différents types de cultures possibles à semer (culture d'Hiver, culture de Printemps, culture Intermédiaire ou prairie) avec des comportements différents par rapport à la pluie. A contrario, si la parcelle n'est pas cultivée il est possible trouver un éventail d'autres possibilités, soit un travail du sol est réalisé pour préparer la prochaine saison avec différents types de labour, comme le déchaumage, soit la parcelle est utilisée comme chantier de récolte de la production de la saison précédente.

Figure N°5.4
Schéma de l'occupation du Sol dans le modèle RuissellErosif



Chaque état de surface possède des attributs qui caractérisent ses comportements par rapport aux dynamiques analysées. Notamment, par rapport à la capacité d'infiltration du sol nous avons utilisé les antécédents proportionnés par la thèse d'Alexandre Joannon (Joannon A., 2004a) :

Tableau N°5.1
Infiltration Potentielle (IP) du Sol en Haute Normandie
au cours du mois de Décembre (saison d'Hiver)

Occupation du Sol/ Itinéraire Technique	IP [mm/h]
Semis de blé, escourgeon, colza	2
Chantier de 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
Semis de moutarde après autres cultures	10

Tableau N°5.1 (Suite)
Infiltration Potentielle (IP) du Sol en Haute Normandie
au cours du mois de Décembre (saison d'Hiver)

Occupation du Sol/ Itinéraire Technique	IP [mm/h]
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

Tableau N°5.2
Infiltration Potentielle (IP) du Sol en Haute Normandie
au cours du moi de Mai (saison de Printemps)

Occupation du Sol/ itinéraire Technique	IP [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

- **Cultures:** En complément à la définition de l'occupation du sol et la détermination de sa capacité d'infiltration, nous avons considéré nécessaire de modéliser un objet spécialisé appelé «Culture» (Figure N°5.4), comme une manière de connaître son comportement pendant l'année en termes de ruissellement mais aussi par rapport à la production agricole et son interaction avec les agents propriétaires des parcelles où elle a été semée.

Afin de caractériser les attributs de ces cultures, nous avons estimé les marges brutes économiques en utilisant les données suggérées par la Chambre d'Agriculture (Annexe N°2) concernant les valeurs de rendements de production de chaque culture, le prix moyen par année en conditions climatiques normales et les coûts totaux de production.

Tableau N°5.3
Données estimées de production de cultures en Haute Normandie
dans de conditions climatiques normales

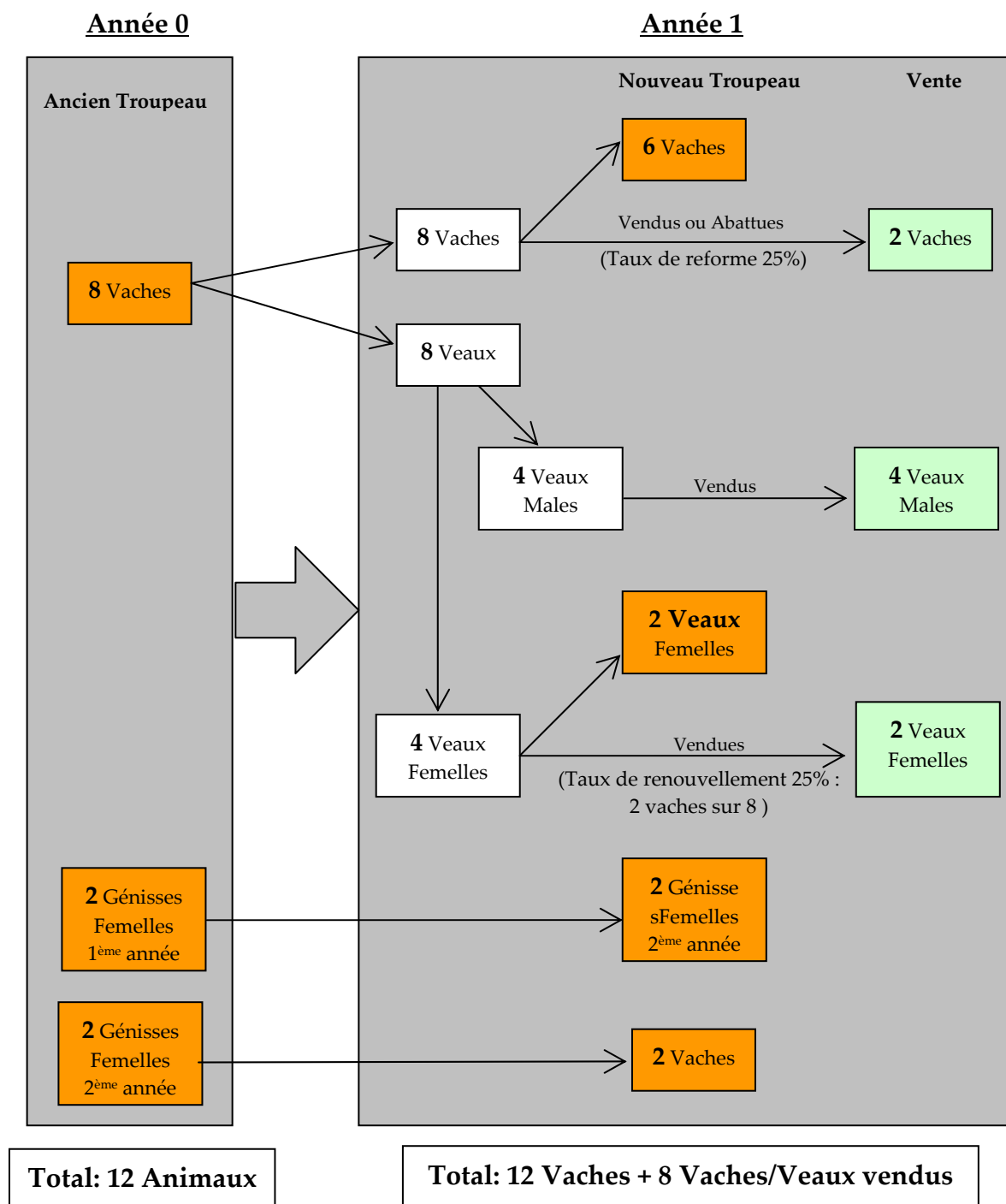
Culture	Rendement [Q/ha] (1)	Prix [€/Q] (2)	Cout Production ⁴ [€/ha] (3)	Marge Brut [€/ha] (4) = (1)*(2) – (3)
Blé	85	10	339	511
Colza	38	21	340	458
Escourgeon	70	9	302	770
Maïs	85	11	375	560
Betterave Sucrière	65	36	610	1730
Lin	70	34 ⁵	420	1960
Pois	60	12	366	354
Pomme de Terre	40	76	1390	1650

⁴ Inclut le cout de semence, de fertilisation, insecticide, désherbage, régulateur fongicide ficelle.

⁵ Le prix de marché du lin est caractérisé pour une variabilité importante.

- **Bovins** : Les bovins formant le troupeau de chaque agriculteurs/éleveur ont été différenciés selon la fonction productive en bovins laitiers et allaitants. Dans la représentation simplifiée du système productif animal qui a été implémentée dans le modèle nous avons considéré un troupeau initial de 12 animaux qui est composé par 8 vaches (soit laitière ou allaitante), 2 veaux femelles et 2 génisses de deuxième année. Le troupeau est considéré stable en nombre d'animaux mais avec un taux de renouvellement du troupeau de 25%. Cela suppose que les agriculteurs/éleveurs gardent seulement le nombre de veaux femelles correspondant à ce taux là et ils vendent les veaux femelles excédants et la totalité de veaux males (Figure N°5.5).

Figure N°5.5
Schéma de l'Evolution d'un Troupeau



Pour la détermination des valeurs des attributs du troupeau, comme les besoins alimentaires, le rendement de production, parmi autres, nous avons obtenu des chiffres réels à partir des documents de la Chambre d'Agriculture établissant les caractéristiques de différents «cas type» d'exploitation bovine dans la région Haute Normandie (Annexe N°2).

Les besoins nutritionnelles annuelles du troupeau varient selon l'âge, la race de l'animal et aussi l'époque de l'année, cependant nous avons considéré de manière simplifiée dans le modèle une valeur moyenne pour tous les animaux du même type (laitière ou allaitante) composée de 6 types d'aliments: l'herbe pâturée, le maïs fourrager, le foin, les aliments concentrés, les céréales et les compléments minéraux-vitaminiques (C.M.V.) (Tableau N°5.4).

Tableau N°5.4
Données estimées de production de cultures en Haute Normandie
dans de conditions climatiques normales

Culture	Coût ⁶	Rendement	Besoin Alimentaires Vache Allaitante	Besoin Alimentaires Vache Laitière
Maïs Ensilé	460 €/ha	11 T MS/ha	1090 kg MS	2280 kg MS
Pâturage	87 €/ha	9.4 T MS/ha	1.06 ha	2780 kg MS
Foin récolté	70 €/ha	4 T MS/ha	-	-
Foin acheté	100 €/T		1470 kg MS	152 kg MS
Tourteau (colza, soja)	0.24 €/kg	-	150 kg brut	860 kg brut
C.M.V.	0.52 €/kg	-	23 kg brut	60 kg brut
Céréales	0.12 €/kg	-	210 kg brut	-

En respectant cette alimentation, la production du lait par vache laitière est estimée en 6440 l de lait par année et dans le cas de vaches allaitantes, cela leur permet d'acquérir un poids d'environ 400 kg en moyenne au moment de l'abattement.

Par rapport au prix de la production du lait sans considérer les aides économiques couplées à la production que l'état donne selon un accord européen, nous avons estimé un prix de 300 € /1000 l. Du côté de la viande nous avons estimé une valeur moyenne de 3 €/kg.

Dans la fonction économique de la production animale il faut aussi considérer les prix des veaux vendus directement la première année. Nous avons considéré un prix moyen estimé de vente de 200 € par tête.

- **Aménagements Hydrauliques:** Dans la construction du modèle nous avons simplifié la définition des solutions d'hydraulique possibles d'implanter, en considérant seulement une bande enherbée ou un bassin de rétention. Au début du modèle, ces aménagements sont caractérisés mais ils ne constituent pas une occupation du sol concrète, ils apparaissent seulement lorsque les acteurs le décident. Donc, nous avons laissé la possibilité d'incorporer manuellement sur la visualisation du modèle, le changement d'état d'une occupation du sol en cas où un aménagement soit défini.

La modification de l'état d'une cellule implique un changement dans la capacité d'infiltration du sol. Dans le cas de l'incorporation d'une bande enherbée nous avons défini une capacité d'infiltration de 50 mm/h et dans le cas d'un bassin de rétention nous avons établi un volume de rétention maximal par cellule de 300 m³, correspondant à une fosse de 3 m dans toute la surface de la cellule impliquée (100 m²).

⁶ Valeurs de prix du marché dans l'année 2004, sans considérer des subventions

Parallèlement à la définition de la capacité d'infiltration ou de rétention il a fallu considérer le coût d'implantation et d'entretien de l'ouvrage. Selon les études analysées (Ouvry J-F., 1992 ; Michaud M. et Bourgain O., 2004) l'enherbement de 10 m de largeur avec une profondeur de 50 cm a un coût estimé de 3.1 €/m³, ce qui se traduit dans un coût de 155 €/par cellule de la grille spatiale du modèle élaboré. Dans le cas du bassin de rétention en supposant une profondeur de 3 m, nous avons estimé une valeur de 2.2 €/m³, qui représente un coût par surface de cellule de 663 €.

5.3.2 Définition des agents du modèle.

Les agents représentent les entités actives du système. En général dans le contexte CORMAS, il existe différents types d'agents: *les agents localisés* qui ont position dans l'espace, *les agents communicants* qui basent leurs actions dans l'émission et la réception de messages avec les autres entités du système formant leur réseau de connaissances et un troisième type qui est une combinaison des deux derniers, il s'agit des *agents communicants et localisés*.

Particulièrement dans la représentation SMA élaborée, nous avons modélisé les 5 types d'agents définis dans l'atelier de discussion présenté dans le chapitre précédent, tous ces agents correspondent à la troisième catégorie dite, des agents communicants et localisés.

5.3.2.1 Type d'agents considérés par le modèle

a) Agriculteurs: Suivant la description déjà faite sur le problème de ruissellement le modèle définit trois types d'agriculteurs. Ils sont propriétaires d'une série de parcelles constituant leur exploitation agricole. Les agriculteurs éleveurs ont un troupeau de 12 vaches destinées soit à la production de lait soit de viande. De plus ils ont une trésorerie pour évaluer les résultats économiques de son activité productive.

La modélisation réalisée sur les comportements des agriculteurs a été définie de manière simple et en accord avec un couplage entre le modèle SMA et un jeu de rôles, ce qui se traduit dans l'externalisation de quelques procédures, notamment celles qui ont un rapport avec la décision agricole, du modèle SMA vers le jeu de rôles. Il est prévu que dans un jeu de rôles, les individus placés dans la situation d'agriculteur prennent les décisions sur l'occupation du sol et l'implantation des aménagements hydrauliques dans chaque saison pour après les incorporer dans le modèle. A partir de cela, nous représentons une partie de comportements des agriculteurs ceux qui sont complétés avec la définition directe dans le modèle des autres actions, comme par exemple l'évaluation que chacun parmi eux réalise sur les résultats économiques de leurs décisions.

b) Syndicat de Bassin Versant: Le syndicat est caractérisé dans le modèle principalement à travers son niveau de perception de la situation globale et de son réseau de connaissances avec lesquelles il peut interagir. Le niveau de perception lui permet d'identifier les zones plus risquées et de définir les endroits critiques où les agriculteurs peuvent installer des aménagements hydrauliques. Le syndicat peut envoyer des messages aux agriculteurs et au maire pour informer de cette situation.

c) Maire: Ses fonctions se limitent à un rôle de contrôle et prévention, qui se manifestent à travers la demande que le maire peut faire auprès des institutions compétentes techniques, comme le syndicat, sur la quantité d'eau qui a ruisselé par le système hydrographique vers l'exutoire, où se situe le village, et la route.

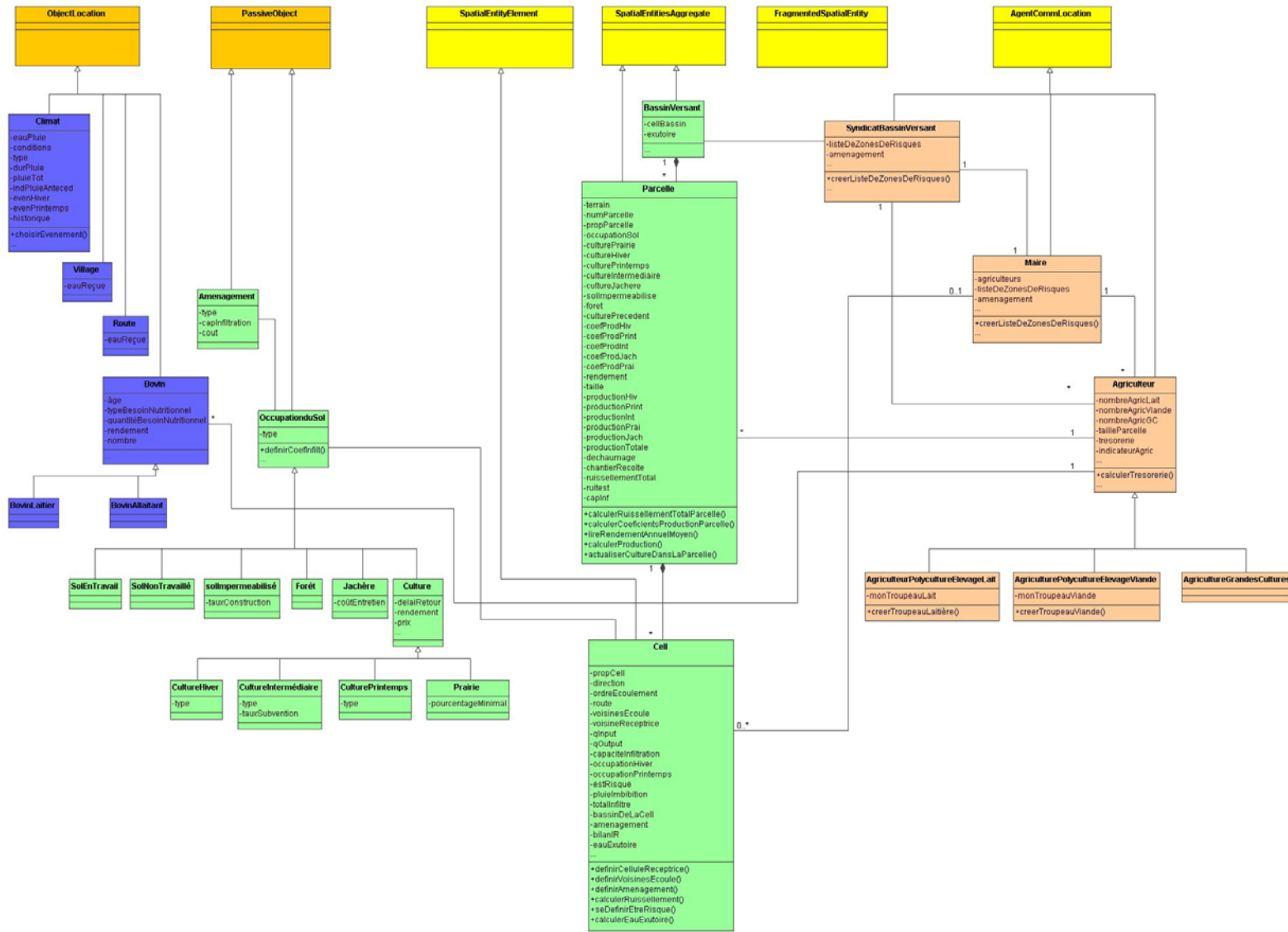
Sa fonction de responsable de la sécurité de la commune lui confère des pouvoirs pouvant limiter les décisions des agriculteurs sur leurs propres terrains privés, en demandant par exemple la

conservation de certains aménagements, sous prétexte de la dénomination de certains endroits comme des secteurs d'utilité publique.

5.3.3 Diagramme statique du modèle

Avec les antécédents sur les agents du modèle, l'environnement et ses objets, nous avons systématisé l'information dans un formalisme UML adaptée à la conception CORMAS (Figure N°5.5) représentant la structure statique du modèle RuissellErosif.

Diagramme UML de Classe



5.4 Structure Dynamique du Modèle

5.4.1 Les échelles temporelles d'analyse

5.4.1.1 La durée de l'analyse: pluriannuel.

En termes d'échelle temporelle, nous avons décidé de refléter, dans cette simulation de système multi-agents couplée avec un jeu de rôles, une dynamique évolutive réalisée sur plusieurs années qui permettra l'apprentissage dans le temps de chaque acteur en acceptant les conséquences des décisions prises.

L'autre avantage de considérer la représentation sur plusieurs années est l'identification des comportements stratégiques que pourraient avoir certains acteurs. Au cours du jeu et avec les informations provenant de l'historique des décisions prises pour chaque acteur, les autorités pourront discriminer entre les comportements des acteurs centrés dans sa situation individuelle et ceux qu'internaliser le problème collectif et procèdent pour améliorer la situation global du système. Cette information sur les comportements des agents face à la gestion d'un problème commun dévoilée par la simulation pourra enrichir une éventuelle discussion entre eux.

Les acteurs invités à l'atelier de discussion réalisé ont souhaité suivre les résultats au moins après une rotation de culture. Donc, nous avons considéré une durée de 6 ans pour l'application de la modélisation dans les jeux de rôles qui seront réalisés, ce qui correspond au délai maximum de retour du lin, une des cultures produites dans la région.

5.4.1.2 Le pas de temps de la simulation : Une campagne culturale.

Le ruissellement érosif dans la région de Haute Normandie est un phénomène permanent, dans le sens où il existe pendant toute l'année la probabilité d'occurrence d'un phénomène de pluie exceptionnelle qui pourra provoquer des dommages. Tel que nous l'avons vu précédemment, il est très sensible aux conditions d'infiltration du sol et notamment de l'état de développement de la croûte de surface (faciès), de la rugosité du sol et du niveau de couverture végétale. Tous ces paramètres sont difficilement prévisibles à tout moment de l'année parce qu'ils dépendent de conditions climatiques incertaines. Cependant, à partir d'une base de données comprenant 4255 relevés d'états de surface sur des parcelles du Pays de Caux observées plusieurs fois par l'INRA entre 1992 et 2000, Alexandre Joannon (Joannon A., 2004a) a analysé la variabilité des états de surface (faciès, rugosité et couvert végétal) au cours de la campagne culturale pour des sols limoneux battants. Il a montré qu'il était possible d'affecter un état de surface probable pour les principales occupations du sol rencontrées en Pays de Caux pour les deux périodes où les états de surface sont très peu modifiés par les différentes opérations culturales : les mois de Décembre et de Mai.

Le choix a donc été fait de réaliser les simulations à ces deux pas de temps qui correspondent également à deux périodes à risque de ruissellement dans la région, puisque la croûte de battance est généralisée sur les parcelles. Le mois de Décembre correspond à une période où tous les travaux du sol et semis d'automne sont déjà effectués et où aucune intervention n'a lieu sur les parcelles pendant 2 ou 3 mois. C'est aussi le mois où les cumuls de pluie engendrent des ruissellements importants provoquant les premiers dégâts. Le mois de Mai correspond lui à une période où tous les semis de printemps sont terminés et où les risques d'orage sont importants alors que les cultures ne couvrent pas encore efficacement le sol notamment les cultures sarclées.

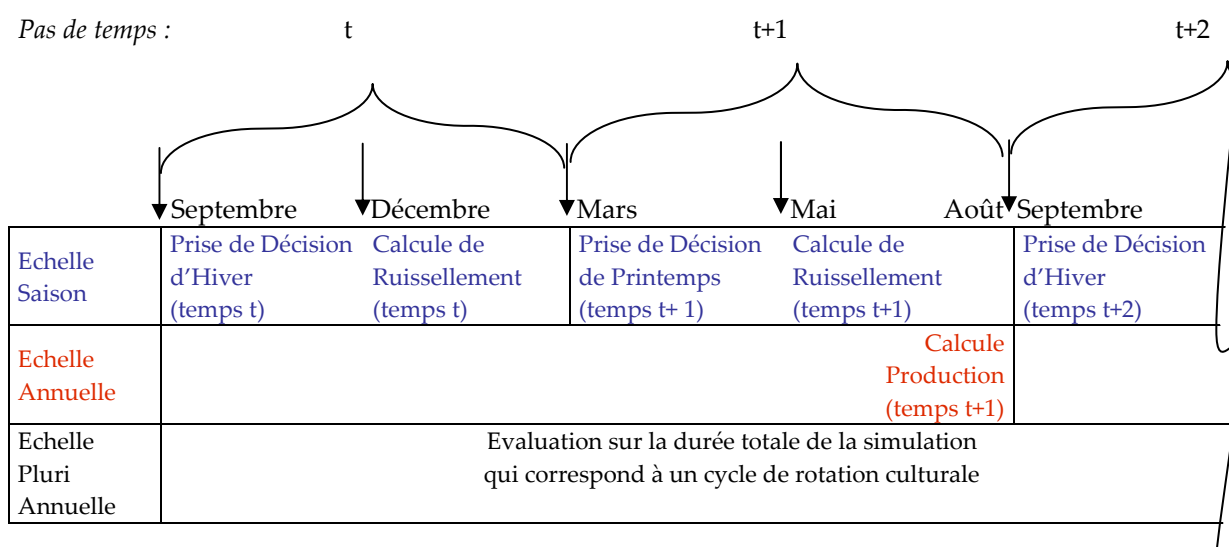
5.4.2 La coexistence des échelles temporelles.

Dans notre modélisation, nous pouvons distinguer trois échelles temporelles qui ont un rapport avec différentes dynamiques. La première échelle (la saison) est associée au pas de temps de simulation concernant la prise de décision sur le choix de culture et, par conséquent, la dynamique de ruissellement érosif généré. Concrètement, avant l'arrivée de la saison d'hiver le modèle doit prendre en compte le choix de culture et ensuite calculer le ruissellement potentiel créé. La même chose est faite pendant la saison de printemps.

La deuxième échelle ou niveau annuel est liée au calcul du bilan économique de l'activité productive pour chaque agriculteur après les deux saisons, ce qui permet de définir les marges de manœuvre financière qu'ils auront pour modifier leurs pratiques culturales afin de résoudre le problème environnemental provoqué.

Finalement, la troisième échelle de temps qu'on peut distinguer dans le modèle est le niveau pluriannuel qui correspond au pas de temps d'analyse associée au délai maximal de rotation culturale fixé à 6 ans et sur lequel nous ferons l'évaluation à moyen terme des comportements des agents.

Figure N°5.6
Echelles temporelles de la modélisation



5.4.3 Initialisation du modèle.

Dans la plate-forme CORMAS, la définition d'un module d'initialisation du modèle est nécessaire pour la suite. Dans notre cas particulier, nous considérons comme point de départ, le mois de septembre, où la terre est nue et prête à accueillir les cultures choisies par les agriculteurs.

Pour l'optimisation du processus de simulation qui sera réalisé a posteriori, il est important de considérer dans le processus d'initialisation, uniquement les dynamiques qui doivent être quantifiées au début de la simulation. Les actions dont les valeurs ne changent pas durant la simulation doivent être définies dans l'initialisation et non pas lors de chaque pas de temps, cela comme une manière d'optimiser le processus de simulation.

Ainsi, les méthodes définies dans l'initialisation du modèle RuissellErosif peuvent se découper en 4 étapes relatives aux entités spatiales, sociales et passives de CORMAS.

- a) Création d'une carte géographique: Capture des couches d'informations données par le logiciel STREAM pour définir la visualisation de la carte géographique de la zone d'étude et caractériser les éléments spatiaux qui la définissent.
- b) Initialisation des Cellules: Définition de l'espace des cellules, lecture des attributs de la carte géographique et construction des méthodes pour reconnaître leur voisinage en établissant quelle est la cellule réceptrice de l'écoulement éventuellement créée.
- c) Initialisation des Parcelles: Premièrement, la méthode d'initialisation du modèle établit le lien entre les cellules et les parcelles en identifiant quelle sont les cellules qu'appartient à chaque parcelle, et ensuite elle s'intéresse à connaître les précédentes cultures durant les 6 dernières saisons sur chaque parcelle. Ces informations à propos de la parcelle seront mises à disposition des usagers du modèle afin que chacun puisse connaître l'histoire de leurs terrains avant la prise de décision, en respectant le délai de retour exigé par chaque culture et les précédents culturels qui garantissent des rendements optimaux.
- d) Initialisation des Agents: L'initialisation des agents inclut tous les acteurs sociaux modélisés. A la fin de cette procédure, les attributs de chaque agent modélisé (les 3 types d'agriculteurs, le maire de commune et le syndicat de bassin versant) sont définis. Donc les agriculteurs possèdent un groupe de parcelles et un troupeau initial composé de 15 bovins, dans le cas où ils réalisent de l'élevage.

5.4.4 Les séquences du modèle

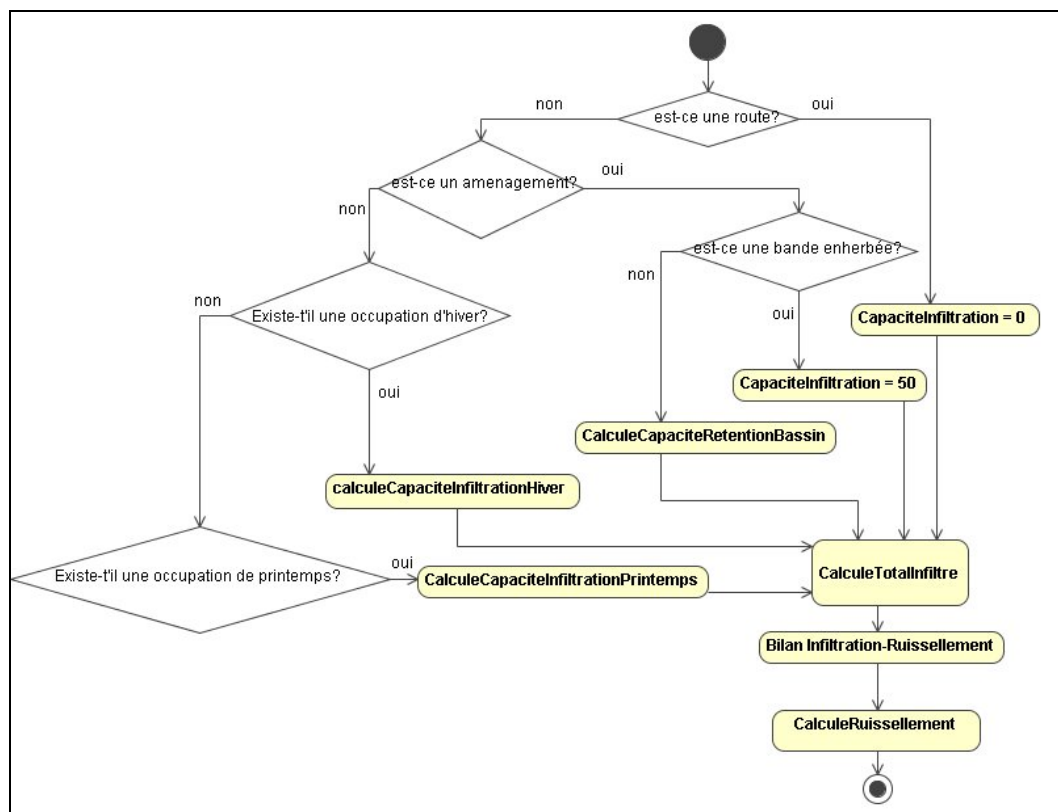
Quant au déroulement de la simulation, nous pouvons la diviser en 6 étapes permettant de représenter la dynamique analysée (Figure N°5.8):

- a) Actualisation du climat: parmi les informations disponibles pour la construction du modèle, nous retrouvons une liste de données avec différents événements de pluie qui correspondent aux deux saisons analysées, hiver et printemps. Précisément, dans cette méthode, nous allons choisir un événement de manière aléatoire pour analyser les flux érosifs.
- b) Décision Culturelle: Au début de chaque temps de simulation, le modèle considère les décisions prises par les acteurs en générale et les acteurs « agriculteurs » en particulier dans ce qui concerne au choix de culture. Ces décisions seront incorporées à la modélisation pour regarder l'évolution du ruissellement dans les différentes échelles spatiales.
- c) Définition des Aménagements: Dans le modèle a été envisagé la possibilité que les agents propriétaires des terrains, c'est-à-dire les agriculteurs, peuvent construire des aménagements hydrauliques dans les endroits critiques de leurs propriétés afin de retenir les écoulements. Donc, à partir d'une procédure réalisée avant chaque pas de simulation, nous plaçons les aménagements dans le modèle.
- d) Analyse du Comportement des Cellules: Après avoir reconnu leurs attributs généraux dans l'initialisation et les caractéristiques de l'événement pluvieux, pour chaque cellule sera calculé un bilan d'infiltration selon la formule utilisée dans STREAM et montrée précédemment dans le chapitre N°1. La suite consiste en un calcul de la capacité d'infiltration, de la pluie d'imbibition et du bilan I-R (Infiltration-Ruissellement) de chaque cellule. Enfin, en suivant le réseau d'écoulement défini, nous établissons le niveau de ruissellement dans chaque cellule. (Figure N°5.7).

- e) Analyse du Comportement des Parcelles: Après les résultats de ruissellement calculé au niveau de la cellule et transféré aux parcelles, le modèle se centre dans l'estimation de la production agricole. Comme nous l'avons montré dans la Figure N°5.6, il coexiste deux échelles de temps et les résultats économiques de l'exploitation sont estimés par rapport à l'échelle annuelle, une fois les décisions d'assolement prises pour les cultures d'hiver et de printemps.

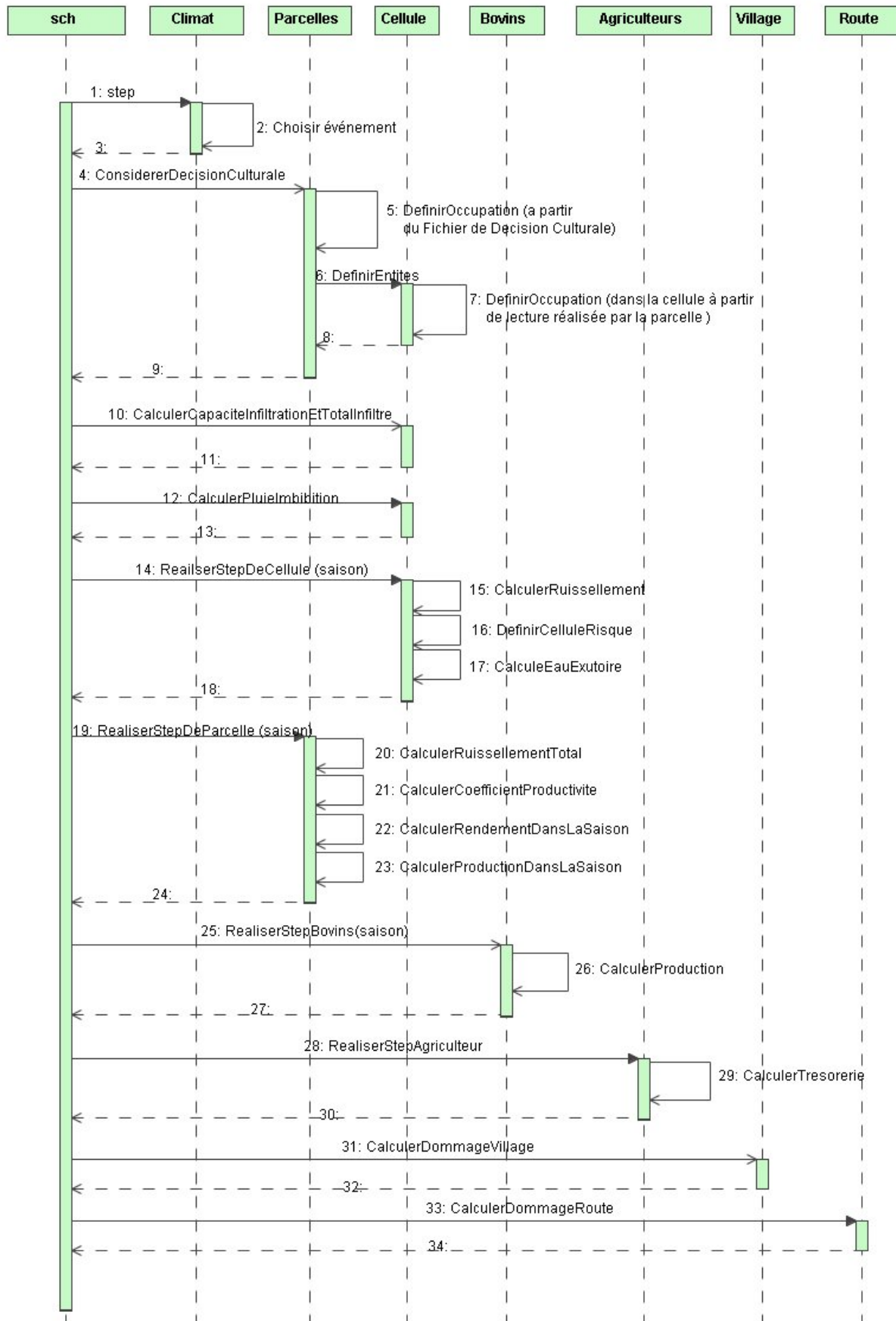
La simplification de l'estimation de la production annuelle est essentiellement faite sur les rendements de chaque culture. Nous avons considéré des conditions climatiques normales tout au long de l'année, même si l'analyse de ruissellement a été faite avec un événement extrême.

Figure N°5.7
Schéma général d'estimation de ruissellement selon le type d'occupation du sol



- f) Calcul des Dommages: Les résultats de ruissellement permettent de classer les parcelles et les cellules selon leur niveau de risque d'érosion, de telle façon que les maires et le syndicat de bassin versant puissent cibler leurs actions en conseillant éventuellement aux agriculteurs des changements de pratiques culturales. De plus, le modèle quantifie les dommages en termes de quantité d'eau qu'arrive autant au village situé dans l'exutoire du bassin versant que ceux situés sur les routes existantes.
- g) Calcule Trésorerie des Agriculteurs: Finalement, le modèle estime la somme d'argent qui représente les bénéfices économiques des agriculteurs, en prenant en compte les valeurs de paramètres définis et les aléas incorporées dans le modèle reflétant les fluctuations de certaines valeurs parmi eux.

Figure N°5.8
Diagramme UML de Séquence



5.4.5 Les scénarios

Dans la définition de la dynamique du modèle, nous avons essayé de refléter un éventail large de possibilités quant à la prise de décision afin de représenter les éléments de décision auxquels les acteurs se trouvent confrontés au cours des saisons agricoles analysées. Cela permet la possibilité d'explorer des autres scénarios possibles afin d'analyser la sensibilité des résultats de gestion de la ressource.

- Scénario « InterCulture / Aménagement »: Selon le choix pris par les agents « agriculteurs », le modèle permet de tester l'efficacité de leurs choix de cultures par rapport aux ruissellements et d'essayer des modifications de comportements habituels de production, notamment en leur permettant d'implanter des cultures intermédiaires et l'implantation des aménagements hydrauliques sur leurs terrains permettant d'évaluer les résultats de sa gestion vers une meilleure réponse aux besoins collectifs, en prenant en compte les possibilités individuelles.

Ce scénario composé entre cultures et aménagements nous pouvons l'appeler « scénarios de base » car c'est lui qui nous analyserons initialement avec le modèle tel qu'il est défini.

- Scénario « Pénalisation »: Un autre scénario envisageable d'analyse, beaucoup plus répressif que les autres, est la définition d'une pénalisation ou taxation mise en place par les autorités pour être appliquée sur les parcelles ruisselantes. Cette taxe constituera une mesure de pression qui pourrait être utilisée par l'agent « maire » pour forcer le changement des comportements des agriculteurs. Pour le moment ce scénario est inclut dans le modèle mais il reste inactif, en attendant les résultats du processus de gestion concertée basé seulement dans un engagement libre, et non impératif comme impose une taxe.

- Scénario « Transaction »: Une autre intervention possible de tester est le « scénario foncier », ce qui analyse les transactions des terrains réalisé au cours d'une négociation de gestion concertée. Selon la loi existante il existe la possibilité que la commune représentée par le maire exproprie certains terrains, considérés de « utilité publique » en termes de ruissellement pour réaliser une gestion directe indépendants des tiers, qu'implique normalement la construction des ouvrages de protection comme un bassin versant.

5.5 Visualisation de l'Information : les Points de Vue.

Comme nous l'avons dit précédemment, la troisième étape d'une modélisation dans CORMAS concerne la visualisation de l'information définie. Elle permet à un observateur de connaître l'état initial des entités créées avant de réaliser la simulation et ensuite de regarder l'évolution de l'état des agents et des résultats de leurs comportements tout au long du pas de temps d'une simulation comme nous le verrons dans le prochain chapitre.

La manière de présenter les résultats est la création de cartes *graphiques*, appelée techniquement « points de vue ». Dans le modèle RuissellErosif, nous avons créé une série de point de vue pour les différentes entités qui permettent de suivre les dynamiques simulées.

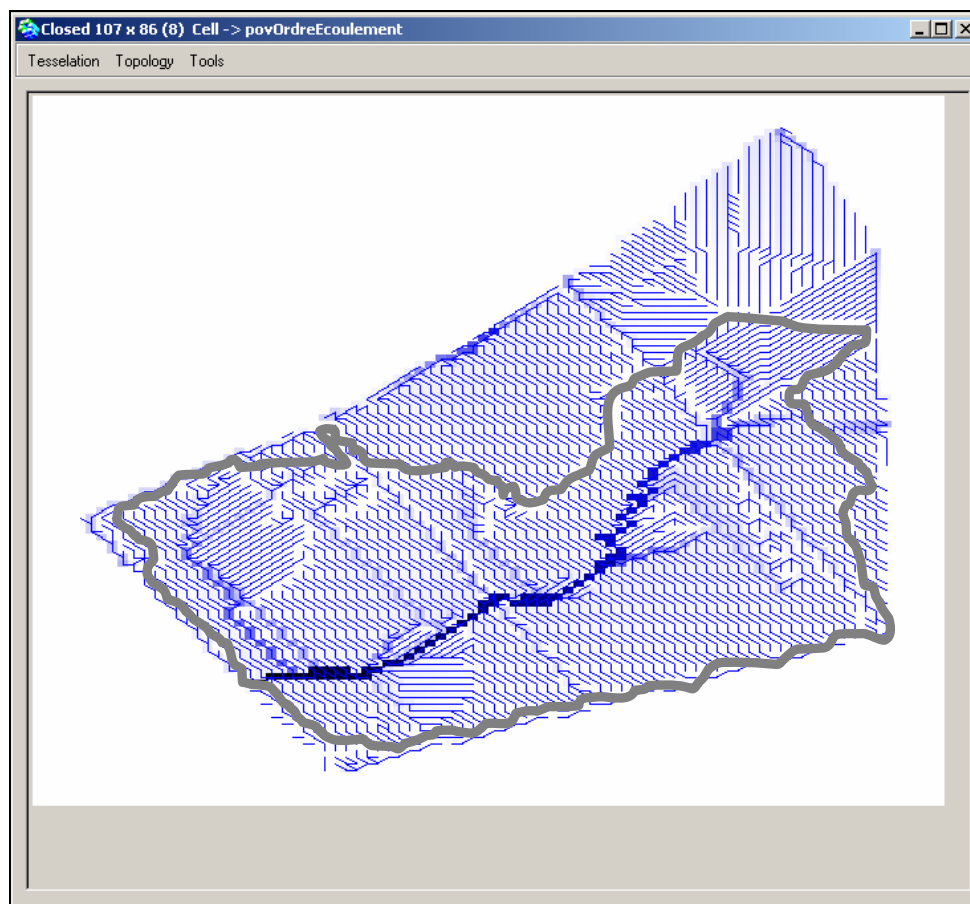
Il existe plusieurs points de vue qui peuvent être exprimés sur différents étages de l'échelle spatiale. Par exemple, « occupation du sol » ou « agent propriété » peuvent exister autant au niveau des cellules que celui des parcelles ou même que celui d'un bassin versant parce qu'ils ont une justification différente. L'occupation du sol au niveau de la cellule se justifie pour le calcul du ruissellement. Au niveau de la parcelle, il facilite la compréhension des agriculteurs de par ses caractéristiques graphiques tel que l'assolement. Et, pour finir, au niveau de bassin versant,

l'occupation globale du sol permet au syndicat de bassin versant d'analyser de manière systématique le choix de culture. Ci-après on montre quelques points de vue sur les entités définies :

a) Point de vue des cellules :

- Réseau Hydrique: Montre la façon dont l'eau s'écoule vers les exutoires des différents bassins versants existants dans le parcellaire analysé et notamment vers le bassin versant objet d'analyse où se trouve le village d'intérêt (Figure N°5.9).

Figure N°5.9
Visualisation réseau d'Ecoulement



b) Point de vue des Parcelles

- Propriétaire : Montre la carte graphique des propriétaires de chaque parcelle que compose le parcellaire d'étude (Figure N°5.10).
- Occupation du Sol : Après avoir considéré le choix de culture de chaque agriculteur, l'infrastructure immobilière et routière qui existe dans le parcellaire analysé, le modèle permet à l'observateur d'appréhender l'occupation du sol de chaque parcelle pour chaque saison (Figure N°5.11).

Figure N°5.10
Visualisation de propriété foncière des agriculteurs

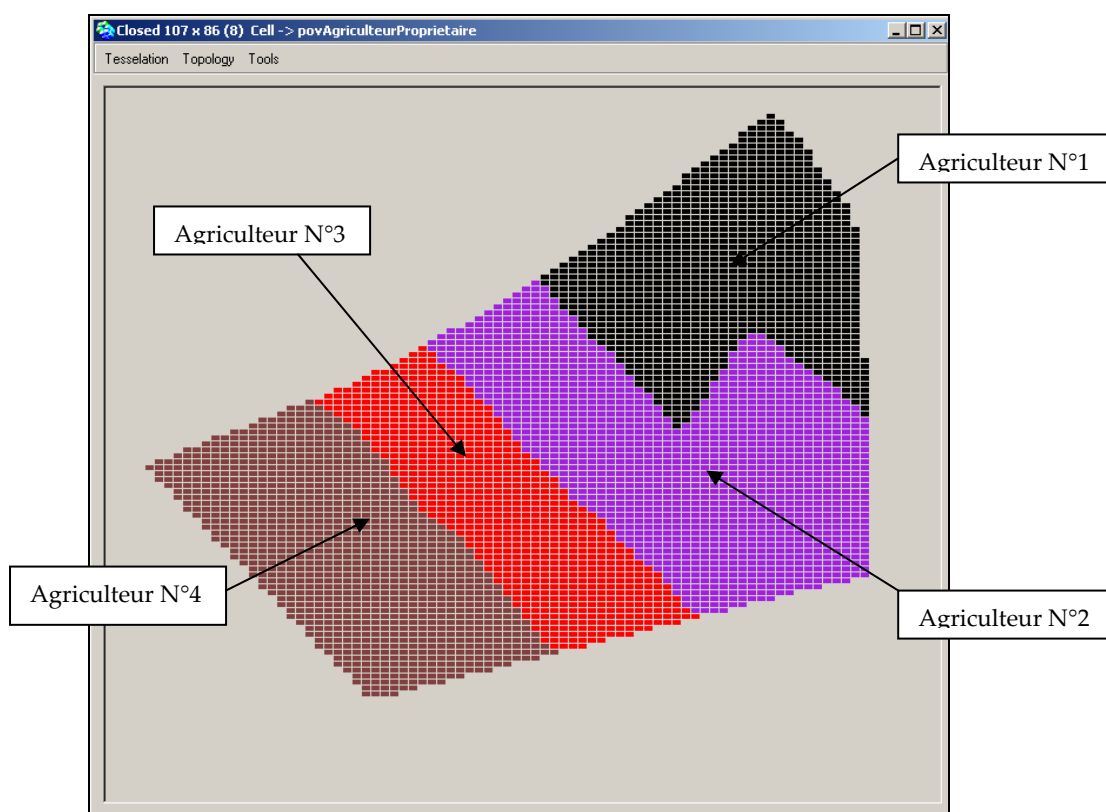
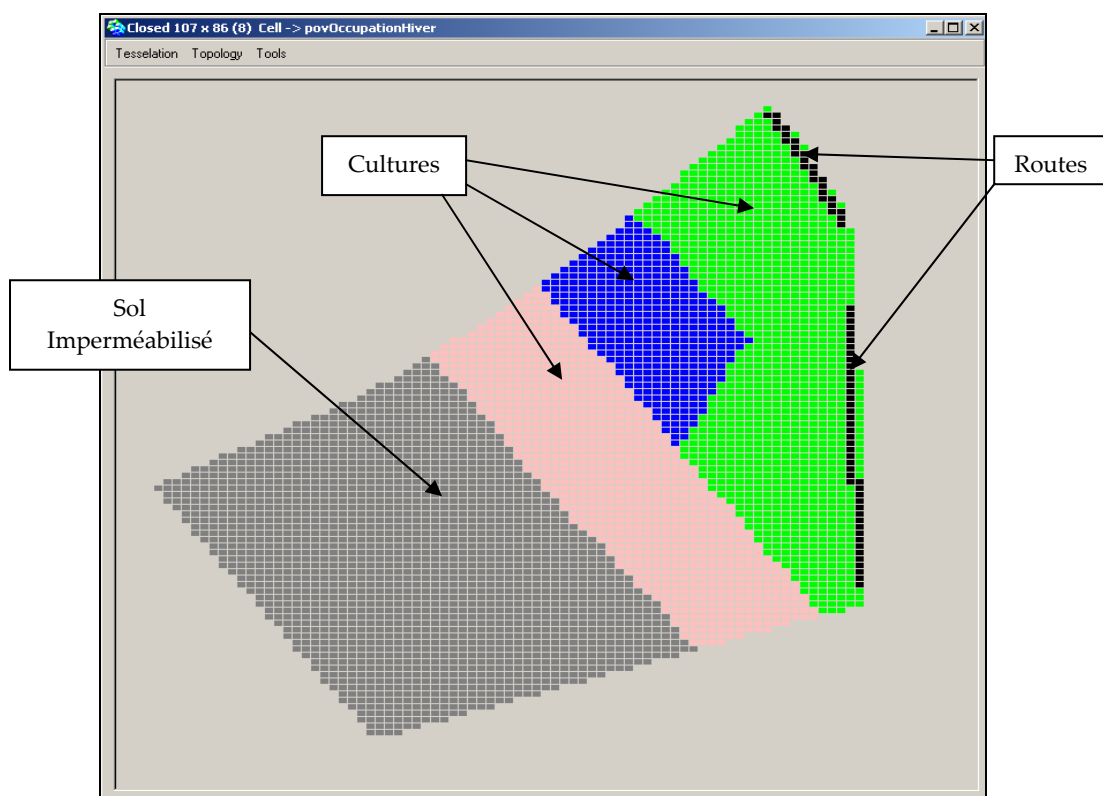


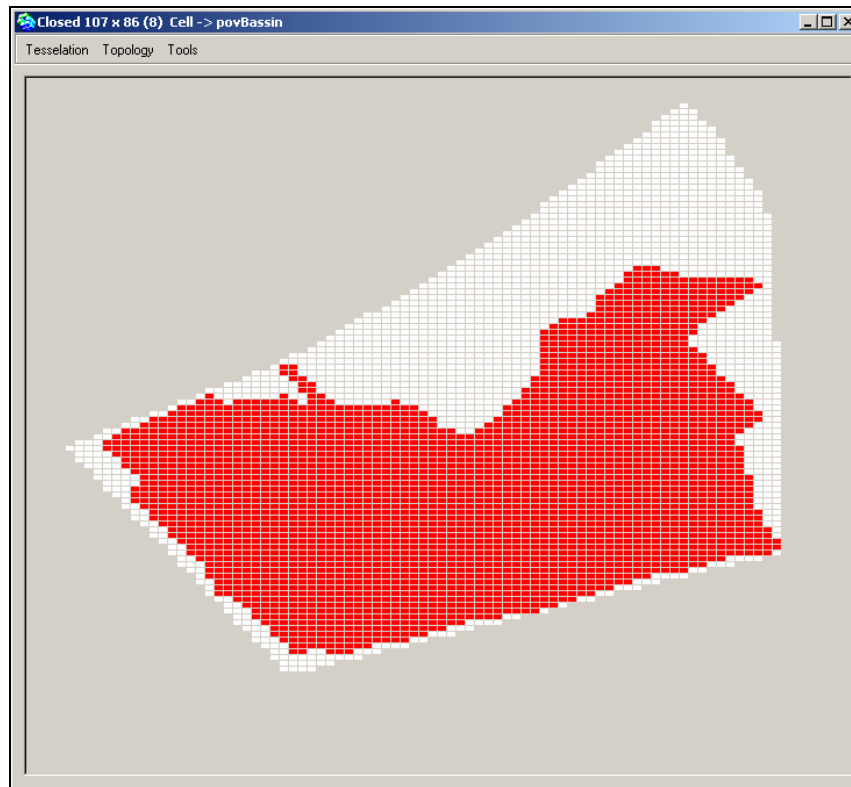
Figure N°5.11
Visualisation de types d'occupation du sol



c) Point de vue du Bassin Versant Analyisé.

- Limites: Il permet de définir la surface totale, le numéro de parcelles et de cellules comprises dans le bassin versant (Figure N°5.12).

Figure N°5.12
Visualisation du bassin versant d'étude



Chapitre 6: Analyse des Résultats

Une fois implémenté le modèle avec les dynamiques biophysiques et sociales relatives au problème d'érosion hydrique, nous avons réalisé une simulation pour tester le comportement du modèle pour un scénario précis afin de connaître les résultats individuels et globaux des dynamiques modélisées.

6.1 Le Scénario Simulé

Le scénario théorique simulé prend en compte un parcellaire de petite taille et un nombre réduit d'agents pour simplifier les calculs. Cette simplification nous permettra d'envisager la totalité des alternatives de gestion d'un territoire agricole.

La durée de la simulation considérée a été d'une année, celui de l'année culturale entre les mois de Septembre et Août. Cette période concerne une saison d'hiver et une saison de printemps, ce qui nous a permis de considérer les résultats hydriques après chaque saison et les résultats économiques comme étant ceux d'un bilan annuel après les campagnes de récolte.

6.1.1 Sur le parcellaire, les parcelles et les agriculteurs

Le parcellaire considéré correspond au « Parcellaire Test » montré dans la Figure N°5.2 du chapitre précédent. La surface totale est de 42.06 [ha] distribué entre 7 parcelles destinées à la production agricole ou l'aménagement urbain du territoire.

Nous avons réparti le parcellaire entre 4 agriculteurs représentant les trois types d'agriculteurs inclus dans le modèle, 1 agriculteur polyculteur / éleveur laitier, 1 agriculteur polyculteur / éleveur viande et 2 agriculteurs de grandes cultures.

La distribution des parcelles entre les agriculteurs, dans le contexte de cette simulation théorique, a été faite de manière arbitraire, en procurant séparer les exploitations agricoles selon un classement « amont-aval ». L'emplacement des exploitations agricoles est important dans la dynamique d'érosion et de gestion des territoires. Dans la réalité il existe un niveau de sensibilisation différent entre les agriculteurs selon la position relative de leurs exploitations agricoles. En aval, les agriculteurs sont plus conscients du problème parce que sont eux qui normalement reçoivent les excédents hydriques cumulés des parcelles situées en amont provoquant les plus grands problèmes d'érosion.

Tableau N°6.1
Résumé des Parcelles et Propriétaire.

Agriculteur N°	Type d'agriculteur	Parcelle N°	Surface Parcelle [ha]	Surface Totale Exploitation [ha]
1	AGC	1	5.35	14.14
		4	8.79	
2	AGC	2	2.39	6.44
		3	4.05	
3	APEV	5	8.21	16.08
		6	7.87	
4	APEL	7	5.40	5.40
Total Parcellaire			42.06	42.06

Dans le cas des agriculteurs éleveurs, nous avons également défini de manière arbitraire un troupeau initial composé de 15 vaches ayant des caractéristiques spécifiques selon le type de bovin. Les valeurs de certains attributs du troupeau tels que le rendement de production du lait ou viande, ou les besoins nutritionnels, ont été obtenus auprès des institutions spécialisées comme la Chambre d'Agriculture de Normandie, tandis que d'autres tels que l'âge du troupeau, ont été assignés de manière aléatoire dans le modèle.

6.1.2 Les précédents cultureaux

Nous avons construit un tableau (voir Tableau N°6.2) avec le résultat des six dernières saisons culturales précédentes pour chaque parcelle afin de présenter « l'histoire culturelle » des terrains cultivables et aussi pour établir les contraintes que devront adopter les agents au moment du choix saisonnier des cultures (Joannon A., 2004a). Cette contrainte a été incluse dans le modèle uniquement pour donner une information aux agents mais il existe la possibilité de tester un scénario avec une réduction de rendements de production dans le cas où la culture précédente ne serait pas respectée.

Tableau N°6.2
Cultures Précédents¹

Parcelle	C1*	C2	C3	C4	C5	C6**
1	bs	ble	col	ble	linR	ble
2	maïs	ble	esc	maïs	ble	esc
3	ble	esc	maïs	ble	esc	maïs
4	ble	esc	maïs	ble	esc	maïs
5	maïs	ble	esc	maïs	ble	esc
6	esc	col	ble	esc	col	ble
7	maïs	ble	esc	maïs	ble	esc

* Sigle C1 correspond à la culture semée il y a 6 saisons culturales.

** Sigle C6 correspond à la culture semée la saison dernière.

6.1.3 La décision agricole

La décision agricole prise par les agriculteurs définit une occupation du sol qui sera essentielle dans l'analyse de la dynamique d'érosion. Il existe 9 catégories possibles d'occupation du sol sur une parcelle donnée impliquant des conditions différentes d'infiltration du sol.

Selon le choix de l'agriculteur gestionnaire, la parcelle peut être laissée en prairie (P) pour la nourriture des animaux ou bien en jachère (J) mais, dans ce cas, les dispositions légales européennes indiquent que seuls les agriculteurs pratiquant la jachère énergétique ou la jachère obligatoire pourront recevoir des primes économiques.

Dans le cas où la décision de l'agriculteur est de cultiver ses terres, la parcelle pourrait recevoir selon la saison une culture d'hiver (CH), une culture de printemps (CP) ou une culture intermédiaire (CI).

¹ Les sigles utilisés pour les cultures sont bs (Betterave sucrière), ble (Blé), maïs (Maïs), col (Colza), esc (Escourgeon), linR (Lin Roulé), linNR (Lin Non Roulé), poiR (Poi Roulé), poiNR (Poi Non Roulé), pdt (Pomme de terres), mou (Moutarde), tre (Trèfle), rga (Ray-Grass Anglais), her (herbe), socs (Déchaumage à socs), dents (Déchaumage avec un outil à dents), disques (Déchaumage avec un outil à disques), for (Forêt), solImp (Sol Imperméabilisé).

Pour les parcelles qui hébergent de culture de printemps (CP), l'agriculteur peut choisir pendant la saison d'hiver, la destiner comme chantier de récolte (ChR) de la production de printemps passée ou la travailler en faisant le déchaumage (D) nécessaire pour la préparation correcte des terres pour la saison suivante.

Le deux derniers types d'occupation du sol possibles de trouver dans les bassins versants analysés en Haute Normandie est le forêt (F) et le sol imperméabilisé (SI), qui n'ont pas de fonctionnalité agricole mais qui sont importantes de distinguer parce qu'ils ont des comportements particuliers face au ruissellement.

Finalement et dans le but de vérifier le comportement du modèle pour un scénario théorique de simulation, nous avons défini arbitrairement le tableau de décision culturale (Tableau N°6.3) en différenciant la gestion hydrique entre les parcelles situées en amont de celles situées en aval du bassin versant. Concrètement, nous avons analysé le résultat de l'interaction entre une mauvaise gestion de ruissellement en amont, où se trouvent des sols imperméabilisés et des cultures d'hiver avec une capacité d'infiltration réduite et une bonne gestion en aval, où se trouvent des cultures intermédiaires et de la prairie.

Tableau N°6.3
Fichier de Décision Agricole.²

Parcelle	CH	CP	CI	P	CJ	D	ChR	F	SI
1	non	non	non	non	non	non	non	non	sollmp
2	non	non	non	non	non	non	non	non	sollmp
3	ble	non	non	non	non	non	non	non	non
4	ble	non	non	non	non	non	non	non	non
5	non	linR	mou	non	non	non	non	non	non
6	non	non	non	prai	non	non	non	non	non
7	non	linR	non	non	non	socs	non	non	non

6.1.4 Les événements pluvieux de simulation

Un autre paramètre important à considérer dans la simulation est l'événement pluvieux. Pour réaliser la modélisation, nous avons identifié les dix précipitations plus importantes tombées dans la région selon les statistiques de la station Bourville pour la saison d'Hiver et pour la saison Printemps correspondant aux deux moments considérés pour la simulation du ruissellement érosif.

Tableau N°6.4
Fichier des Événements Pluvieux.

Type d'événement	Date	Pluie Totale	Durée Pluie	IPA
Pluie d'Hiver (PH)	PH1	11/10/1997	42,6	04:15:51
	PH2	04/01/1998	33,2	01:56:27
	PH3	08/10/1997	30,6	10:19:41
	PH4	01/12/1997	23,2	01:17:11
	PH5	29/11/1996	22,6	07:52:38
	PH6	19/11/1996	22	03:33:09

² Les sigles de l'occupation du sol et les possibilités de choix sont CH : Culture Hiver (ble/esc/col/non), CP : Culture Printemps (poiR/poiNR/linR/linNR/pdt/bs/maïs/non), CI : Culture Intermédiaire (mou/tre/rga/non), P : Prairie (prai/non), CJ : Culture Jachère (her/ble/bs/col/non), D : Déchaumage (socs/dents/disques/non), ChR : Chantier de Récolte (cha/non), F : Forêt (for/non), SI : Sol Imperméabilisé (sollmp/non).

Tableau N°6.4 (Suite)
Fichier des Evénements Pluvieux.

Type d'événement		Date [jj/mm/aa]	Pluie Totale [mm]	Durée Pluie [hh:mm:ss]	IPA [mm]
Pluie d'Hiver (PH)	PH7	26/12/1997	21,8	00:50:25	10,8
	PH8	12/02/1996	20,6	02:55:11	0,4
	PH9	10/10/1997	19,2	05:46:47	31,8
	PH10	07/11/1996	17,6	00:06:46	2,4
Pluie de Printemps (PH)	PP1	02/05/1996	29,2	03:01:40	6,8
	PP2	16/06/1997	28,4	08:03:45	0,4
	PP3	07/06/1997	27,4	01:58:24	0,4
	PP4	16/05/1996	23,8	08:54:30	0,4
	PP5	29/06/1997	22,8	02:12:35	0,4
	PP6	26/06/1997	20,6	05:04:27	10,4
	PP7	18/05/1996	19,4	05:13:07	28,4
	PP8	20/05/1997	18,2	02:17:08	2
	PP9	20/06/1996	17	01:41:58	0,4
	PP10	20/07/1998	16,8	04:16:20	0,4

Le modèle informatique RuissellErosif est capable de réaliser la sélection aléatoire du phénomène pluvieux parmi un groupe de possibilités et, à partir de cela, réaliser les procédures d'estimation du ruissellement érosif. Dans cette application théorique le modèle a fait son choix au début de la simulation et a sélectionné les événements PH6 en tant que pluie d'hiver et PP2 en tant que pluie de printemps.

Tableau N°6.5
Evénements choisis pour la simulation.

Année	Saison	N°	Evénement Choisi	Date [jj/mm/aa]	Pluie Totale [mm]	Durée Pluie [hh:mm:ss]	IPA [mm]
1	Hiver	1	PH3	08/10/1997	30,6	10:19:41	9,4
	Printemps	2	PP1	02/05/1996	29,2	03:01:40	6,8

6.2 Les Résultats

Après avoir défini les paramètres, nous avons réalisé la simulation de deux saisons, ce qui nous a permis d'évaluer les comportements individuels des agents et le résultat global du système. Pour présenter l'information obtenue, d'une part, nous avons utilisé, directement les points de vue définis dans le modèle et, d'autre part, nous avons profité du couplage existant entre CORMAS et Excel pour exporter les résultats et construire des tableaux et des graphiques donnant un support important à la compréhension de la situation analysée.

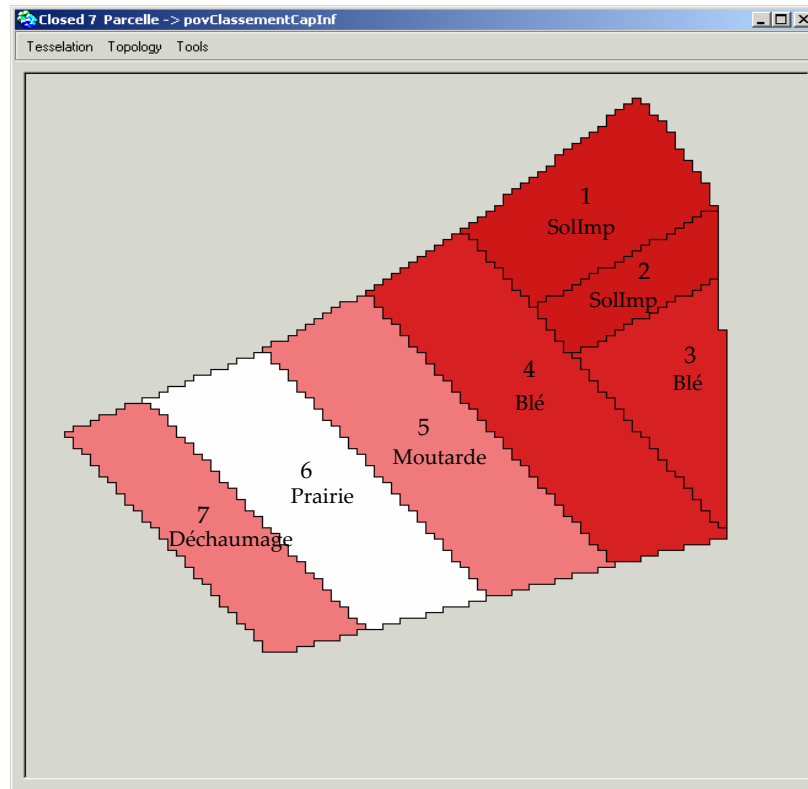
6.2.1 Résultats sur le niveau de ruissellement

Parmi les points de vue définis dans le modèle, il existe la définition du « niveau de ruissellement » autant pour les cellules que pour les parcelles. Il est calculé au niveau de chaque cellule à partir du bilan hydrique estimé selon l'équation (3) définie dans le chapitre N°1. A partir de ce résultat, le modèle calcule le volume d'eau que le système « parcelle » transmet à ses voisines. Les résultats sont représentés graphiquement (Figures N°6.1 et N°6.2) sur une échelle de couleur rouge, identifiant les entités plus ruisselantes avec une couleur plus intense.

Premièrement, étant donnée l'importance du paramètre capacité d'infiltration dans l'estimation du ruissellement érosifs dans le bassin versant, nous avons créé un point de vue (Figure N°6.1) qui

montre les différences existantes entre les diverses parcelles quant à sa contribution au ruissellement global et notamment celle entre la parcelle N°6 qui a été laissée comme prairie, ayant la plus grande capacité d'infiltration, et les parcelles N°1 et N°2 ayant une occupation du sol de type couverture imperméabilisée ce qui correspond à une capacité d'infiltration nulle.

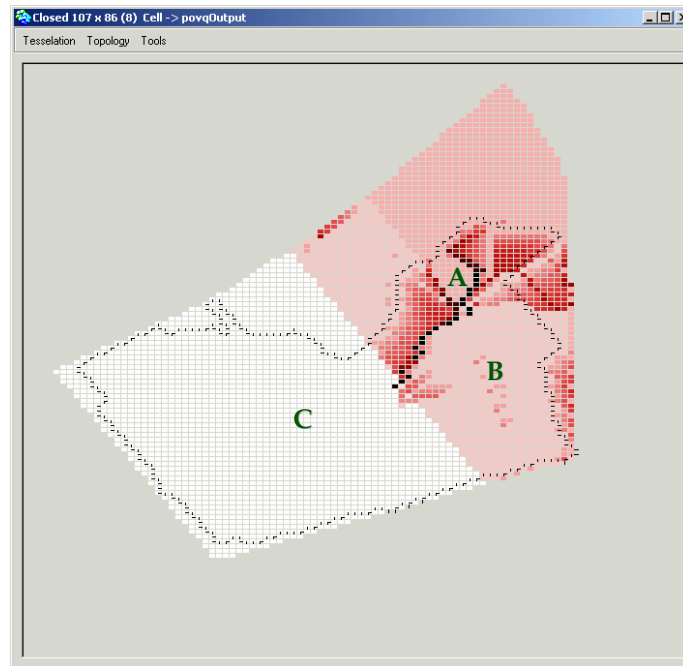
Figure N°6.1
Niveau de Ruissellement au niveau des Parcelles



Ultérieurement, nous avons défini une visualisation des résultats du modèle en termes d'évolution spatiale du ruissellement pendant le premier événement pluvieux simulé correspondant à la pluie d'hiver PH6. (Figure N°6.2) ce qui nous permet d'apercevoir en détail le comportement de chaque cellule constituant les parcelles. Notamment nous voyons qu'en amont, les parcelles ayant une occupation de sol imperméabilisé (secteur A) ruissèlent la plus grande quantité d'eau dont son débit augmente plus en aval à cause des écoulements générés par les parcelles de culture de blé du secteur B (représenté par une couleur rose plus pale, synonyme d'une valeur importante mais inférieure à celle des parcelles précédentes).

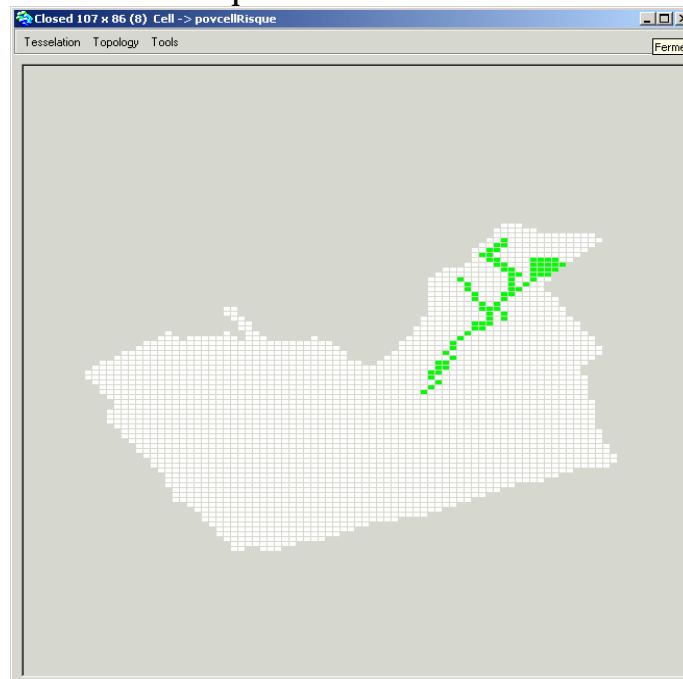
Plus en aval, nous nous apercevons comme les écoulements s'amenuisent jusqu'à disparaître grâce à un ensemble de parcelles favorisant le contrôle de l'érosion hydrique (secteur C), c'est notamment le cas de la parcelle N°5 où il y a été semée une culture intermédiaire de moutarde laquelle absorbe les écoulements provoqués en amont avant même qu'ils ne rencontrent l'occupation du sol plus absorbante parmi le parcellaire analysé, celle de la parcelle N°6, situé plus en aval où il existe de la prairie.

Figure N°6.2
Niveau Ruissellement au niveau des cellules



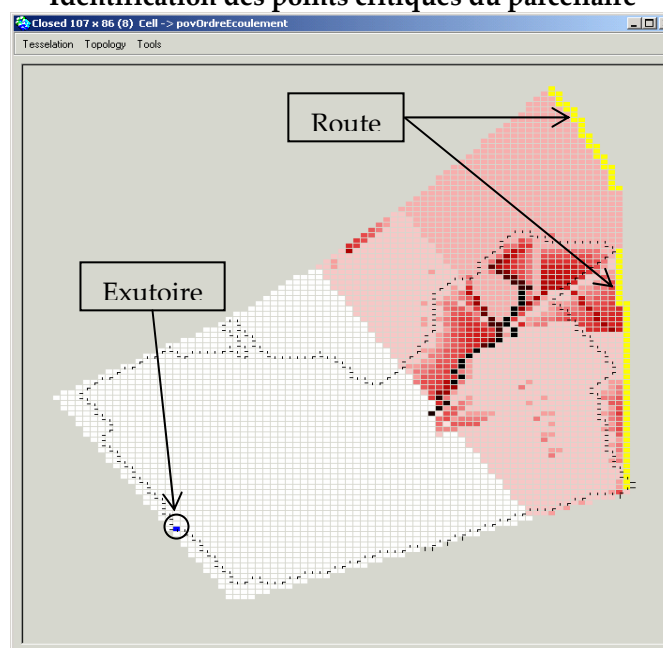
Une autre analyse intéressante à réaliser est l'identification des endroits les plus endommagés du bassin versant. Cela pourra modifier le comportement de certains agents notamment le maire de commune qui se doit d'assurer la protection du village situé en aval du bassin versant et des infrastructures publiques et le syndicat de bassin versant qui, selon les résultats obtenus, pourra conseiller les agriculteurs sur l'emplacement des aménagements ou directement les construire pour réduire les problèmes. La définition des endroits endommagés ou risqués doit être faite à partir de la définition d'un seuil de dommage. Dans notre cas, nous avons considéré un seuil arbitraire de 20 [m3] comme étant le volume d'eau cumulé pendant la durée de l'événement pluvieux sur lequel les dommages se manifestent (Figure N°6.3).

Figure N°6.3
Endroits risqués en termes de ruissellement.



Dans ce contexte, il existe deux endroits qualifiés de plus sensibles du bassin versant analysé, *l'exutoire* qui correspond au point d'évacuation des écoulements vers le village situé en aval du bassin versant et *la route* qui traverse le parcellaire. Des niveaux d'écoulements considérables au niveau de ces points ont des conséquences économiques directes sur le budget de la commune car il faut destiner des ressources économiques pour le nettoyage, la réparation de dommages et la remise en service. Il est donc nécessaire que les acteurs concernés puissent être informés des résultats de la décision agricole prise pendant la saison pour prendre les mesures correspondantes. Avec l'objectif de mettre encore plus en évidence le rapport entre ces endroits et le niveau de ruissellement, nous avons créé le point de vue suivant:

Figure N°6.4
Identification des points critiques du parcellaire



En accord avec ce que nous pouvons observer sur la figure précédente, l'exutoire reste éloigné des problèmes de ruissellement dans la simulation réalisée et donc le village aussi, grâce à l'action de la culture intermédiaire semée. Contrairement, la route est exposée aux écoulements provoqués essentiellement par des secteurs du parcellaire analysé situés hors le bassin versant.

Au niveau analytique nous avons estimé la quantité d'eau cumulée qu'arrive dans le village et la route, provenant de toutes les cellules pouvant ruisseler vers ces endroits selon le réseau des écoulements déterminé (Tableau N°6.6). Ces résultats confirment ce que nous avons aperçu précédemment avec les résultats graphiques.

Tableau N°6.6
Volume écoulé au niveau de
l'exutoire et sur la route [m3]

Endroit	Saison	
	Hiver	Printemps
Exutoire	0	0
Route	200.4	152.3

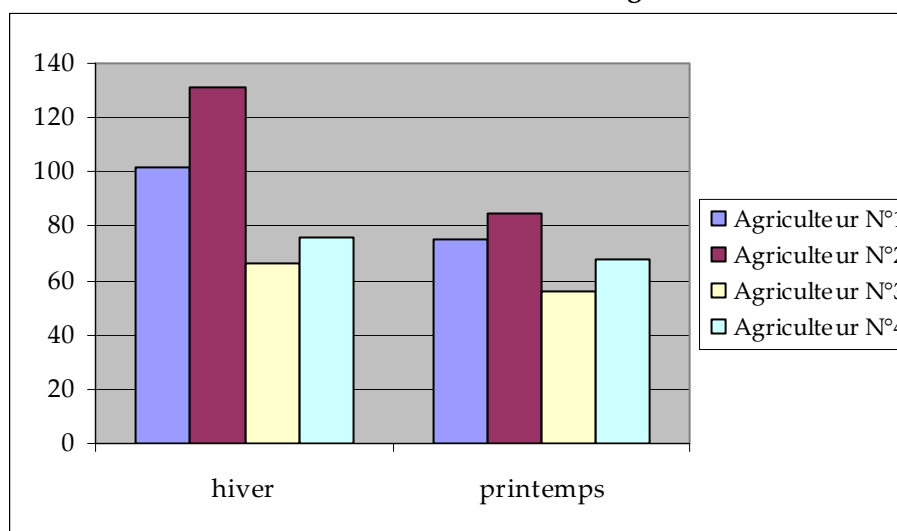
Parallèlement aux analyses réalisées précédemment, il est recommandable d'individualiser les résultats de ruissellement obtenus en les transposant des entités spatiales aux agents sociaux. Cela nous a permis d'analyser l'influence de la décision prise par chaque agent dans le résultat global. Ainsi, nous avons regroupé les écoulements déversés en dehors de chaque parcelle selon l'agent propriétaire. Ensuite, nous avons calculé pendant les deux campagnes agricoles simulées les volumes cumulés nets d'eau ruisselée par individu, c'est-à-dire, la différence entre le volume qui est généré par la parcelle et ce qu'arrive provenant des autres parcelles. A partir de cela, nous avons créé un classement « écologique » (Tableau N°6.7), qui décerne la première place à l'agriculteur qui génère le moins de dommages et donc celui qui est considéré le plus « écologique ».

Tableau N°6.7
Résultats de ruissellement en [m³] par saison et par agriculteur

Agriculteur	Hiver [m3]	Classement Hiver	Printemps [m3]	Classement Printemps
Agriculteur N°1	102	3°	75	3°
Agriculteur N°2	131	4°	85	4°
Agriculteur N°3	66	1°	56	1°
Agriculteur N°4	76	2°	68	2°

En complément, nous présentons dans la suite les mêmes résultats mais, cette fois-ci, de manière graphique pour observer l'évolution des comportements des agriculteurs pendant les deux saisons simulées, ce qui confirme que l'agriculteur N°2 est le plus ruisselant, conséquence directe de l'occupation du sol imperméabilisé et de son choix de culture (blé).

Figure N°6.5
Evolution du ruissellement selon les agriculteurs



6.2.2 Résultats sur la trésorerie des agents

Etant donné qu'un des principaux éléments considéré par les agriculteurs au moment de l'évaluation de la prise de décision agricole est le profit économique réalisé par l'exploitation en fin de saison, nous analyserons les résultats économiques après l'année de production agricole simulée en considérant les chiffres estimés par les institutions compétentes dans la matière et correspondant à une année de conditions climatiques normales, ce qui constitue une des hypothèses de la modélisation.

Le troupeau considéré dans la simulation est le même que celui du chapitre précédent, c'est-à-dire, chaque agriculteur/éleveur a un bétail composée de 12 animaux, dont 8 sont destinées à la production du lait ou viande, 2 génisse de première année et 2 deuxième année. Dans le cas de vache allaitante seulement 2 vaches seront abattues ou vendues à la fin de l'année, d'accord au taux de renouvellement établie de 20%. Le bénéfice de production du lait et viande est estimé en 10969€ et 5304€, respectivement (Tableau N°6.8).

Tableau N°6.8
Bénéfice économique de production animale

Culture	Coût par surface	Rendement [kg MS/ha]	Bovin Allaitante		Bovin Laitière	
			Besoin Alimentaires	Coût [€]	Besoin Alimentaires	Coût [€]
Maïs Ensilé	460 €/ha	11000	1090 kg MS	46	2280 kg MS	95
Pâturage	87 €/ha	9400	1,06 ha	92	2780 kg MS	26
Foin récolté	70 €/ha	4000	-		-	
Foin acheté	100 €/T		1470 kg MS	147	152 kg MS	15
Tourteau (colza, soja)	0.24 €/kg	-	150 kg brut	36	860 kg brut	206
C.M.V.	0.52 €/kg	-	23 kg brut	12	60 kg brut	31
Céréales	0.12 €/kg	-	210 kg brut	25	-	-
			Coût / Bovin	358	Coût / Bovin	374
			Cout Total	4296	Cout Total	4487
			Ventes Viande	9600	Ventes Lait	15456
			Bénéfice	5304	Bénéfice	10969

Les résultats globaux prenant en compte l'ensemble des exploitations agricoles obtenus par chaque agriculteur, nous permettent de créer cette fois-ci un classement «économique» sur la trésorerie de chacun. Ce classement (Tableau N°6.9) montre que le meilleur bénéfice économique a été obtenu par l'agriculteur N°3 comme conséquence notamment de la marge économique obtenu de la production de lin (16092€) sur la parcelle N°5 et la production du lait (10969€) à partir de l'herbe pâturée sur la parcelle N°6.

Tableau N°6.9
Résultats économiques en [€] dans l'année

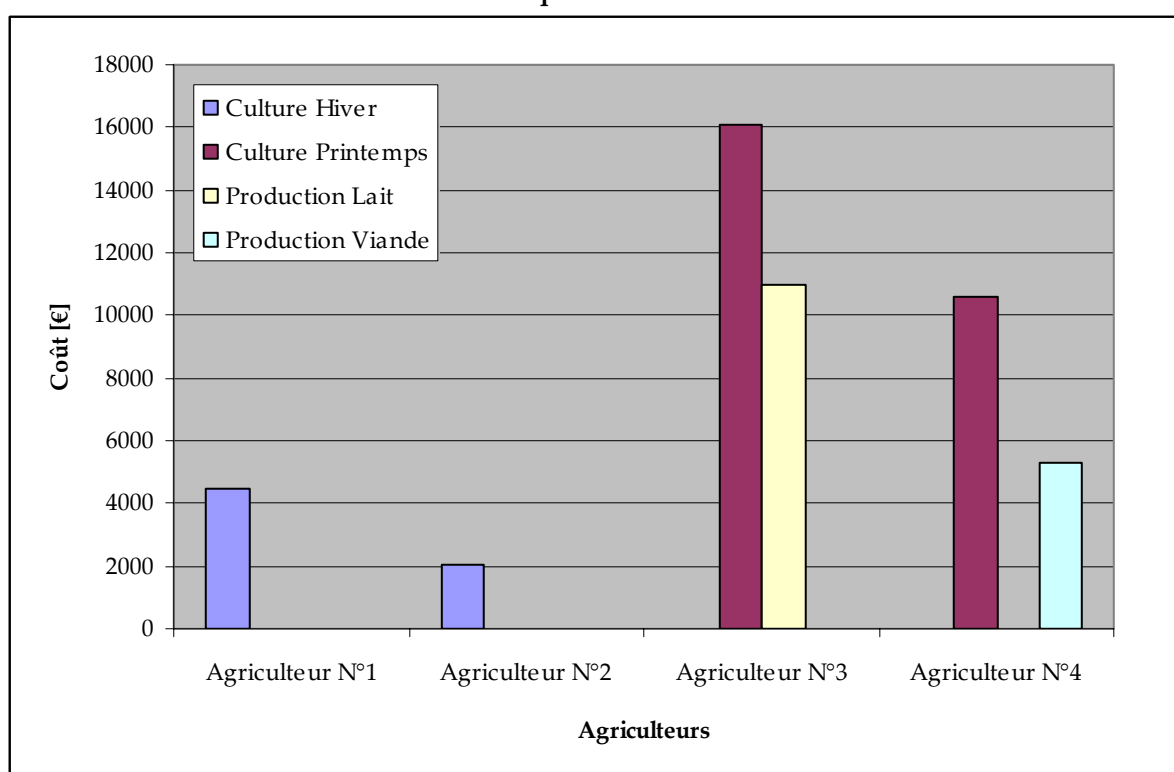
Agriculteur	Culture Hiver	Culture Printemps	Production Lait	Production Viande	Bénéfice Totale Net [€]	Classement
Agriculteur N°1	4492	-	-	-	4492	3°
Agriculteur N°2	2070	-	-	-	2070	4°
Agriculteur N°3	-	16092	10969	-	27061	1°
Agriculteur N°4	-	10584	-	5304	15888	2°

Nous pouvons nous apercevoir également que les résultats obtenus dans cette application théorique montrent une différence considérable en termes économiques entre les agriculteurs. Cette hétérogénéité peut être expliquée à partir des hypothèses de simulation réalisées en termes d'assolement, parcellaire et décision prise. Dans le cas des agriculteurs N°1 et N°2, une partie de son

assolement a été destinée à une occupation du sol de type «sol imperméabilisé» laquelle ne rapporte pas de bénéfices économiques directs. De son côté, les agriculteurs N°3 et 4 obtiennent un rendement important grâce à décision culturelle prise concernant à la culture de lin roulé (culture de printemps) et à la production animal. Mais c'est finalement l'agriculteur N°3 qui obtient un surplus économique supérieur au reste des agriculteurs dû à la production du lait, notamment au prix du lait et au rendement de vaches.

De manière à compléter la révision des résultats de la trésorerie des agriculteurs tout au long de la simulation, nous avons créé des graphiques qui reflètent la situation décrite précédemment.

Figure N°6.6
Résultat économique annuel sectorisé et total.



6.2.3 Perspectives de l'analyse de résultats

Dans le cas analysé, nous avons vu le comportement des agents pendant une année déterminée. Etant donné qu'un des objectifs de la démarche est l'apprentissage collectif qui pourrait se manifester au fil de temps, nous considérons nécessaire envisager la réalisation ultérieure d'analyses pluriannuelles permettant de regarder la tendance des comportements et l'évolution de la dynamique.

Ainsi, les conclusions sur les comportements des acteurs ne seront pas basées exclusivement sur les décisions ponctuelles d'une année mais aussi sur l'historique des choix au cours de plusieurs années.

Avec une analyse pluriannuelle, nous avons aussi la possibilité de dévoiler plus facilement des comportements stratégiques et des comportements coopératifs des agents et la relation que l'apprentissage et l'expertise acquis peuvent avoir avec le changement de conduites.

La représentation de la diffusion de l'information pourra avoir la forme des graphiques comme dans les exemples ci-dessous (Figure N°6.7 et 6.8), autant pour le sujet biophysique que pour l'analyse économique et autant pour une analyse collective qu'individualisée.

Figure N°6.7
Graphique comparatif entre des agriculteurs par rapport aux résultats de ruissellement

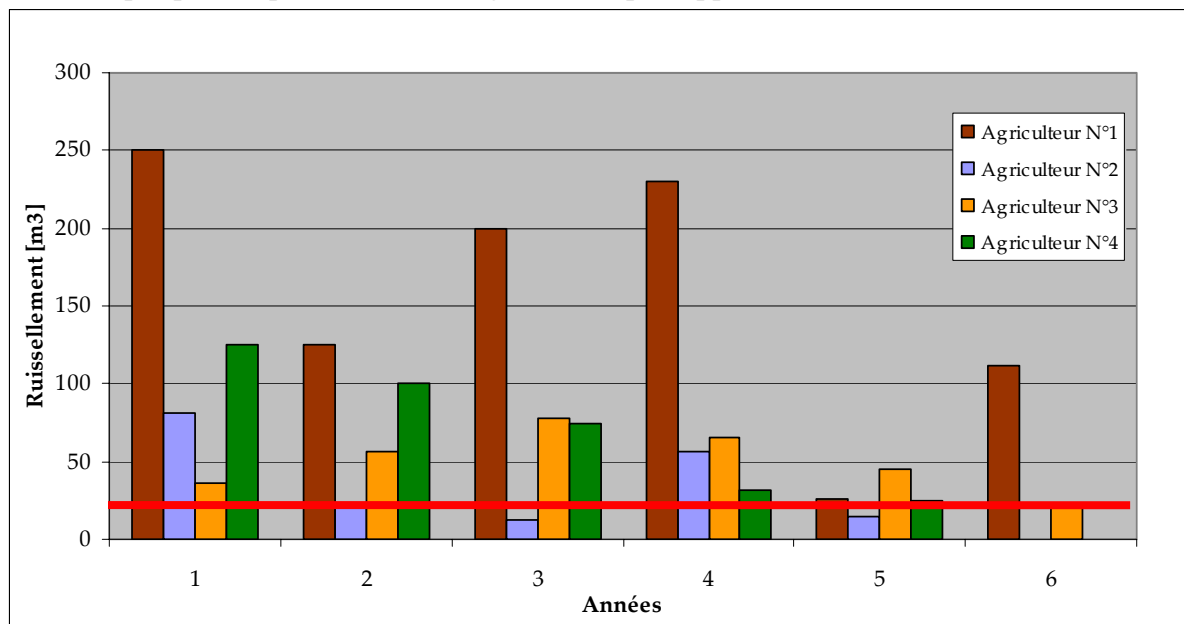
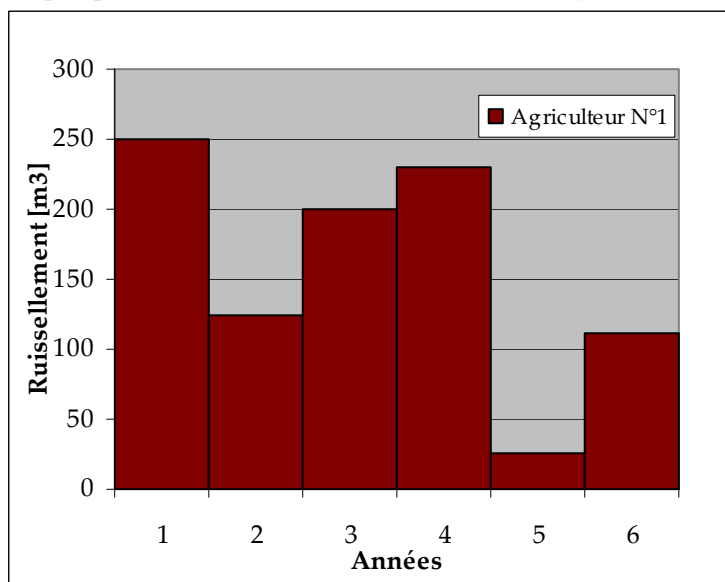


Figure N°6.8
Graphique des résultats de ruissellement de l'agriculteur N°1.



Chapitre 7: Vérification et Validation du Modèle.

La simulation multi-agent est utilisée pour représenter une réalité déterminée et pour essayer de comprendre les dynamiques existantes dans le système analysé. Dans ce contexte, il est donc nécessaire de connaître le niveau de cohérence de la représentation élaborée, autant dans le but de valider les résultats obtenus à partir de son application que dans l'optique d'une éventuelle diffusion ultérieure de la modélisation élaborée.

L'analyse de la qualité du modèle doit être réalisée à travers une procédure de validation. D'une manière générale, la validation peut être abordée en suivant des approches différentes. Etant donnée que dans notre cas d'étude, l'implémentation du modèle RuissellErosif inclut différents paramètres physiques obtenus à partir d'un couplage avec le modèle biophysique STREAM, il est donc logique de démarrer la validation avec une vérification de ces paramètres en comparant les résultats avec ceux obtenus avec le modèle STREAM. Nous avons appelé cette procédure «Vérification Biophysique».

Dans une deuxième étape, en considérant que le modèle SMA s'intéresse à l'émergence des phénomènes suite aux interactions des agents et au lien que ces phénomènes ont avec la réalité censée de représenter, le processus de validation doit confronter ce monde virtuel avec le monde «réel». Il devra analyser les types de dynamiques implémentées, leur niveau de représentativité du problème et l'articulation existante entre elles au sein du modèle. Cette analyse des comportements et des interactions qui peut être réalisée de manière participative avec les acteurs impliqués a été nommée «Validation Sociale» (Bousquet F., 2001).

7.1 Vérification Biophysique

Cette procédure là correspond à une vérification des données incorporées et des résultats du calcul de ruissellement obtenu avec le modèle SMA à partir d'une comparaison avec un modèle d'érosion déjà validé, le modèle STREAM (Cerdan et al., 2002c).

Comme nous l'avons signalé dans le Chapitre N°5, il existe un couplage entre les deux modèles, permettant d'incorporer une série de couches de données obtenues à partir du Système d'Information Géographique sur lequel le modèle STREAM a été implémenté et qui ont déjà été validées à partir des observations réalisées dans la zone d'étude (Cerdan O., 2001).

Le couplage est matérialisé à travers la création d'une « carte d'environnement » qui corresponde à une couche d'information composée qui est le résultat de la fusion des différentes couches de données. La première vérification est liée à la bonne incorporation de l'information présente dans la carte (la description du parcellaire et bassin versant, les caractéristiques du réseau hydrique, l'infrastructure routière, etc.) de la part du modèle SMA, ce qui dans la pratique, correspond à un test d'assimilation des attributs dans différentes cellules choisies de manière aléatoire.

Ensuite, nous avons réalisé une simulation sur une saison déterminée, pour tester les résultats notamment en termes de ruissellement. Pour cela, nous avons considéré le même scénario établi dans la simulation faite avec le modèle STREAM, en ce qui concerne l'événement pluvieux et l'occupation du sol. Ainsi l'événement pluvieux considéré a les caractéristiques suivantes:

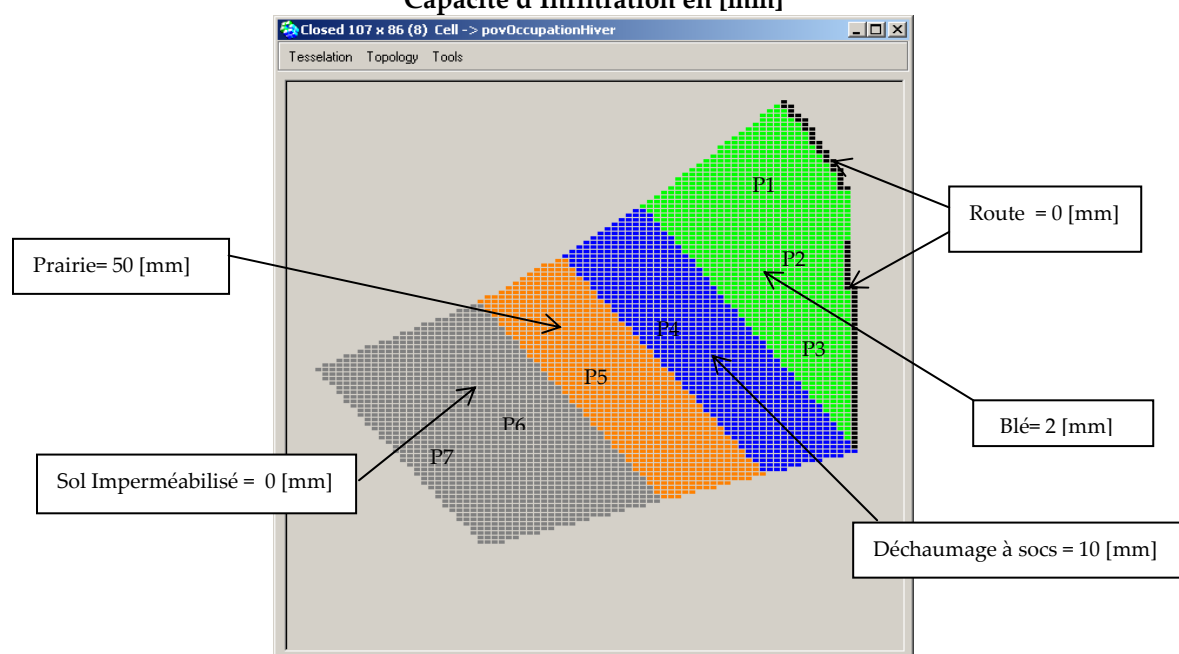
- Pluie Totale : 40 [mm]
- Durée Pluie : 4 [h]
- Indice Pluie Antécédente (IPA): 0 [mm].

Quant à l'occupation du sol, nous avons considéré les données qui sont présentées dans le tableau et le graphique ci-après:

Tableau N°7.1
Fichier de Décision Agricole.¹

Parcelle	CH	CP	CI	P	CJ	D	ChR	F	SI
1	ble	non	non	non	non	non	non	non	non
2	ble	non	non	non	non	non	non	non	non
3	ble	non	non	non	non	non	non	non	non
4	non	non	non	non	non	socs	non	non	non
5	non	non	non	prai	non	non	non	non	non
6	non	non	non	non	non	non	non	non	sollmp
7	non	non	non	non	non	non	non	non	sollmp

Figure N°7.1
Capacité d'Infiltration en [mm]

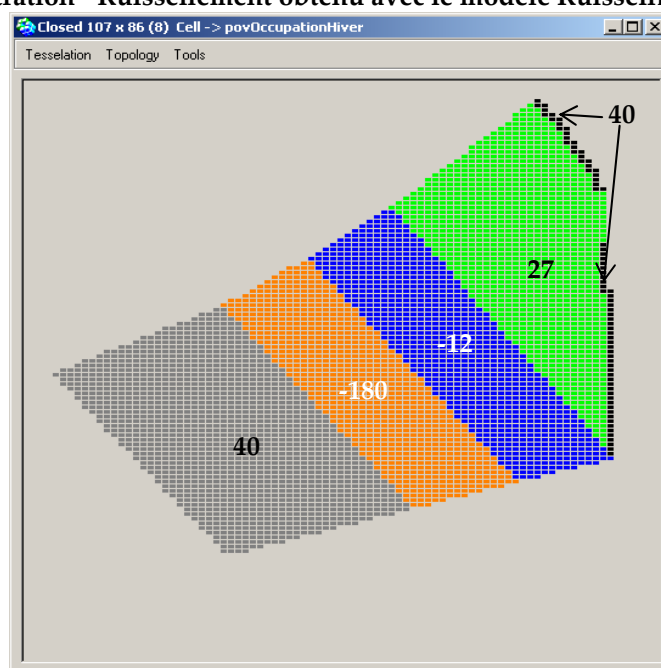


Avec ces antécédents, nous pouvons vérifier les indicateurs obtenus avec la simulation multi-agent en comparant la similitude avec les résultats obtenus avec le modèle biophysique STREAM. Parmi les indicateurs les plus importants à vérifier, se distinguent la valeur du bilan d'Infiltration-Ruissellement et celui des volumes d'eau écoulés dans le bassin versant.

Le bilan Infiltration-Ruissellement il a été calculé exactement de la même manière par les deux modèles selon l'équation (3) du Chapitre N°1, en obtenant les mêmes résultats, ceux qui montrent deux parcelles, les parcelles N°4 et N°6 avec un bilan négatif, synonyme d'une capacité rémanente d'infiltration permettant d'aider au contrôle des écoulements. Dans la parcelle N°4 il a été défini un travail du sol avec un déchaumage à socs qu'augmente la rugosité des terrains tandis que la parcelle N°6 a été laissée comme prairie. (Figure N°7.1).

¹ Les sigles de l'occupation du sol et les possibilités de choix sont CH : Culture Hiver (ble/esc/col/non), CP : Culture Printemps (poiR/poiNR/linR/linNR/pdt/bs/maïs/non), CI : Culture Intermédiaire (mou/tre/rga/non), P : Prairie (prai/non), CJ : Culture Jachère (her/ble/bs/col/non), D : Déchaumage (socs/dents/disques/non), ChR : Chantier de Récolte (cha/non), F : Forêt (for/non), SI : Sol Imperméabilisé (sollmp/non).

Figure N°7.2
Bilan d'infiltration - Ruissellement obtenu avec le modèle RuissellErosif en [mm]



Concernant aux volumes écoulés vers le village localisé dans l'exutoire du bassin versant, les deux modèles estiment la même valeur de 5064.4 [m³] (Figures N°7.3 et N°7.4)

Figure N°7.3
Résultat de ruissellement dans l'exutoire selon le modèle RuissellErosif en [mm]

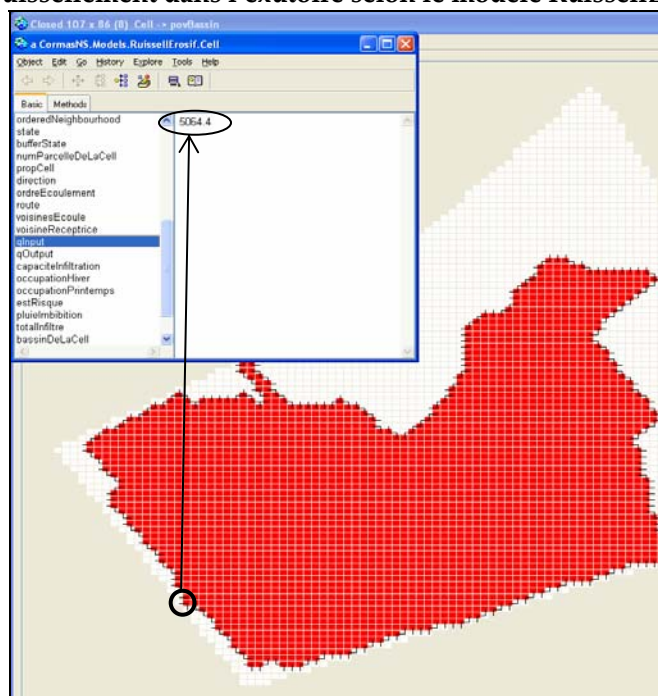
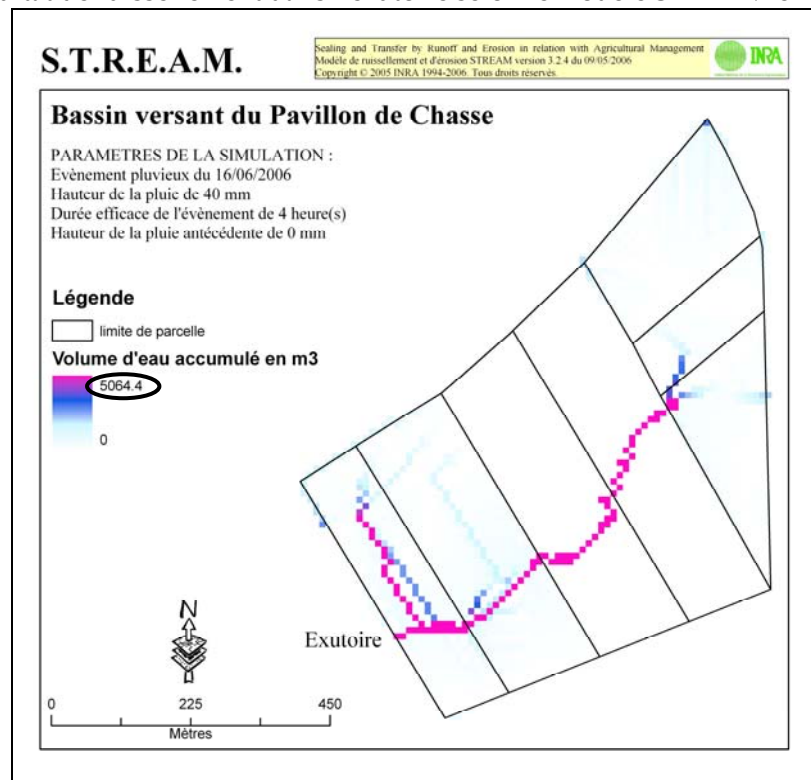


Figure N°7.4
Résultat de ruissellement dans l'exutoire selon le modèle STREAM en [mm]



7.2 Validation Sociale

La création d'un système virtuel SMA pour représenter une certaine réalité et augmenter la connaissance et la compréhension des dynamiques présentes implique l'existence d'une relation cohérente entre le modèle virtuel et le monde réel qui est recrée. Complémentairement à l'analyse biophysique, il est possible réaliser une évaluation sociale de la simulation SMA (Bousquet F., 2001) élaborée à travers la réalisation d'un couplage avec un autre outil d'approche participative, le jeu de rôle.

L'interaction entre les deux outils de la modélisation d'accompagnement permet d'implémenter la représentation des comportements et des interactions réalisées au sein de la simulation multi-agent comme des règles du jeu et ensuite de regarder l'évolution du système simulé et de sa relation avec la réalité.

Dans ces circonstances, la validation dite sociale du modèle est un processus réalisé avec les acteurs concernées afin d'estimer la capacité du modèle à faire émerger de phénomènes d'interaction liées au problème traité et promouvoir la discussion entre les parties prenantes permettant l'intégration des différentes connaissances pour une représentation conjointe de la problématique.

Il résulte donc qu'il est important de connaître la perception que les acteurs impliqués ont vis-à-vis du niveau de représentativité de l'outil et, en particulier, en ce qui concerne la capacité du modèle à mobiliser les éléments qui déclenchent la décision des agents par rapport à la dynamique de ruissellement.

Pour atteindre les objectifs fixés, la validation sociale du modèle RuissellErosif a été découpée en deux étapes. La première correspond à la réalisation d'une réunion avec les acteurs avec lesquels nous

avons construit de manière collective le modèle conceptuel. A cette occasion, nous avons mis à la disposition de ces personnes l'outil élaboré afin de récolter leurs remarques et conclusions à dire d'experts. Cette étape doit nous permettre de valider nos choix initiaux. La deuxième étape de validation sera un jeu de rôle avec des acteurs sensibilisés directement avec le problème d'érosion afin d'améliorer les représentations voir le modèle lui-même si nécessaire

7.2.1 Première Phase: Réunion avec groupe de la construction collective du modèle

La réunion a été réalisée le 20 Octobre 2006, dans la Chambre de l'Agriculture de Seine Maritime avec les acteurs institutionnels avec qui nous avons construit collectivement le modèle conceptuel. Parmi les institutions participantes nous trouvons:

- a) L'AREAS, représenté par son responsable M. Jean François Ouvry.
- b) La Chambre d'Agriculture, représenté par Mme. Véronique Lecomte.
- c) Le syndicat de bassin versant d'Austreberthe – Samffibec, représenté par l'animatrice Mme. Noémie Grandsire.
- d) L'INRA, représentée par Mlle. Véronique Souchère et M. Javier Echeverria

A l'occasion de cette rencontre, le plan du travail a été le suivant:

1. Au début de la réunion, nous avons fait un rappel sur la démarche ComMod et sur les résultats de la construction collective réalisée au cours des deux dernières réunions de discussion, notamment nous avons présenté, en tant que animateurs de la réunion, le diagramme du système représenté (Figure N°4.1) avec les agents, les ressources et les interactions identifiées.
2. Ensuite, nous avons présenté la traduction faite de cette conceptualisation sous la forme de diagrammes UML qui permet de schématiser et de mieux comprendre la modélisation du système multi agent élaborée (Figure N°5.5 et N°5.8).
3. La procédure suivante a été de montrer de manière générale la simulation multi-agent réalisée avec l'outil informatique « *RuissellErosif* », en distinguant les différents rôles des agents implémentés, les paramètres considérés et les visualisations de résultats possibles d'obtenir.
4. Finalement, avec le niveau de connaissance acquis par tous les participants de la réunion après cette présentation, nous avons consulté leur avis sur la représentation réalisé et les améliorations envisageables d'effectuer en pensant aux futures applications.

7.2.1.1 Remarques lors de la validation

En général, la définition du modèle et les simplifications réalisées ont été bien accueillies par les personnes convoquées. Peut être, la remarque la plus importante a été celle du besoin d'améliorer le modèle en incorporant le concept de DPU (Droits à Paiement Unique) parmi les attributs des parcelles, et cela avec l'objectif de représenter, plus précisément, les éléments que chaque agriculteur analyse au moment de prendre la décision sur son itinéraire technique.

Il faut savoir que, dans la réforme de la PAC effectuée en 2003, il a été défini un dispositif de droits à paiement liés à la surface, appelés Droits à Paiement Unique (DPU), de manière à découpler les aides économiques de la production agricole. De cette manière, l'exploitant agricole perçoit des primes

économiques, qu'il y ait ou non production, déterminées pour chaque exploitation et à partir de sa référence historique² des années 2000, 2001 et 2002.

Avec l'incorporation du concept d'aide économique découplée au modèle et de modifications des autres aspects liés à la fonction économique de production agricole proposées dans cette première phase de validation sociale, nous espérons être mieux préparé pour la suite.

7.2.2 Deuxième Phase de Validation Sociale: Jeu de Rôle

Dans la perspective de compléter la validation sociale du modèle en prenant en compte tous les acteurs concernés par la représentation du problème élaborée, nous considérons nécessaire de réaliser une série de jeux de rôles dans différents bassins versants de la région. Ainsi, nous espérons aller sur le terrain avec l'outil SMA amélioré pour développer un travail collectif vers la recherche des objectifs de la démarche d'accompagnement comme l'apprentissage évolutif et l'aide à la prise de décision.

Cependant la durée limitée de mon travail du stage et la longue organisation d'une telle démarche, empêche sa réalisation dans le cadre de ce rapport. Néanmoins, nous avons défini les bases pour la réalisation ultérieure de cette deuxième phase de validation sociale.

7.2.2.1 La définition du jeu de rôles.

Le jeu de rôles propose une manière alternative de partager les informations acquises sur le problème de ruissellement et d'améliorer le niveau de connaissance individuel et global des différentes dynamiques impliquées. Il définit aussi un dispositif participatif permettant d'analyser de différentes possibilités de gestion de la ressource.

Dans un jeu de rôles, les joueurs porteurs d'une certaine rationalité, sont conviés à prendre des décisions, à expliciter leurs choix et à les discuter, à se projeter dans l'avenir, en étudiant plusieurs scénarios possibles pour finalement arriver à mieux comprendre le problème et la situation des autres acteurs par rapport à elle.

La réalisation des jeux de rôles comme un outil de la démarche d'accompagnement permettra de connaître les perceptions des acteurs par rapport au modèle SMA élaboré, notamment quant à sa capacité de représenter le système et à mobiliser les éléments considérés par les acteurs dans la prise de décision.

Suite aux remarques obtenues à partir d'application de cette procédure le modèle SMA pourra être directement validé complètement ou elles pourront induire éventuellement des modifications pour atteindre l'objectif d'enclencher un processus de dialogue entre les joueurs pour entraîner une gestion collective du problème de ruissellement érosif.

7.2.3 La Pre-Conception du jeu

Pour la réalisation des futurs jeux de rôles nous considérons utiliser le support offert par le modèle multi agent RuissellErosif dans l'analyse du système et la représentation des résultats. Dans le modèle, les agents sont placés dans un espace limité, avec une série de règles de comportements et une perception sur le système qui les entoure limitée et imparfaite.

² On entend par référence historique les aides directes perçues en moyenne sur la période 2000 à 2002 sur la base des animaux et des surfaces primées

Les joueurs donnent vie à cet outil informatique en se positionnant dans les rôles des agents, en prenant les décisions à partir de l'analyse des différents éléments de décision et les règles de comportement définies. Il est donc important que les règles de jeu soient simples et sans grandes contraintes afin d'inciter l'appropriation du jeu par les joueurs.

En effet, dans le jeu que nous allons proposer nous considérons l'existence de seulement deux grandes contraintes, le temps de jeu et les phases du jeu. A partir de cela nous espérons que les acteurs puissent jouer librement leur rôle.

Le temps de jeu est associé aussi au temps de prise de décision des joueurs. Il doit être bien défini de manière à ce que la décision soit le fruit de l'expression d'une conviction personnelle et non pas influencée pour les autres, ce qui c'est produit dans le cas quand laisse un temps trop long pour la prise de décision. De leur côté, les phases du jeu doivent être suffisamment nombreuses pour montrer une évolution mais pas excessives pour ne pas ennuyer les joueurs.

7.2.3.1 L'espace de l'environnement du système

Le jeu de rôles sera réalisé dans un bassin versant plus grand que celui qui a été utilisé comme bassin versant test pour la création du modèle SMA. Cela comme une manière de représenter la complexité existante dans le système écologique et social d'un grand bassin versant, avec un nombre supérieur d'acteurs, de cas d'exploitation agricole, et d'interactions.

Cette décision impose un travail important à réaliser d'acquisition de données sur le nouveau bassin versant d'application du modèle SMA et du jeu de rôles, pour adapter ces outils au cas d'analyse. Des travaux d'enquêtes sont envisagés pour la précision des rôles, notamment celui de l'agriculteur et les types d'exploitation agricole possible de réaliser.

7.2.3.2 Les joueurs

Les joueurs sont une composante essentielle dans la réalisation de cette démarche. Quant à l'organisation du jeu de rôles, l'objectif est le réaliser avec des acteurs directement concernés par le problème appartenant au même bassin versant afin de mettre en évidence la relation de voisinage géographique.

Concernant aux règles de comportement et les différentes caractéristiques des rôles impliqués dans le cas d'étude, qui donnent le cadre d'action aux joueurs, elles ont été intégrées au modèle SMA avec qui le jeu de rôles est couplé. Parmi les caractéristiques définies, nous trouvons par exemple de joueurs ayant une base de connaissances sur le problème différente. Dans le cas de joueurs «agriculteurs» ils ont une perception limitée du problème de ruissellement, tel qu'il se manifeste dans la réalité, les agriculteurs analysent principalement sa situation individuelle au moment de la prise de décisions, tandis que les joueurs gestionnaires, comme le maire ou le syndicat, ont une vision plus globale et complète du système permettant de réaliser de diagnostic général du problème.

Complémentairement aux rôles définis en relation aux agents du modèle SMA, dans le jeu il existe un autre joueur appelé l'animateur de jeu qui est le responsable de la coordination du jeu et d'assurer le respect des règles de jeu.

7.2.3.3 Le lieu de jeu

Quant au lieu de jeu, il sera intéressant d'organiser la salle où il sera réaliser le jeu, comme le bassin versant analysé, c'est-à-dire, il aura des tables avec la ferme de chaque exploitation agricole, où les

agriculteurs pourront gérer leur parcelles. Ces tables représentant la ferme ou la siège des exploitations seront disposées dans la salle de jeu selon la vraie disposition spatiale qu'elles ont dans le bassin versant, permettant d'individualiser les joueurs et de conserver les relations réelles de voisinage avec une représentation des distances existantes.

Dans l'intérêt de faciliter les interactions entre les joueurs et inciter l'émergence de phénomènes sociaux, il sera envisagé des endroits dans la salle qui seront destinés à accueillir certaines dynamiques, comme la coordination collective ou la négociation. Il existe des expériences de jeu de rôle où des espaces réservés à la gestion collective sont organisés, c'est le cas par exemple du jeu de rôles « Fish Banks, Ltd. »³, élaboré pour l'analyse de la gestion des ressources marines.

7.2.3.4 Le déroulement du jeu

Comme cela est défini dans le modèle SMA, nous réaliserons le jeu sur une durée de simulation de 6 ans, qui correspond au délai de retour de culture le plus grand, celui de la culture de Lin. Ainsi, nous analyserons les résultats de dynamiques pendant 6 saisons d'hiver et 6 saisons de printemps.

Dans le jeu, ils devront être bien différenciées par l'animateur de jeu les différentes phases de jeu afin de permettre le développement des différentes étapes dans la gestion du ruissellement, notamment la réflexion individuelle précédente à la prise de décision, l'analyse des résultats et des conséquences provoquées par les décisions prises et finalement l'émergence éventuelle des instances de concertation entre les joueurs.

Nous distinguerons donc une première phase individuelle de jeu, où chaque joueur analysera pendant un temps de 10 minutes sa base de connaissances, ses croyances et prendra une décision sur l'organisation de son travail agricole dans la saison analysée et la mise en place des aménagements hydraulique. Suite à la simulation de cette saison, il reçoit ultérieurement les résultats de son comportement et éventuellement, il pourra obtenir quelques informations sur les comportements des autres joueurs, par exemple, avec la publication de classement de sites ruisselantes au niveau de bassin versant.

Dans une deuxième phase de jeu, dite collective, qui sera réalisée entre deux pas de simulation (c'est à dire, entre deux saisons) il sera permis pendant un temps court d'environ 10 minutes, aux agents gestionnaires, comme le maire et le syndicat, pouvoir interagir avec les agriculteurs pour trouver une solution au problème de ruissellement. Les agriculteurs pourront également essayer de se coordonner de leur côté pour trouver des décisions de gestion collective.

7.2.3.5 Les gains dans le jeu.

Avec le modèle *RuissellErosif*, nous pouvons suivre l'évolution des états des entités spatiales et sociales dans chaque pas de temps, à travers l'actualisation de ces états le modèle estime le résultat des dynamiques et des paramètres associés. Dans ce contexte, il existe deux aspects importants dans l'analyse des dynamiques du système qui pourront être explicités dans chaque tour de jeu afin d'inciter la réflexion sur les décisions prises et mettre en évidence éventuellement les comportements non coopératifs ou stratégiques de certains joueurs. Le premier aspect correspond au *comportement écologique* des joueurs face au ruissellement, cela en référence aux actions des individus visant à ne pas augmenter le ruissellement, voir à le réduire. L'autre aspect est le *résultat économique* de la gestion agricole qui guide principalement les décisions des agriculteurs.

³ Il a été créé par Dennis Meadows, l'un des principaux auteurs du rapport du Club de Rome sur les limites de la croissance de 1972.

Ces deux aspects pourront être explicités à travers le concept de gains de jeu, qui concerne aux rétributions que chaque joueur reçoit à la fin d'un tour de jeu. Ces gains individuels du jeu sont définis en utilisant les différentes possibilités de visualisation de l'information du modèle avec l'objectif d'évaluer plus facilement les décisions prises.

7.2.3.6 Visualisation de l'information et des résultats

L'information est un concept important dans les démarches participatives principalement parce qu'elle peut modifier les perceptions et comportements des acteurs. Compte tenu cela, nous avons réfléchi à la manière dont sera réalisé la divulgation de l'information entre les joueurs. Il s'avère important définir, par exemple, si l'asymétrie d'information existante entre les acteurs dans la réalité sera révélée et renforcée par le jeu ou si au contraire le jeu permettra de la corriger, en donnant un accès public aux données et résultats.

Dans notre définition de jeu, nous proposons de conserver cette asymétrie de l'information, comme une manière de révéler le rapport des forces existante dans la réalité. Néanmoins, il serait souhaitable afin de provoquer la réflexion et le questionnement autour des décisions prises, de diffuser quelques résultats de la gestion des agriculteurs.

Quant à la forme d'explicitation des résultats, nous avons vu dans le Chapitre N°6, que la manière de montrer les résultats sous la plate-forme CORMAS est faite de manière préférentielle à travers des points de vue (cartes géographiques) et des probes (graphiques). Cependant nous pouvons compléter ces possibilités en créant des tableaux ou des cartes-images pour mettre en évidence certains résultats.

1. Graphiques (Probes): Nous avons traité les résultats de trésorerie et de ruissellement pour les présenter aux joueurs comme de graphiques de barres (Figure N°6.7 et N°6.8).
2. Les Points de Vue: Nous proposons que l'animateur de jeu montre publiquement les antécédents graphiques sur le parcellaire, le bassin versant, l'infrastructure routière, le village, pour les joueurs puissent prendre la décision renseignée sur les caractéristiques de l'environnement. Pour le contraire, compte tenu du niveau de perception différent, les résultats globaux de ruissellement seront uniquement exhibés au maire et au syndicat.
3. Tableaux: L'animateur pourra systématiser l'information des résultats en termes des tableaux permettant de classer les comportements des joueurs (Tableau N°6.7 et N°6.8).
4. Cartes-Images: Elles sont associées à l'idée d'explicitation des résultats de ruissellement et définir les gains «écologiques» du jeu et pour provoquer la réflexion dans les différentes phases de jeu. Dans ce cas là, soit l'animateur de jeu soit le joueur «syndicat bassin versant» distribuera à chaque joueur «agriculteur» après la simulation de chaque saison une carte image «félicitation» ou «avertissement» (Figure N°7.1) pour chaque parcelle de sa propriété selon les résultats en termes de ruissellement provoqués. La carte sera connue seulement par le joueur impliqué comme une façon de créer une conscience personnelle sur les conséquences de ses décisions.

Figure N°7.1
Cartes-Images des gains écologiques pour le jeu de rôle



7.2.3.7 L'analyse du jeu

Quant à l'analyse de jeu il n'existe pas de méthodologie générale bien définie, cependant les personnes qu'auront la responsabilité d'évaluer le jeu devront faire attention aux objectifs et au déroulement du jeu en différenciant deux phases d'analyse: un plan global et un plan individuel.

Au niveau global, il s'avère important d'étudier la manière dont les acteurs se seront appropriés la représentation élaborée, quelle est la relation entre les règles et l'information définies dans le jeu et celles qui sont vraiment mobilisées par les acteurs pour prendre leurs décisions. Il faudrait vérifier la pertinence des indicateurs définis dans la modélisation.

Un autre aspect intéressant sera d'analyser la manière dont se sont fait les échanges d'information entre les groupes d'acteurs, les modes de négociation instaurés et la manifestation de la structure de pouvoir existante dans le système.

L'évaluation du jeu devra porter aussi sur l'analyse de l'influence de l'aspect ludique de ce dispositif, celui qui est renforcé avec la distribution des cartes-images (type «félicitations» et «avertissement»), sur les résultats de jeu. Il serait important d'analyser ultérieurement le niveau de transposition des résultats du jeu à la réalité et l'existence de limitations liées à l'aspect ludique du jeu.

A niveau de la phase d'analyse individuelle du jeu, il sera nécessaire de regarder comment les acteurs agissent par rapport à leur rôle et notamment de voir les types de comportements et de stratégies qui se génèrent au cours du jeu.

Dans l'analyse des comportements des joueurs, il sera organisé un débriefing du jeu afin de valider le jeu de rôle réalisé. Au cours de cette phase, les acteurs sont invités à justifier leurs comportements ce qui permettra aux évaluateurs du jeu de révéler et différencier les attitudes coopératives et non coopératives par rapport à la gestion collective du bassin versant. Complémentairement avec le débriefing de jeu, nous pourrons valider le modèle SMA élaboré et évaluer éventuellement l'intérêt de tester d'autres scénarios d'analyse.

7.2.3.8 Jeu de rôles inversés.

Bien que le jeu de rôle sera réalisé suivant la procédure détaillé au cours de ce Chapitre, il est possible dans certains cas modifier cette configuration pour résoudre certains problèmes de conflits particuliers entre les joueurs.

Cette variante consiste à mettre en place un jeu avec les rôles inversés. Cela signifie faire jouer à chaque individu un rôle différent à celui correspondant à son activité quotidienne pour faciliter la compréhension des contraintes des autres joueurs par rapport à la gestion de la ressource.

Perspectives et Conclusions

A travers l'étude réalisée nous avons essayé de répondre à une série de questions sur le problème de ruissellement érosif en Haute Normandie, notamment : Quelle est la nature du problème et comment se manifeste sa complexité ? Quel est le rôle effectif de l'agriculture dans sa résolution ? Existe-il une place pour la concertation en tant que nouveau mode de gestion visant à trouver des solutions durables à ce risque collectif ? Comment l'approche de la modélisation d'accompagnement rend-elle compte de cette problématique et propose-elle des méthodes adaptées pour une gestion collective ?

Nous avons vu que le ruissellement érosif est un phénomène provoqué par la combinaison de facteurs physiques, biologiques, et humains. Au cours de l'étude, nous avons analysé notamment la forte influence des aspects anthropiques, et notamment l'influence de la décision agricole à l'origine des pratiques agricoles ayant des conséquences plus ou moins bénéfiques sur la génération des écoulements de surfaces.

Nous avons aussi mis en évidence que les décisions des agriculteurs sont fortement influencées par le contexte économique, social et politique (prix du marché pour chaque production, coût des mesures anti-érosives, politique agricole et environnementale, etc.) ce qui incite les agriculteurs à avoir des logiques productives et individuelles et ce d'autant plus que les rapports de voisinage ne sont pas forcément très développés. Cette analyse théorique devra être validée ultérieurement en évaluant l'influence effective de ce contexte dans la décision des agriculteurs, ce qui permettra de connaître les marges de manœuvre des agriculteurs pour prendre des décisions favorisant la prévention du phénomène érosif. Dans ce contexte, il existe un aspect particulièrement intéressant d'analyser à la suite de cette étude; il s'agit de la relation entre la réforme de la PAC et le comportement des agriculteurs face au ruissellement. Nous avons montré dans le rapport qu'il existe aujourd'hui une tendance dans la réglementation agricole européenne à définir des aides économiques découplées de la production agricole, se manifestant par de droits à paiement unique (DPU) liés à la référence historique de chaque parcelle. En incorporant ce scénario d'analyse (la décision agricole avec DPU), le modèle *RuissellErosif* laisse ouvert la possibilité de réaliser une série de jeux de rôles pour tester l'influence réelle de ce contexte réglementaire sur la décision culturale.

Nous nous sommes également intéressés au type de gestion mise en place dans la région pour résoudre le problème. Le mode de gestion favorisée jusqu'à présent par les autorités locales était basé sur une approche curative qui s'est traduite par l'implantation d'aménagements hydrauliques financée par le conseil général tels que des bassins de rétention d'eau juste en amont des zones urbanisées afin de protéger les biens publics ou privés des dommages liés aux coulées boueuses. Cependant compte tenu des coûts d'implantation et d'entretien de ces ouvrages, il est apparu nécessaire d'associer à cette approche curative, une approche préventive visant à réduire le ruissellement boueux en provenance du territoire agricole à partir d'une modification des pratiques agricoles. Ce constat nous a incités à tester les possibilités offertes par la modélisation d'accompagnement pour initier au sein du territoire agricole, une approche de gestion concertée de ce problème érosif.

La perception de l'intérêt d'initier une concertation autour de la gestion du problème de ruissellement existe essentiellement auprès des institutions ou des organisations en charge de gérer ce problème. (Chambre d'Agriculture, AREAS, Syndicats de bassin versant, etc.). Leur personnel est conscient de la complexité du problème et surtout de l'interdépendance entre les acteurs concernés ce qui oblige à une coordination effective pour réduire ce risque environnemental. En ce qui concerne la population locale, son intérêt se manifeste surtout lors des épisodes pluvieux entraînant des coulées boueuses qui dégradent les biens publics ou privés. Dans ce cas, elle n'hésite pas à signaler le territoire agricole comme étant la source de tous ses maux sans être toujours consciente de sa part de responsabilité dans

certaines situations (augmentation des zones imperméabilisées, localisation hasardeuse de certaines habitations, etc.) Il reste un travail à faire pour évaluer l'intérêt réel de la population locale à s'impliquer directement et activement dans une gestion concertée, notamment quand la motivation initiale de ce changement à une demande qui lui est externe.

Par rapport à cette situation, nous avons eu quelques difficultés pour mettre en place le premier dispositif de la démarche d'accompagnement, c'est-à-dire, la construction collective de la représentation du système. Nous avons en effet souhaité inviter des agriculteurs et des maires à cette étape en plus des représentants des institutions ou organisation en charge du problème. Beaucoup d'agriculteurs ont déclinés notre offre. Certes, les conditions d'organisation de cette réunion (deux jours complets dans la même semaine) n'étaient pas idéales pour susciter une forte participation. Néanmoins, le faible taux de participation (environ 10% des personnes contactées) montre le besoin de mieux positionner la démarche au cœur du système. Dans les étapes ultérieures telle que la convocation aux phases de jeu de rôles, nous sommes conscients qu'il nous faudra envisager la médiation de certains acteurs locaux dans la préparation des futures expériences participatives afin de créer une sorte de pont entre les promoteurs de la démarche, les agriculteurs et les représentants des collectivités locales.

En ce qui concerne la démarche d'accompagnement, l'identification des acteurs concernés par le problème a été réalisée en respectant ses préceptes fondateurs, c'est-à-dire, sans à priori dans la définition du système à analyser ni dans les objectifs de gestion à réaliser. Les différents groupes d'acteurs impliqués dans cette démarche ont été identifiés initialement, au cours d'une première réunion de sensibilisation organisée en Janvier avec les institutions et organisations locales. C'est à partir des résultats obtenus que nous avons, ensuite, organisé une convocation large pour la réalisation des phases suivantes.

Dans la phase de conceptualisation collective du système, nous avons défini avec les acteurs identifiés précédemment une représentation du système, qui a été ultérieurement légèrement simplifiée afin de créer un outil permettant une appropriation plus facile par les usagers. Ces simplifications ont consisté, par exemple, à créer des rôles plus génériques tels que celui d'un syndicat englobant les trois types de syndicats détaillés par les participants à la réunion, puisque les actions de ces différents syndicats étaient de même nature, vis-à-vis du ruissellement. Ces simplifications ont été présentées lors d'une réunion de restitution en fin de stage et elles ont été validées par l'ensemble du groupe d'acteurs. La représentation du système, ainsi que les différents types d'acteurs retenus, seront également validés au cours d'un jeu de rôles qui sera organisé début 2007. Cette phase de la démarche de modélisation d'accompagnement, nous permettra de tester la pertinence de la représentation élaborée et les éventuelles adaptations à mettre en œuvre pour mieux prendre en compte les comportements des acteurs modélisés. Cette possibilité de remettre en question la représentation réalisée est un des éléments caractéristiques de la posture scientifique de cette démarche puisqu'elle propose des outils pour aider à la discussion qui doivent être flexibles afin d'évoluer et de s'adapter en fonction du processus de discussion.

A la suite de ce processus de validation, nous espérons avoir des outils de modélisation favorisant une discussion large entre les parties prenantes afin de permettre l'émergence d'une gestion concertée du problème de ruissellement érosif dans les différents bassins versants d'application. Nous envisageons la possibilité d'utiliser cette démarche et l'outil développé dans différents secteurs de la Seine Maritime. Nous pourrions en comparer les résultats obtenus avec les différentes procédures de validation et les différents de jeu de rôles participer à l'évaluation de cette démarche.

Par rapport au jeu de rôles, il reste à définir les conditions de sa mise en œuvre. Nous avons déjà des propositions de la Chambre d'Agriculture pour tester sa mise en œuvre dans deux situations

différentes : l'une où les agriculteurs sont demandeurs pour travailler ensemble afin de gérer le problème ruissellement érosif et l'autre où c'est une communauté de commune qui souhaite enclencher une discussion avec les agriculteurs pour gérer le problème. A l'issue de ces jeux, il serait intéressant d'étudier l'influence de l'asymétrie des informations existantes sur le comportement des acteurs au cours de la concertation.

Un champ de recherche qui me trouve intéressant à développer est celui de la relation entre les structures de pouvoir et la négociation. Dans quelle mesure, le fait de mettre dans un même processus de négociation deux acteurs avec une différence importante de pouvoir, permet d'enclencher un véritable processus de concertation ? Je m'interroge également sur la qualité du résultat environnemental issu de ce processus de concertation et sur la transposition des résultats obtenus au cours de la démarche de modélisation d'accompagnement dans l'action réelle. L'inquiétude apparaît, notamment, en analysant la situation des acteurs positionnés en condition plutôt favorable (par exemple, ceux dont l'exploitation agricole et les terres associées sont plutôt localisées en amont du bassin versant). Premièrement, ils ne sont pas forcément motivés pour participer au processus de négociation mais même s'ils décident de participer à la discussion, il n'existe pas d'éléments qui permettent d'assurer la mise en œuvre effective des décisions prises dans le processus de négociation. Actuellement, il n'existe pas de contraintes particulières qui les obligent à se comporter de manière écologique, en accord avec l'objectif environnemental susceptible d'être défini au cours du processus de négociation. Peut être que le seul argument pour la mise en œuvre effective se trouve dans la robustesse du processus de concertation lui-même. La transposition des comportements du jeu à la réalité, née dans le compromis personnel acquis suite à la compréhension de la situation de l'ensemble des participants et à la discussion collective enclenchée, pourra créer un sentiment de solidarité, entendu comme celle de l'appartenance commune à un système exposé à un risque environnemental dans lequel chacun assume sa part de responsabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- Antona M., Bommel P., Bousquet F. et Le Page C., 2002. Interactions and organization in ecosystem management: the use of multi-agent systems to simulate incentive environmental policies. "Agent-Based Simulation 3", Passau, Allemagne, 7-9 Avril 2002.
- 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, p 41-62.
- Barnaud C., 2004. Erosion des sols et système agraires dans les hautes terres du nord de la Thaïlande : Une approche de la complexité par une modélisation d'accompagnement, Paris, *Mémoire de DEA – Ecole doctorale « Milieux, cultures et sociétés du passé et du présent »*, 150 p. A paraître.
- Barreteau O., Bousquet F., et Attonaty, J.M., 2001. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol 4, N°2.
- Barreteau O., 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. *Journal of Artificial Societies and Simulation*. Vol 6, N°2.
- Becu, N., 2001. Modélisation de la gestion de l'eau d'irrigation à l'échelle d'un bassin versant et exploration du système via simulation, Montpellier. *Série irrigation Mémoires de 3^e cycle*. 16, N°973, 158 p.
- Blanchard E., King C., Le Bissonais Y., Bourguignon A., Souchère V., Desprats J-F., Maurizot P., 1999. Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques. *Etudes et gestion de sols* 6. 181-199.
- Bonté B., 2004. Réunion de deux types de représentation de l'exploitation agricole du milieu: la représentation systémique et la modélisation multi-agents a travers une liaison entre les logiciels «Olympe » et « Cormas ». *Mémoire de stage de l'école des Mines de Douai*. 38 p.
- Bonté, P., Thomas A., Mouchel JM., LeCloarec MF., Sogon S., Tessier L., 2000. Temps de transit des particules dans le réseau hydrographique: l'apport de traceurs isotopiques "naturels". Rapport d'activité 1999, PIREN-Seine, Paris, Vol 6, p. 56-76.
- Bousquet F., Barreteau O., Weber J., 1996a. Systèmes multi-agents et couplage des modèles biophysiques et socio-économiques. in *Couplage de modèles en agriculture*, Collection Colloques Cirad.
- Bousquet F., Barreteau O., Mullon C., Weber J., 1996b. Modélisation d'Accompagnement : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables. Colloque International. "Quel environnement au XXI^{ème} siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie " Abbaye de Fontevraud 8-11 Septembre 1996.
- Bousquet F., 2001. Modélisation d'accompagnement: Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables *Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Lyon* 1. 70 p.

- Bousquet F. et G. Trébuil. 2005. Synergies between multi-agent system and role-playig game in companion modelling for integrated natural resource management in Southeast Asia. In: V. Kachitvichyanukul, U. Purintrapidan et P. Utayopas (Eds). "Proceedings of SIMMOD 2005", Bangkok, Rose Garden, 17-19 janvier 2005. p: 461-469.
- Cartier S., 2002a, Chronique d'un déluge annoncé. Crise de la solidarité face aux risques naturels, Paris, Grasset, 373 p.
- Cartier S. 2002b. Ruissellement Erosif: Prévention des risques ou des conflits ?. Nature, Science et Sociétés. Editions Scientifiques et médicales Elsevier SAS, Vol. 10, n°3, p. 48-53.
- Cerdan O., 2001. Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivées. Thèse de l'Université d'Orléans, 163 p.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., Martin P., Lecomte V., 2002a. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. Earth Surface Processes and Landforms Earth Surf. Process. Landforms 27, 193–205.
- Cerdan O., Y. Le Bissonnais, A., Couturier, N. Saby. 2002b. Modelling interrill erosion processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM. Hydrological Processes. 16 (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 and Erosion related to Agricultural Management. Catena 46, p. 189–205.
- Collectif Commod, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. Nature Sciences et sociétés. Vol 13, p. 165-168.
- Collectif Commod, 2006. Modélisation d'accompagnement. In Amblard F. et Phan D. (eds.) Modélisation et simulation multi-agents : applications aux Sciences de l'Homme et de la Société, Londres, Hermès-Sciences, p. 217-228.
- D'Aquino P., Le Page C., Bousquet F., 2001. Accompanying governing processes in land use management with linking role playing games, GIS and MAS: The SelfCormas experiment in the Senegal river valley. *Paper presented at Agent-based models of land-use and land-cover change*. Santa Barbara Univ., Indiana Univ., Los Angeles.
- D'Aquino, P., Barreteau, O., Etienne, M., Boissau, S., Bousquet, F., Le Page, C., Aubert, S. et Daré, W. 2002a. The role playing games in an ABM participatory modeling process: outcomes from five different experiments carried out in the last five years. In: A.E. Rizzoli et A.J. Jakeman (Eds). "Integrated assessment and decision support. iEMSS. 1st biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society", Lugano, Suisse, 24-27 juin 2002, p. 275-280.
- D'Aquino P., Le Page C., Bousquet F., Bah A., 2002b. Jeux de rôles, SIG et SMA pour la gestion territoriale...Et si les acteurs-décideurs construisaient leurs propres outils ?, Recherches : Responsabilités et environnement, Annales des Mines, Juillet, 82 p.
- D'Aquino P., Le Page C., Bousquet F., Bah A., 2003. Using self-designed role playing games and a multi-agent system to empower a local decision-making process for land use management: The selfCormas experiment in Senegal. . *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 6, N°3, 27 p.

- Etienne M., Le Page C., Cohen M., 2003. A Step-by-step Approach to Building Land Management Scenarios Based on Multiple Viewpoints on Multi-agent System Simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* Vol. 6, N° 2.
- Etienne M., 2004. Jeux de rôles et élevage extensif : Un outil pour stimuler l'émergence et la confrontation de points de vue. *Outils pour des plateformes de négociation entre acteurs*. Atelier modélisation environnement IRD-NSS Dialogues. Compte-rendu de la XIV^{ème} session. Septembre.
- Ferber J., 1995. Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. Livre InterEdition. 522 p. Paris.
- Ferber J., 2006. Concepts et méthodologies multi-agents. In Amblard F. et Phan D. (eds.) *Modélisation et simulation multi-agents : applications aux Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermès-Sciences, p. 11-36.
- Gaillard D., 2004. Gestion concertée du ruissellement érosif dans les espaces agricoles des plateaux de grande culture Analyse spatiale, approche socio-économique et mise en place d'une dynamique collective d'aménagement. Exemple de la Seine-Maritime France. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 508 p.
- Gilbert N., Den Besten M., Bontovics A., Craenen B., Divina F., Eiben A.E., Griffioen R., Hévizi G., Lőrincz A., Paechter B., Schuster S., Schut M., Tzolov C., Vogt P., Yang L., 2006. Emerging Artificial Societies. Through Learning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol 9, N°2.
- Guizol, P., 1995. Interstitial areas, externality and local solidarity. The Sagara ravine case, Burundi. Conference: Presented at "Reinventing the Commons," the fifth annual conference of the International Association for the Study of Common Property, May 24-28, 1995, Bodo, Norway.
- Guyot P. et Drogoul A., 2004. Designing multi-agent based participatory simulations. Proceedings 5th Workshops on Agents-Based Simulations. Coelho, Espinasse eds. SCS Europe BVBA. 6 p.
- Joannon A., 2004a, 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. *Thèse pour doctorat*, discipline Agronomie, INA-PG, 230 p.
- Joannon A., Torre A., Souchère V., Martin P., 2004b. The determinants of local collective action on erosive runoff. An analysis of farmers' geographical proximities in Upper Normandy, France. *Int. J. Sustainable Development*, Vol. 7, N°3, p. 302-320.
- Joannon A., Papy F., Martin P., Souchère V., 2005. Planning work constraints within farms to reduce runoff at catchment level. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol. 111, N°1-4, p. 13-20.
- Joannon A., Souchère V., Martin P., Papy F., 2006. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degradation and Development*. Vol. 17, N°5, p. 467-478.
- Lankford, B.A. et Sokile, C.S., 2003. The River Basin Game Manual. Water Dialogue Tool. Manual for RIPARWIN Project, DFID-KAR Project No. R8064, Soil-Water Management Research Group, Sokoine University of Agriculture, Tanzania, p. 22.

- Lechêne S., 2002. Remembrement et ruissellement en Seine Maritime. Utilisation d'un outil de modélisation: STREAM. Application au bassin versant de Flamets-Frétils. *Mémoire de fin d'étude d'ingénieur ESGT*, Le Mans, 80 p. + Annexes.
- Le Bissonnais Y., Renaux B. et Delouche H., 1995. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, Vol. 25, p. 33-46.
- Lecomte V. 1999. Transferts de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Processus, déterminisme et modélisation spatiale. *Thèse ENGREF*. 200 p.
- Liégeois M., Arnould P., Wicherek S., 2005. Tous vulnérables ? Le diagnostic de vulnérabilité aux aléas de l'érosion : un outil pour l'action collective. *Revue VertigO*, Décembre 2005, Vol. 6, N°3.
- Locatelli B., 2000. Pression démographique et construction du paysage rural des tropiques humides: l'exemple de Mananara (Madagascar). Thèse à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 396 p.
- Martin P., Papy F., Souchère V., Capillon A., 2000. Ruissellement agricole: cerner les marges de manœuvre par une modélisation des pratiques de production. *Ingénieries – EAT*. N°23. p. 25-37.
- Mermet L., Billé R., Leroy M., Narcy J-B., Poux X. 2005. L'analyse stratégique de la gestion environnementale : un cadre théorique pour penser l'efficacité en matière d'environnement. *Nature, Sciences et Sociétés*. Vol 13. p.127-137.
- Michaud M. et Bourgain O., 2005. Évaluation du coût de mise en place de pratiques agricoles permettant de limiter le ruissellement érosif : l'exemple des exploitations sur le plateau du Neubourg. *Ingénieries* N°43. p. 33-42.
- Nivoit D., 1995. La gestion du territoire agricole et la maîtrise de l'érosion par concentration du ruissellement à l'échelle d'une commune. Approche méthodologique, *Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome*, INA-PG, INRA SAD, Paris, 64 p. + Annexes.
- Ollagnon, H., 1987. Une nécessaire rencontre des approches théoriques et pragmatiques de la gestion de la nature : l'audit patrimonial de type système-acteurs, Paris, Ministère de l'Agriculture-DAFE.
- Ollagnon, H., 1989. Une approche patrimoniale de la qualité du milieu naturel. In Mathieu N. et Jollivet, M., (ed.) : *Du rural à l'environnement, la question de la nature aujourd'hui*. Paris, A.R.F éditions - L'Harmattan.
- Ouvry J.-F., 1990. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré. Expérience du Pays de Caux (France). *Cahiers ORSTOM*, série Pédol., Vol. XXV, N° 1-2, p. 157-169.
- Ouvry J.-F., 1992. L'évolution de la grande culture et l'érosion des terres en pays de Caux. *Bulletin de l'Association de Géographes Françaises*, vol. 2, p. 107-113.
- Ostrom E., 1990. *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective action*, Cambridge, CUP.

- Ostrom E., 2000, Private and Common Property Rights in l'Encyclopédie de Gand:
<http://www.allserv.rug.ac.be/~gdegeest/>
- 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 de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon*, 200 p.
- 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* Vol. 206, p. 256-267.
- Souchère V., King C., Dubreuil N., Lecomte-Morel V., Le Bissonnais Y., Chalat M., 2003. Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. *Environmental Science & Policy*, Vol. 6, N°1, p. 7-16.
- Voustrat A., 2006. Modélisation du ruissellement hivernal sur des sols agricoles drainés. Application du modèle STREAM sur le bassin versant de Mélarchez (77). Mémoire de Master 2 « Espaces, dynamique des milieux et risques », Université Paris I et VII, 91 p. + annexes.
- Weber, J. et Bailly, D., 1993. Prévoir c'est gouverner. *Nature, Sciences, Sociétés*, Vol. 1, N°1.
- Weber J., 1995. Gestion des ressources renouvelables: fondements théoriques d'un programme de recherche. Cirad. 21 p. <http://cormas.cirad.fr/pdf/green.pdf>.

Annexe N°1
Liste de Présence des Acteurs à la Réunion de
Conceptualisation du Modèle

Liste Finale des Acteurs aux Réunions

I. Réunion Mardi 30 Mai 2006

1. Agriculteurs/Éleveurs

Nom, Prénom	Localité	Activité
A1	Norville	Polyculture (Blé - Orge - Colza - Pois - Feverole - Maïs Grain (Maïs ensilage)) / Élevage Viande
A2	Houssaye-Beranger	Polyculture (Blé - Lin - Orge - Colza) / Élevage Lait et Viande
A3	Goupillieres	Polyculture (céréale - lin) / Élevage Système VA
A4	Sainte Austreberthe	Polyculture / Élevage Lait et Viande
A5	Butot	Polyculture (Betterave - Lin - Pomme de Terre - céréale - colza) / Élevage Lait
A6	St Ouen du Breuil	-

2. Maires de Commune

Nom, Prénom	Localité
M1	Sainte Austreberthe
M2	Butot
M3	Houssaye-Beranger
M4	Ancien Maire

3. Syndicat de Bassin Versant

Nom, Prénom	Poste
Fiquepron, Julien	Animateur Agricole du syndicat de l'Austreberthe et du Saffimbec

4. Chambre d'Agriculture de Seine Maritime

Nom, Prénom	Poste
Lecomte, Véronique	Conseillère en charge de la problématique ruissellement érosion au sein de la Chambre

5. AREAS (Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols)

Nom, Prénom	Poste
Ouvry, Jean François	Directeur

6. INRA/CIRAD

Nom, Prénom	Poste
Souchère, Véronique	Ingénieur de Recherche
Echeverria, Javier	Stagiaire

II. Réunion Vendredi 2 Juin 2006

1. Agriculteurs/Éleveurs

Nom, Prénom	Localité	Activité
A1	Norville	Polyculture (Blé - Orge - Colza - Pois - Feverole - Maïs Grain (Maïs ensilage)) / Élevage Viande

2. Maires de Commune

Nom, Prénom	Localité
M4	Ancien Maire

3. Syndicat de Bassin Versant

Nom, Prénom	Poste
Fiquepron, Julien	Animateur Agricole du syndicat de l'Austreberthe et du Saffimbec

4. Chambre d'Agriculture de Seine Maritime

Nom, Prénom	Poste
Lecomte, Véronique	Conseillère en charge de la problématique ruissellement érosion au sein de la Chambre

5. AREAS (Association Régionale pour l'Étude et l'Amélioration des Sols)

Nom, Prénom	Poste
Ouvry, Jean François	Directeur

6. INRA/CIRAD

Nom, Prénom	Poste
Souchère, Véronique	Ingénieur de Recherche
Echeverria, Javier	Stagiaire

Annexe N°2
Données Economiques de Cultures et
Production Bovine en Haute Normandie

VALEUR DES ANIMAUX					PRIX DU LAIT			
	<5500	<5700	<6000	>=6000	Prix de base	0,2840		
VL PH	914,7	990,9	1036,7	1067,1	Différ TB	0,305		
G+2 PH	838,5	914,7	945,2	975,7	Différ TP	0,534		
G1-2 PH	564,1	609,8	640,3	655,5	Lait aux veaux	0,1535		
G-1 PH	304,9	304,9	304,9	304,9	PRIX DES ANIMAUX			
B+2 PH	914,7					Kg carc	Px/Kg	Px/Al
B1-2 PH	609,8				Réf. VL PH Herbe	280	2,15	602
B-1 PH	304,9				Réf. VL PH Maïs	315	2,4	756
Taur. PH	686,0				Réf. VL NO Herbe	300	2,6	780
	<5500	>=5500			Réf. VL NO Maïs	335	2,6	871
VL NO	1067,1	1143,4			Réf. V.A.	375	3	1125
G+2 NO	990,9	990,9			Gén. pleine PH	-	-	1150
G1-2 NO	686,0	686,0			Gén. pleine NO	-	-	1300
G-1 NO	381,1	381,1			Veau Fem. PH	-	-	140
B+2 NO	1067,1				Veau Mâle PH	-	-	180
B1-2 NO	762,2				Veau Fem. NO	-	-	185
B-1 NO	457,3				Veau Mâle NO	-	-	235
Taur. NO	1067,1				Bf PH Fin. auge	360	2,55	918
V.A	1219,6				Bf PH Fin. Herbe	360	2,55	918
B&G VA+2	1067,1				Bf NO Fin. auge	380	2,75	1045
B&G VA1-2	762,2				Bf NO Fin. Herbe	370	2,75	1017,5
B&G VA-1	228,7				Bf V.A.	440	3,2	1408
Taur. VA	762,2				Gén.V.A.	330	3,2	1056
PRODUITS CULTURES			F/Q ou T					
BLE				8,8				
ORGE/ESC	8,5							
POIS	10,5							
COLZA	18,5							
BETT SUCRE	38							
LIN	25,916							
Primes Cultures								
Maïs	404							
Céréales	404							
Protéagineux	459							
Gel	404							
Frais d'elevage F/VL		<5000	>5000					
Cont. Laitier		35	45					
		<4000	4à6000	>6000				
Insemination		24	35	47				
Frais véto		35	43	58				
Taxes		0,23	cts/l					
Véto/El ou VA		43						
I.A. VA		44						
					Primes animales			
					Bovin mâle	142,5		
					Extensif	40		
					Herbe/Ha	46		
					Soja	0,235		
					VL18	0,205		
					CMV	0,610	si herbe	
					Pdre de lait	1,320		
					JB	0,300		
					Céréale	0,098		
					Pulpe sèche	0,130		
					P. Surp. droit	14,000	F/T brut	
					P.Sur.hors droit	19,000	F/T brut	
					P. Surp. % M.S.	24		



Vêlages automne : herbe l'été – maïs l'hiver

Calendrier des vêlages

MOIS	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
% Vêlages	20	30	30	10	10

Composition des rations

PERIODE	TRANSITION	PRINTEMPS	ETE	AUTOMNE	HIVER	% utilisation	UFL/kg MS
	10.03-10.04	10.04-10.06	10.06-10.09	10.09-10.11	10.11-10.03		
Nombre de jours	30	60	90	60	120		
% Ensilage de maïs	55	0	0	45	95	44	0,91
% Pâturage	40	100	100	50	0	53	0,95
% Foin	5	0	0	5	5	3	0,63
% Ensilage d'herbe	0	0	0	0	0	0	0,8
	100	100	100	100	100	100	0,94

Consommation de fourrages et concentrés par VL et par an

	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	€/kg
Lait/VL (kg à 7 %)	4600	5060	5520	5980	6440	6900	7360	7820	8280	8740	9200	
Lait/VL (l à 7 %)	4600	5060	5520	5980	6440	6900	7360	7820	8280	8740	9200	
Fourrages à 0,94 UFL/kg MS	4510	4886	4861	5037	5212	5388	5563	5739	5914	6090	6265	
Correcteur azoté	148	196	248	302	360	421	485	552	623	696	773	0,23
Conc. de production	312	364	412	458	500	539	575	608	637	664	687	0,2
Minéraux	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	0,3
Total Conc/VL (kg brut)	500	605	710	815	920	1025	1130	1235	1340	1445	1550	
Concentré (g/l 7 %)	109	120	129	136	143	149	154	158	162	165	168	
Coût €/1000 L 7%	22	24	26	27	29	30	31	32	33	34	34	
Total ingestion (kg MS)	4940	5206	5472	5737	6003	6269	6535	6801	7066	7332	7598	

incidence prix, quantité concentrés sur le coût /1000 Litres 7%

+ 0,05 €/kg concentrés	5	6	6	7	7	7	8	8	8	8	8	
+ 20 g concentrés /L 7%	+ 4 €/1000 L 7%											

Fourrages :

Ensilage de maïs (kg MS)	1973	2050	2127	2203	2280	2357	2434	2511	2587	2664	2741	
Pâturage (kg MS)	2405	2499	2593	2686	2780	2873	2967	3061	3154	3248	3341	
Foin (kg MS)	132	137	142	147	152	157	162	167	172	178	183	
Ens. d'herbe (kg MS)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL KG MS	4510	4686	4861	5037	5212	5388	5563	5739	5914	6090	6265	



Blé d'hiver "Zones de plaine"

	conduite technique de la culture		
	Assurance	Raisonnée	Economique
	€ ITK	€ ITK Bon potentiel	€ ITK potentiel moyen
Semences :	42 € 300 g/m ² - 140 Kg Gauchon	36 € 240 g/m ² - 120 Kg T4	30 € 220 g/m ² - 100 Kg T3
Fertilisation : (unité NPK) P et K avant labour ou au semis Requats sortie hivernage = 60 u Apports N : - 15 février vers le - 15 mars - 10 avril	151 € 170 - 90 - 90 200 kg de Super 45 150 kg de Chlorure 100 l de solution N 30 200 l de solution N 30 150 l de solution N 30	151 € 170 - 90 - 90 200 kg de Super 45 150 kg de Chlorure 100 l de solution N 30 200 l de solution N 30 150 l de solution N 30	143 € 150 - 90 - 90 200 kg de Super 45 150 kg de Chlorure 50 l de solution N 30 200 l de solution N 30 150 l de solution N 30
Insecticide : Stade levée - 3 feuille Stade Epiaison - Début juin	15 € aux 2 stades	15 € aux 2 stades	8 € mi-dose au 1 ^{er} stade
Désherbage : Hivers : janvier - février Rattrapage : fin mars	102 €	51 € doses réduites	51 € doses réduites
Fongicides : Stade 1 à 2 noeuds Stade gonflement - 20 mai Stade Epiaison - Début juin	124 € 3 traitements	82 € 3 traitements	38 € 1 traitement
Régulateur : Stade Epi 1 cm - Fin mars Stade Epi 5 cm	16 € aux 2 stades	4 € à un stade	
Charges opérationnelles	450 €	339 €	270 €

Marge brute hors aide compensatoire :

Prix = 10 € / Q

Rendement	75 Q	300 €	411 €	411 €
/ ha	85 Q	400 €	511 €	580 €
	95 Q	500 €	611 €	-

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

	Assurance		Raisonnée		Economique	
	h /ha	coût (€)	h /ha	coût (€)	h /ha	coût (€)
Labour	0,91	9,35	0,91	9,35	0,91	9,35
semis combiné	0,71	8,49	0,71	8,49	0,71	8,49
Fertilisation	1,00	7,06	1,00	7,06	1,00	7,06
Traitements	1,00	12,21	0,89	10,85	0,44	5,43
Moissonneuse (propriété)	0,67	16,74	0,67	16,74	0,67	16,74
transport grains	0,67	4,96	0,67	4,96	0,67	4,96
déchaumage	0,40	4,79	0,40	4,79	0,40	4,79
Total mécanisation	5,36	63,60 €	5,25	62,24 €	4,80	56,81 €
(coût yc charge fixes)		318,04 €		308,91 €		272,39 €
(nombre de passages)	19		18		14	



Colza d'hiver

	Conduite technique de la culture raisonnée	
	€	
Semences :	39 €	2,5 à 3 kg /ha ; 70 pl/m ² (50 % fermière) (24,50 €/kg si 100 % achetés)
Fertilisation : <i>P et K avant labour ou au semis</i> <i>Apports N : - mi-février - mi mars</i>	111 €	170 - 60 - 40 150 kg Super 45 150 kg Chlorure 200 kg solution N 39 250 kg solution N 39
Insecticide :	23 €	Levée Stade boutons accolés - Début avril Stade floraison - Début mai (Charançons)
Désherbage :	89 €	Post semis Rattrapage en post levée (20 % de la surface)
Fongicides :	64 €	Stade mi-floraison - Mai Stade siliques formées - Juin (1 année sur 2)
Régulateur :	14 €	Stade Début élévation - Mars (1 année sur 2)
Charges opérationnelles	340 €	

Marge brute hors prime compensatrice		
<i>Rendement</i>	33 Q	353 €
<i>(Qtx / ha)</i>	38 Q	458 €
	43 Q	563 €

Prix = 21 € / Q

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

(exemple en Plaine)	h /ha	coût (€)	
Labour	0,91	9,35	
semis combiné	0,71	8,49	
roulage	0,25	1,98	
Fertilisation	0,80	5,65	
Traitements	0,67	8,14	
Moissonneuse (propriété)	0,67	18,41	(110% coûts sur céréales)
transport grains	0,67	4,96	
broyage	0,50	4,96	
déchaumage	0,40	4,79	
Total mécanisation	5,57	66,72 €	
(coût yc charge fixes)		327,91 €	
(nombre de passages)		17	



Orge d'hiver (Zone de plaine et d'élevage)

	Zone de plaine		Zone d'élevage	
	€	ITK	€	ITK
Semences :	59 €	Semence Gaucho 100 kg/ha (250 gr /m2)	62 €	Semence Gaucho 100 kg/ha (250 gr /m2)
Fertilisation : (N P K)	127 €	150 - 90 - 90	110 €	110-30-60
P et K avec le 1er apport N		200 kg Super 45 150 kg Chlorure		80 kg de Super 40 100 kg de Chlorure
Apports N : - 15 février vers le - 15 mars		150 l solution N 30 200 l solution N 30		100 Kg d'Ammonitrate 230 kg d'Ammonitrate (apports organiques réguliers)
Insecticide :	8 €	à l'automne	-	
Désherbage :	51 €	hiver (jan-fév) rattrapage (fin mars)	50 €	Post-levée précoce Rattrapage au printemps : mi-mars
Fongicides :	75 €	Stade 1 à 2 noeuds Stade gonflement - 20 mai Stade Epiaison - Début juin	60 €	Stade 1 noeud - Mi-avril Stade gonflement - mi-mai
Régulateur :	25 €	aux 2 stades	20 €	Stade 2 noeuds
Charges opérationnelles	345 €		302 €	

Remarque : possibilité de réduire les coûts en conduite économe (ou avec forte technicité) :
(- 40 € de fertilisation minérale si apport fréquent de fumier, lisier ; - 30 € sur fongicides)

Marge brute hors prime compensatrice

		Zone de plaine		Zone d'élevage	
Prix grains =		9,5 € / Q		9,0 € / Q	
Prix paille sur andain =		25 € / T		25 € / T	
Grains /ha	Paille /ha	sans paille	vente paille	sans paille	vente paille
60 Q	3,9 T	-	-	238 €	336 €
65 Q	4,2 T	273 €	378 €	283 €	389 €
70 Q	4,6 T	320 €	434 €	328 €	442 €
75 Q	4,9 T	368 €	489 €	373 €	495 €
80 Q	5,2 T	415 €	545 €	-	-

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

	Zone de plaine		Zone d'élevage	
	h /ha	coût (€)	h /ha	coût (€)
Labour	0,91	9,35	1,25	10,03
semis combiné	0,71	8,49	0,91	8,61
Fertilisation	0,80	5,65	1,33	6,85
Traitements	0,89	10,85	1,50	10,28
Moissonneuse (propriété / ETA)	0,67	16,74		110,00
transport grains	0,67	4,96	0,67	3,89
pressage /ETA 4,40 €x20 BR		88		88
déchaumage	0,40	4,79	0,83	5,58
Total mécanisation	5,05	148,83	6,49	243,24
(coût yc charge fixes)		390,05		381,30
nb passages (agriculteur)	17		14	



POIS protéagineux de printemps

	<i>bons potentiels</i>	<i>potentiels limités</i>
	€ ITK	€ ITK (économe)
Semences :	89 € 250 kg /ha (semence fermière à 50%) (137 € si 100 % achetée)	75 € 250 kg /ha (semence fermière ++)
Fertilisation : (N P K)	67 € 0 - 90 - 90 200 kg Super 45 150 kg Chlorure	45 € 0 - 55 - 60 120 kg Super 45 100 kg Chlorure
Insecticide :	33 € A la levée (3 - 4 cm) A la floraison - Juin	30 € A la levée (3 - 4 cm) A la floraison - Juin
Désherbage :	107 € Avant la levée en post semis Rattrapage en post levée - Mi-avril	80 € (doses réduites)
Fongicides :	70 € Stade début floraison Stade mi-floraison	50 € (doses réduites)
Charges opérationnelles	366 €	280 €

Marge brute hors prime compensatrice

Prix = 12 € / Q

<i>bons potentiels</i>	<i>potentiels limités</i>
rendement/ha	rendement/ha
marge /ha	marge /ha
55 Q	45 Q
294 €	260 €
60 Q	50 Q
354 €	320 €
65 Q	55 Q
414 €	380 €

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :	bons potentiels		potentiels limités	
	h /ha	coût (€)	h /ha	coût (€)
Labour	0,91	9,35	0,91	9,35
hersage (prépa semis)	0,67	7,65	0,67	7,65
semis	0,71	8,49	0,71	8,49
Fertilisation	0,40	2,82	0,40	2,82
Traitements (6 et 4 fois)	0,67	8,14	0,44	5,43
Moissonneuse (propriété)	0,67	16,74	0,67	16,74
transport grains	0,67	4,96	0,67	4,96
broyage	0,50	4,96	0,50	4,96
déchaumage	0,40	4,79	0,40	4,79
Total mécanisation	5,59	67,90 €	5,37	65,19 €
(coût yc charge fixes)		339,73 €		321,47 €
nb passages (agriculteur)	15		13	



Pomme de Terre consommation.

	€	ITK
Semences :	985 €	1,3 t/tonne / ha
Fertilisation :	148 €	160 -120 - 300
<i>P et K avant labour ou au semis</i>		155 kg Super 45
<i>Reliquats sortie hivernage = 60 u</i>		200 kg Sulfate 48 %
<i>Apports N : avant plantation</i>		400 l Solution N 39
Insecticide :	1 €	
Désherbage :		
<i>Pré-levée</i>	69 €	
<i>Défanage</i>	35 €	
Fongicides :	152 €	
<i>9 passages</i>		
<i>2 passages pénétrants</i>		
Charges opérationnelles		1 390 €

Marge brute hors prime compensatrice		
<i>Rendement</i>	30 T	890 €
<i>par ha</i>	40 T	1 650 €
	50 T	2 410 €

Prix = 76 € / T
très variable

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

(exemple en Plaine)	h /ha	coût (€)	
Labour	0,91	9,35	
hersage préparation du sol	0,67	7,65	
plantation automatique 4rgs	1,25	10,39	
battage	0,83	6,43	
Fertilisation	0,60	4,24	
Traitements chimiques	1,44	17,64	
Récolte et transport	7,40	458,00	(estimation)
conservation		137,00	
broyage des fanes	1,00	10,91	
déchaumage	0,40	4,79	
Total mécanisation	14,50	666,4 €	
		945,35 €	
(nombre de passages)	23		



Maïs grain.

	€	ITK
Semences :	138 €	2 doses
Fertilisation : <i>P et K avant labour ou au semis</i> <i>Apports N : - mi-février</i>	152 €	160 - 80 - 60 180 kg Super 45 100 kg Chlorure 410 L Solution N 39 150 kg 18/46
Insecticide :	25 €	Au semis Stade cornet - Fin juin
Désherbage :	60 €	En pré-levée En post levée - Mai
Charges opérationnelles	375 €	

Marge brute hors prime compensatrice		
<i>Rendement</i>	75 Q	450 €
<i>(Qté / ha)</i>	85 Q	560 €
	100 Q	725 €

Prix = 11 € / Q

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

<i>(exemple : en plaine)</i>	h /ha	coût (€)
Labour	0,91	9,35
hersage (prépa semis)	0,67	7,85
semis du maïs	0,67	5,54
Fertilisation	0,60	4,24
Traitements	0,33	4,07
Moissonneuse (propriété)	0,67	16,74
transport grains	0,67	4,98
broyage cannes	0,50	4,98
Total mécanisation	5,01	57,50 €
<i>(coût yc charge fixes)</i>		274,32 €
<i>(nombre de passages)</i>	12	



Betteraves sucrières.

	€	ITK
Semences :	245 €	1,3 doses / ha Semences traitées Gaucho
Fertilisation : P et K avant labour ou au semis Reliquats sortie hivers = 60 u Apports N : avant plantation	135 €	140 - 80 - 240 180 kg Super 45 400 kg Chlorure 380 l Solution N 39 Solubor 2 fois 3 l
Insecticide :	10 €	
Désherbage :	160 €	3 passages en mélange Avril - Mai
Fongicides :	60 €	Juillet - Août / 1,5 passages (arrachage précoce 1 passage, tardif 2)
Charges opérationnelles	610 €	

Marge brute hors prime compensatrice		
<i>Rendement</i>	55 T	1 370 €
<i>par ha</i>	65 T	1 730 €
	75 T	2 090 €

Prix = 36 € / T

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

<i>(exemple : en plaine)</i>	h /ha	coût (€)	
Labour	0,91	9,35	
reprise	0,67	7,65	
hersage (prépa semis)	0,67	7,65	
semis (entreprise)	0,50	55,00	(estimation)
Fertilisation	0,60	4,24	
Traitements	0,61	7,46	
Récolte par entreprise		190,00	(estimation)
transport	2,50	18,61	(2 bennes en rotation)
Total mécanisation	6,45	299,96 €	
<i>(coût yc charge fixes)</i>		489,32 €	
<i>(nombre de passages)</i>	14,5		



Lin textile.

	€	ITK
Semences :	210 €	130 kg / ha
Fertilisation : <i>P et K avant labour ou au semis</i> <i>Apport N : Mi-mars</i>	73 €	10 - 45 - 60 100 kg 45 / 60 30 l Solution N 39
Insecticide :	16 €	A la levée (altises) Lin en bouton (Mai - juin)
Désherbage :	75 €	
Régulateur- Fongicides - ficelle :	46 €	
Charges opérationnelles	420 €	

Marge brute hors prime compensatrice :

Variabilité importante du prix

<i>Produit</i>	2 000 €	1 580 €
<i>potentiel</i>	2 400 €	1 980 €
<i>par ha</i>	2 800 €	2 380 €

(% filasse, qualité,...)

Ce produit comprend la prime "agriculteur". Il n'y a pas d'écapsulage.

Temps et coûts variables de mécanisation par hectare :

<i>(exemple en Plaine)</i>	h /ha	coût (€)	
Labour	0,91	9,35	
préparation du sol	0,67	7,65	
semis combiné	0,71	8,49	
Fertilisation	0,40	2,82	
Traitements	0,56	6,78	
Récolte et transport	6,00	400	(estimation)
déchaumage	0,40	4,79	
Total mécanisation	9,65	439,88 €	
<i>(coût yc charge fixes)</i>		588,38 €	
<i>(nombre de passages)</i>	12		